

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

**Modelaje hidráulico y aplicación del uso de espigones en una sección curva
del río Chiche.**

Juan Pablo Villacreses Cabrera

Tesis de grado presentada como requisito para la obtención del título de Ingeniero Civil.

Quito, noviembre del 2010

**Universidad San Francisco de Quito
Colegio de Ciencias e Ingeniería**

HOJA DE APROBACION DE TESIS

**Modelaje hidráulico y aplicación del uso de espigones en una sección curva
del río Chiche.**

Juan Pablo Villacreses Cabrera

Miguel Araque, Ing.
Director de la Tesis

Fernando Romo, Ms
Decano del Colegio de Ciencias e Ingeniería

Quito, 25 de noviembre de 2010

©Derechos de autor

Juan Pablo Villacreses 2010

Resumen

El presente proyecto “Modelaje hidráulico y aplicación del uso de espigones en una sección curva del Río Chiche” es un estudio de la influencia que tiene la separación de los espigones en un tramo curvo del río Chiche. Posterior a ello, se elaboró una propuesta alternativa para el encauzamiento del río en la zona donde se desarrollo el estudio. El proyecto inicia con la construcción y calibración de un modelo a escala de un tramo del río, el cual fue diseñado en base a la teoría de los modelos hidráulicos con escala distorsionada. Sobre éste se procedió a realizar la experimentación para determinar la influencia de los espigones sobre la velocidad del flujo del río. Con los resultados de la experimentación se procedió al diseño de una alternativa al encauzamiento existente utilizando espigones. Adicional a los objetivos que persigue el presente proyecto el modelo fue diseñado para ser utilizado en las cases de Ingeniería Hidráulica de la facultad de Ingeniería Civil de la Universidad San Francisco de Quito. Es por ello que sobre el modelo se pueden variar diferentes parámetros como lo rugosidad y la pendiente para así poder diversas prácticas de laboratorio sobre el mismo.

Abstract

The following project “Modelaje hidráulico y aplicación del uso de espigones en una sección curva del Río Chiche” is about the influence of spur dikes over the river flow velocity in a curve of the Chiche river. Additionally, a river channeling alternative is proposed using discontinuous river protections. The project begun with the construction of a hydraulic model of a curve of the Chiche river using the theory of perturbed scale models. Once the model was constructed the experimentation took place. The objective was to determine increment of the flow velocity over the presence of spur dikes. With this information a new alternative of channeling was designed and proposed. Furthermore the purpose of the model is to be used to teach in the classes of Hydraulics of the Universidad San Francisco de Quito. Therefore the model was created taking in consideration the possibility that some parameters like slope, roughness and flow discharge can be modified.

TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción.....	1
2	Escalas del modelo.....	3
2.1	Aspectos Generales.....	3
2.2	Número de Froude.....	5
2.3	Principio de semejanza.....	6
2.3.1	Semejanza de Froude.....	6
2.4	Modelo distorsionado de lecho fijo.....	7
3	Ríos.....	10
3.1	El Comportamiento de los Ríos.....	10
3.2	Geometría Hidráulica de un Río.....	11
3.3	Caudal Dominante.....	13
3.4	Leyes de Frague.....	13
3.5	Flujo uniforme.....	15
3.5.1	Ecuación de Manning.....	16
3.5.2	Selección de la rugosidad de Manning.....	18
3.6	Características del cauce de un río.....	20
3.6.1	Granulometría.....	20
3.6.2	Técnicas de muestreo.....	21
4	Encauzamiento.....	23

4.1	Trazado en Planta.....	23
4.1.1	Consideraciones.....	23
4.1.2	Trazado del cauce Principal.....	24
4.2	Diseño la sección transversal.....	27
4.2.1	Aspectos generales.....	27
4.3	Métodos de diseño.....	29
4.3.1	Método de la Velocidad Máxima.....	29
4.3.2	Método de la fuerza tractiva.....	31
5	Defensas Fluviales.....	41
5.1	Introducción.....	41
5.2	Concepto.....	42
5.3	Espigones.....	43
5.4	Ventajas y desventajas en el uso de espigones.....	46
5.5	Espigones permeables e impermeables.....	47
5.5.1	Espigones permeables.....	47
5.5.2	Espigones impermeables.....	48
5.6	Materiales constructivos.....	50
5.7	Mantenimiento.....	50
6	Diseño de espigones.....	52
6.1	Introducción.....	52

6.2	Consideraciones en el diseño	53
6.2.1	Orientación de los espigones.	54
6.2.2	Socavación.....	55
6.2.3	Longitud del espigón.	59
6.2.4	Separación de los espigones.	60
7	Aplicación del uso de espigones en el río Chiche.....	64
7.1	Descripción general.	64
7.1.1	Granulometría.....	67
7.2	Problemática anterior.....	70
7.2.1	Espigones.....	72
7.3	Consideraciones de diseño.....	74
7.3.1	Trazado en planta.....	74
7.3.2	Diseño espigones.....	78
7.4	Presupuesto de Construcción.....	90
8	Modelaje hidráulico de una sección curva del Río Chiche.....	93
8.1	Aspectos considerados en el diseño.....	93
8.2	Escalas.....	94
8.3	Diseño del Modelo.....	97
8.4	Calibración.....	99
8.5	Procedimiento y Resultados.....	104

8.5.1	Selección de variables.	104
8.5.2	Procedimiento.....	105
8.5.3	Resultados.....	107
9	Conclusiones y recomendaciones.....	109
10	Anexos.....	113
11	Bibliografía.....	119

Lista de figuras

Figura 3-1: Relaciones profundidad – velocidad para cuatro regímenes de flujo de canales abiertos. (Chow 14)	11
Figura 3-2: Parámetros del alineamiento de un río (M. Vide 59)	12
Figura 3-3: Relación entre Curvatura y Calado (M. Vide 64).....	13
Figura 3-4 Desarrollo de la capa limite (Chow 190).....	15
Figura 4-1: Corte de un meandro en forma natural. (M. Vide 58).....	24
Figura 4-2: Gráficos de los elementos a considerar encauzar un río entre dos límites paralelos	25
Figura 4-3 (Akan 164).....	32
Figura 4-4: Angulo de de reposo de los suelos no cohesivos según el diámetro de las partículas (Akan 165)	34
Figura 4-5 La figura muestra la fuerza desestabilizadora permisible para suelos cohesivos según la relación de vacíos (Akan 166).....	35
Figura 4-6 Fuerza desestabilizadora permisible para suelos cohesivos en función del índice plástico (Akan 166).....	36
Figura 4-7 Fuerza desestabilizadora permisible para suelos no cohesivos en función del diámetro de la partícula (Akan 198).....	37
Figura 5-1 (Alfredobi Web)	41
Figura 5-2 Esquema típico de un espigón tomado de “U.S Department of Transportation” (Felices 31).....	43
Figura 5-3: Tipos de espigones (Felices 33).....	45
Figura 5-4: Epigón permeable. (MACCAFERRI)	48

Figura 5-5:	49
Figura 6-1: Definición del ángulo α . (Felices 33)	55
Figura 6-2: Diagrama de la ubicación del ángulo.	61
Figura 6-3: Angulo de expansión en función de la permeabilidad del espigón y la relación LT/B por Brown (Felices 41).	61
Figura 7-1: Modificaciones del alineamiento del río.	65
Figura 7-2: Creación de una playa artificial 150 metros aguas abajo.	66
Figura 7-3: Influencia de los espigones a 456 metros aguas abajo.	67
Figura 7-4: Material superficial del cauce del río.	68
Figura 7-5: Material Sub-superficial del cauce del río.	68
Figura 7-6: Granulometría del material sub-superficial.	69
Figura 7-7: Muros de piedra para proteger la erosión del talud:	70
Figura 7-8: Actuales pastizales generados gracias a la reconfiguración del río.	70
Figura 7-9: Generación de la inestabilidad que posteriormente fue corregida utilizando los espigones.	71
Figura 7-10: Esquema de las condiciones actuales.	73
Figura 7-11: Altura de los espigones construidos y formación de las orillas virtuales.	73
Figura 7-12: Elementos del Río.	75
Figura 7-13: Alineación propuesta.	76
Figura 7-14: Disposición de los espigones al utilizar una separación de 20 metros.	80
Figura 7-15: Esquema de los espigones propuestos.	85
Figura 7-16: Fuerzas interventoras.	86
Figura 8-1: Sección del río a modelarse.	93

Figura 8-2: Conformación del cauce a modelarse.....	95
Figura 8-3: Dimensiones del modelo.	97
Figura 8-4: Modelo Hidráulico.....	99
Figura 8-5: Cálculo del coeficiente de rugosidad para la disposición de elementos transversales.....	102
Figura 8-6	106
Figura 8-7	107

Lista de Tablas

Tabla 3-1 Rugosidades de Manning según el material que conforma el cauce (Akan 61).	17
Tabla 3-2: Valores para el cálculo del coeficiente de rugosidad utilizando la Ecuación 3-4.	19
Tabla 4-1: Pendientes laterales recomendadas para los canales (Akan 158)	27
Tabla 4-2: Velocidades recomendadas (Akan 161).....	30
Tabla 4-3 Valores de C_p de acuerdo al alineamiento del canal.	38
Tabla 7-1: Posibles separaciones entre espigones a emplearse.	79
Tabla 7-2: Dimensiones de las mallas utilizadas para muro de gaviones.	84
Tabla 7-3: Datos empleados para el cálculo de la estabilidad.....	87
Tabla 7-4: Fuerzas	88
Tabla 7-5: Momentos	89
Tabla 7-6: Presupuesto referencial	91
Tabla 8-1: Propiedades Hidráulicas del Prototipo.....	100
Tabla 8-2: Configuración de los obstáculos transversales al cauce.	102
Tabla 8-3: Cambio de velocidades debido a la presencia de espigones	108

Lista de ecuaciones.

Ecuación 2-1	5
Ecuación 2-2	6
Ecuación 2-3	7
Ecuación 2-4	8
Ecuación 2-5	8
Ecuación 2-6	8
Ecuación 2-7	9
Ecuación 3-1	11
Ecuación 3-2	14
Ecuación 3-3: Ecuación de Manning	16
Ecuación 3-4	19
Ecuación 4-1	25
Ecuación 4-2	25
Ecuación 4-3	29
Ecuación 4-4	30
Ecuación 4-5	32
Ecuación 4-6	32
Ecuación 4-7	33
Ecuación 4-8	33
Ecuación 4-9	39
Ecuación 4-10	39
Ecuación 4-11	39

Ecuación 6-1	53
Ecuación 6-2: Cortante Promedio	56
Ecuación 6-3: Cortante Promedio basado en la ecuación de Manning.	56
Ecuación 6-4: Esfuerzo de corte crítico para el fondo del cauce.	56
Ecuación 6-5: Velocidad Crítica	57
Ecuación 6-6: Velocidad Crítica usando la ecuación de Strickler:	57
Ecuación 6-7 Calculo del calado después de la socavación.....	58
Ecuación 6-8: Cálculo del calado necesario.....	59
Ecuación 6-9	63

1 INTRODUCCIÓN.

La hidráulica es una rama de la ingeniería civil que pretende estudiar el comportamiento del agua como fluido. Hasta tiempos actuales esta ciencia ha tenido un gran desarrollo debido al empleo de un extensivo razonamiento analítico y a los resultados de modelos experimentales. El modelaje analítico es muy complejo y muchas veces no logra describir el comportamiento que pasa en la naturaleza.

El invierno actual a traído muchos problemas con el desbordamiento de ríos. En el Ecuador este fenómeno es una constante que afecta muchas poblaciones y cultivos. Otro grave problema que sucede en nuestro país son las erosiones de los taludes de las montañas debido a la poca implementación de obras de encauzamiento. Es por ello que en el Ecuador es de suma importancia realizar investigaciones sobre sistemas de protección de los márgenes de ríos y de encauzamiento. Por este motivo en nuestras clases sería significativo realizar un estudio más amplio sobre la manera de encauzar los ríos basándonos en modelos de laboratorio. Una forma de encausamiento de los ríos es utilizar protecciones discontinuas llamadas espigones. Su aplicación aún no tiene un buen sustento analítico y es por ello que todavía es preciso realizar modelos hidráulicos a escala sobre este tema. Para el presente trabajo se estudió un encauzamiento del río Chiche y se propuso una alternativa utilizando espigones en base a un modelo hidráulico a escala. Este modelo a más de permitirnos entender mejor el funcionamiento de los espigones implicará un beneficio para la clase de hidráulica y todos los futuros ingenieros que podrán disponer del mismo en el laboratorio de hidráulica de la Universidad San Francisco de Quito.

Este proyecto tiene un impacto positivo para la formación de nuevos profesionales en el campo de Ingeniería Civil de la Universidad San Francisco de Quito. La implementación de modelos hidráulicos dentro de un laboratorio hará la clase más didáctica, permitiendo así una mejor formación de futuros profesionales. La complejidad que implica el modelo analítico de fenómenos Hidráulicos rebaza el alcance de los cursos a nivel universitario, pero el entendimiento de este tipo de fenómenos asienta bases sólidas para futuros niveles de formación.

En base al modelo hidráulico se buscó comprender la influencia de la separación de los espigones sobre un alineamiento curvo en el Río Chiche. En dicho modelo se puede variar la distancia que existe entre los espigones para así lograr entender la influencia que tiene la separación a la cual son colocados. La construcción del modelo se llevó a cabo utilizando materiales como: acrílico, madera y acero. El acrílico se utilizó para la elaboración del canal, la madera y el acero se utilizó como soporte del modelo hidráulico. Además para el sistema recirculación del agua se utilizó una bomba con su respectivo tanque y sistema de tubería.

Una vez construido el modelo se procedió a calibrarlo. Después se realizó la experimentación la cual buscaba determinar la distancia óptima a la cual deben ser colocados los espigones en la curva que estaba siendo modelada. Se comparó la distancia obtenida con resultados empíricos y bibliográficos que tuvimos a disposición. Con la información obtenida en base al modelo se propuso una variante al encauzamiento que fue realizado.

2 ESCALAS DEL MODELO.

2.1 ASPECTOS GENERALES

En la actualidad resulta difícil desarrollar un modelo analítico para comprender los fenómenos físicos, el campo de la Ingeniería hidráulica no es la excepción. Cuando se tienen obras de gran tamaño o con una gran repercusión social es importante realizar pequeños modelos físicos para así lograr predecir cuál será el comportamiento de una determinada obra en un cierto medio.

Los modelos reducidos son una solución para determinar el comportamiento de un prototipo ante la dificultad de realizar un modelo matemático. En la Ingeniería Fluvial la dificultad en generar un modelo matemático se halla en el comportamiento poco predecible y variable de un río. Por ejemplo, fenómenos como la turbulencia generan problemas al tratar de hacer un modelo analítico. Aunque los modelos matemáticos hoy en día han tenido un gran desarrollo están estrechamente vinculados con la construcción de modelos físicos. Estas ecuaciones son calibradas de acuerdo a pruebas de laboratorio o datos de campo. Es por ello que la construcción de modelos a escala tendrá gran cabida dentro de las futuras generaciones.

El problema que presenta los modelos reducidos se halla en el tiempo de construcción, disponibilidad de espacio, recursos y disponibilidad de materiales. Sin embargo, un modelo reducido trae consigo un mejor entendimiento del fenómeno, así como, resultados más confiables. Esto puede traer mayor tranquilidad a todos los actores que están envueltos en una obra, diseñadores, constructores y beneficiados.

La creación de modelos hidráulicos es justificable siempre y cuando el proyecto sea de mediana o gran importancia. Los modelos hidráulicos reducidos, aunque son caros, permiten predecir el comportamiento de las obras y así evitar futuras correcciones o reajustes.

Los modelos hidráulicos reducidos están basados en la teoría de la semejanza. Conseguir una semejanza dinámica completa entre el río y el prototipo es imposible, ya que no solo se debe lograr una escala en las propiedades geométricas si no en todas las fuerzas que intervienen en dicho fenómeno. Sin embargo, el entendimiento del problema que se consigue mediante un modelo físico nos permitirá brindar soluciones claras y ajustadas a la realidad. Aunque todas las fuerzas que intervienen en el río no pueden ser reducidas en la misma escala al modelo, la fuerza dominante será la que describirá el comportamiento del prototipo. En la Ingeniería de ríos la fuerza que domina el comportamiento del agua es la gravedad. Cuando esto ocurre se la llama la semejanza de Froude. Esta semejanza es calculada comparando el número de Froude, dicho número deberá ser igual en el modelo y en el campo. Este número nos garantiza que exista la misma proporción entre la fuerza resultante del río y del modelo. Cuando una fuerza menor como la viscosidad o la tensión superficial influye en el modelo se habla de un efecto a escala.

Los modelos fluviales pueden ser de lecho fijo o de fondo móvil. Los de fondo fijo se usan cuando se estudia el comportamiento a corto plazo del río. Los modelos de fondo móvil se los usa cuando el fenómeno de erosión o transporte de sólidos es de suma importancia sobre una estructura. Por otro lado los modelos hidráulicos a escala también pueden dividirse en no distorsionados y distorsionados. En los modelos hidráulicos no distorsionados se ocupa una escala única para todas las dimensiones. Esto origina modelos extremadamente grandes

y costosos. Por otro lado se puede realizar los mismos análisis sobre un modelo con escala distorsionada que son modelos con una diferente escala para cada dimensión. Estos modelos resultan más económicos pero inducen a mayores pérdidas de energía, por lo cual sus resultados serán menos exactos que en un modelo sin distorsión.

2.2 NÚMERO DE FROUDE

El número de Froude es un número adimensional que establece la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas gravitacionales. Este número deberá ser semejante tanto en el modelo como en el prototipo para así lograr una semejanza en el tipo de escurrimiento (Russell, Hidráulica 126).

Ecuación 2-1

$$\frac{F_i}{F_g} = k * \frac{v^2}{g * l}$$

- F_i fuerzas de inercia.
- F_g fuerzas de gravedad.
- v velocidad
- g gravedad
- l cualquier dimensión longitudinal.

El término $\frac{v^2}{g * l}$ es conocido como el número de Froude. Cuando dos escurrimientos poseen el mismo número de Froude se puede decir que los dos escurrimientos son semejantes.

2.3 PRINCIPIO DE SEMEJANZA.

El principio de semejanza es el pilar básico de los modelos reducidos. El principio de semejanza busca que todas las fuerzas que intervienen dentro del canal tengan la misma influencia o causen la misma repercusión. En los modelos es imposible conseguir que todas las fuerzas sean reducidas de tal manera que todas tengan la misma influencia. Sin embargo, tanto en el modelo como en el prototipo existen fuerzas principales que gobiernan el comportamiento. Si logramos replicar estas fuerzas dominantes en el modelo tendremos una buena idea de lo que sucede con el prototipo. La fuerza que domina en la Ingeniería de ríos es la fuerza de la gravedad.

2.3.1 SEMEJANZA DE FROUDE

El principio de semejanza de Froude garantiza que la fuerza gravitacional sea la dominante en el modelo como lo es en el prototipo. Según el autor Martin Vide en su libro Ingeniería Fluvial nos da escalas de velocidad aconsejables para cumplir con el principio de Froude como:

Ecuación 2-2

$$\gamma_v = \gamma^{1/2}$$

$$\gamma_v = \text{escala de la velocidad}$$

$$\gamma = \text{escala geométrica}$$

Los principales modelos de estructuras hidráulicas que son analizados según el principio de semejanza de Froude han sido divididos según Martín Vide en los siguientes grupos:

- Estructuras Hidráulicas que sean de corta extensión con fondo fijo, no erosionable.
- Modelos de ríos de grandes extensiones de un río con fondo fijo
- Modelos de un río extenso con lecho móvil.
- Modelos de obras locales de un río con presencia de un fondo móvil.

2.4 MODELO DISTORSIONADO DE LECHO FIJO

En el libro Ingeniería de Ríos de Martín Vide se dice que los modelos reducidos distorsionados poseen diferentes escalas en sus dimensiones. Se define primero la distorsión de la escala “e” como el cociente de la escala longitudinal y la escala del calado del río. Muchas veces en los modelos hidráulicos queremos lograr calados apreciables porque a cierta escala serían estos muy delgados para ser apreciados. Por lo tanto debemos distorsionar la escala vertical del calado.

Ecuación 2-3

$$e = \frac{\lambda_L}{\lambda_y}$$

- λ_L es la escala longitudinal del río.
- λ_y es la escala del calado del río.

Debido a que en este tipo de modelos se posee diferentes escalas la pendiente del modelo y la del prototipo serán también diferentes. La escala de la pendiente para el prototipo queda definida como:

Ecuación 2-4

$$\lambda_i = 1/e$$

- λ_i es la escala de la pendiente del río.

Debido a esta distorsión entre la escala longitudinal y vertical es evidente que la pendiente del modelo se verá afectada. La pendiente del modelo (i_m) se verá afectada en “e” veces la pendiente del prototipo (i_p) (M. Vide, Ingeniería de Ríos 277).

Ecuación 2-5

$$i_m = \frac{i_p}{\lambda_i} = e * i_p$$

La escala del caudal queda definida como:

Ecuación 2-6

$$\lambda_Q = \lambda_y^{3/2} * \lambda_b$$

- λ_b es la escala del ancho del río.
- λ_Q es la escala del caudal.

La última ecuación presentada por Martín Vide en su libro Ingeniería de Ríos se refiere a la rugosidad. Esta escala está en función de la escala del calado y de la distorsión del modelo “e”.

Ecuación 2-7

$$\lambda_n = \frac{\lambda_y^{1/6}}{\sqrt{e}}$$

- λ_n es la escala del coeficiente de Manning.

Pese a todas las facilidades constructivas que presenta un modelo de escala distorsionada se debe tener mayor cuidado en su calibración. Al haber alterado las escalas pueda que existan pérdidas energéticas localizadas más importantes que en modelos no distorsionados. La calibración del modelo se la realiza en base a información previamente conocida. Para calibrar y lograr que las pérdidas energéticas en el modelo y en el prototipo sean equivalentes. Muchas veces se modifican las rugosidades y las pendientes en el modelo, para así lograr las velocidades esperadas.

3 RÍOS

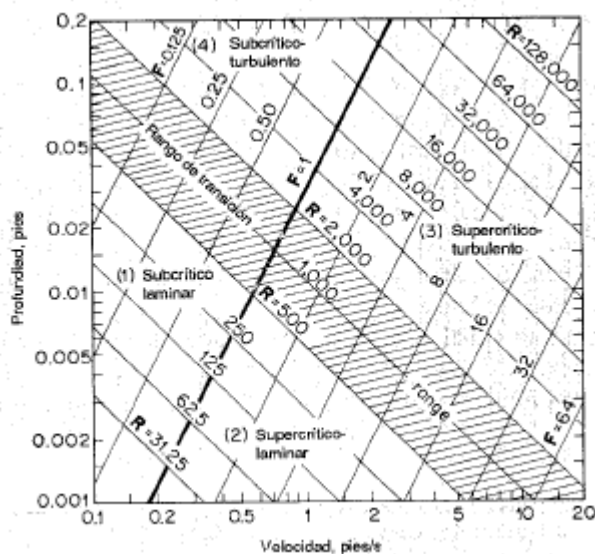
3.1 EL COMPORTAMIENTO DE LOS RÍOS

Los ríos poseen un régimen determinado por la cuenca y las precipitaciones. La escorrentía no es el único factor que influye en el régimen hidráulico. Por ejemplo en ríos de montaña, como en la sierra de nuestro país, el régimen del río es consecuencia del deshielo de los glaciares, además las aguas subterráneas son la explicación de caudal base en los periodos secos.

Otro factor que influencia en el régimen de un río es su pendiente. Se ha clasificado según muchos autores que ríos con pendientes menores al 1,5% se llaman ríos torrenciales, y cuando la pendiente es mayor que el 6% se llaman torrentes. La pendiente determina el tipo de flujo, es decir si este es sub-crítico –laminar, súper-crítico – laminar, súper-crítico-turbulento y sub-crítico - turbulento.

En un canal abierto es posible que se produzca uno de los cuatro regímenes anteriormente mencionados. El efecto producido por la velocidad y la viscosidad delimitará el comportamiento del flujo. Según Ven Te Chow en su libro Hidráulica de canales abiertos menciona que, cuando el número de Froude (F) es menor que la unidad y el número de Reynolds (R) está en el rango laminar se produce un flujo *sub-crítico – laminar*. Un flujo *sub-crítico- turbulento* se produce cuando F es menor que la unidad y R está en el rango turbulento. En el diseño de encausamientos deberemos observar que el número de Froude sea menor que la unidad, por lo tanto uno de los dos regímenes anteriores estará presente en el diseño de canales abiertos. A continuación se presenta una gráfica en donde se puede apreciar la variación de cada uno de estos tipos de regímenes.

Figura 3-1: Relaciones profundidad – velocidad para cuatro regímenes de flujo de canales abiertos. (Chow, Hidráulica de los canales abiertos 14)



3.2 GEOMETRÍA HIDRÁULICA DE UN RÍO

Existen dos tipos de configuraciones posibles de encontrar en la naturaleza, un río puede ser meandriforme o trenzado. Si observamos la configuración geométrica de un río podemos notar que esta es muy compleja, muchas veces estos pueden tener las dos configuraciones a la vez. Muchos investigadores han logrado sacar tan solo relaciones empíricas para clasificar los ríos como la presentada a continuación tomada del libro de Martín Vide:

Ecuación 3-1

$$\text{Si: } iQ^{0.44} > 0.0116 \text{ El río es trenzado}$$

$$\text{Si: } iQ^{0.44} < 0.0116 \text{ El río es meandriforme}$$

- Q es el caudal
- i es la pendiente del cauce

Los ríos con meandros poseen los siguientes parámetros geométricos a considerar:

- B , ancho del río
- A , amplitud del senoide
- λ , Longitud del senoide
- y , calado

Figura 3-2: Parámetros del alineamiento de un río (M. Vide, Ingeniería Fluvial 59)

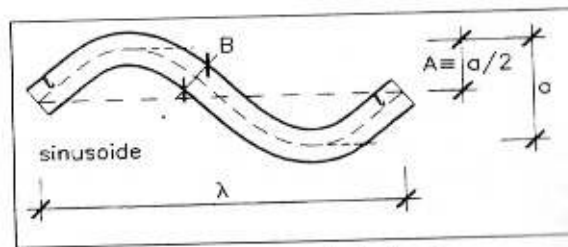


Figura 3.5 Parámetros de una planta sinuosa.

Con estos parámetros se establece la segunda relación empírica. La relación B/y será mayor cuando menor es el contenido de material fino en el cauce del río, se entiende por “ y ” el calado del río. Es decir un río será mucho más profundo con relación a su ancho cuando exista un mayor número de partículas que puedan ser arrastradas.

Los ríos están compuestos por un cauce principal por donde circula el agua la mayor parte del tiempo, y por avenidas, que son lugares de inundación o para caudales con un

periodo de retorno mayor a 7 años. En el presente trabajo propondremos una solución para estabilizar el cauce principal del río

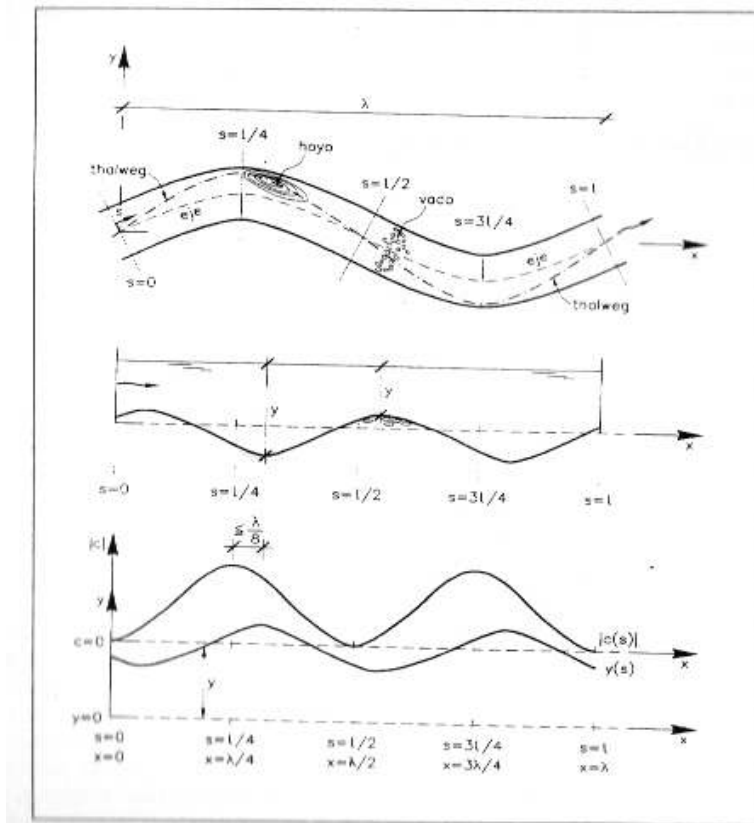
3.3 CAUDAL DOMINANTE

Existen ciertos caudales que marcan la configuración geométrica de un río, y que se los llaman dominantes. Los factores que hacen que un caudal se convierta en dominante es su magnitud y su frecuencia. Los ríos generalmente poseen un cauce y unas llanuras de inundación. El caudal que llega a rebozar el cauce es de suma importancia porque es este el responsable de dar la forma y las dimensiones del mismo. El efecto del desbordamiento no tiene repercusiones apreciables sobre el cauce, si no, este tiende a depositar sedimento en las llanuras haciendo cada vez más improbable un desbordamiento futuro. El caudal que llena el cauce principal tiene la mayor importancia en términos de velocidad y tensión tangencial. Es por ello que el cauce lleno se lo conoce como dominante. Según algunos investigadores el cauce lleno se da con un periodo de retorno de 1,5 a 7 años.

3.4 LEYES DE FRAGUE

Las observaciones de Frague lo condujeron a resumir la existencia de una relación entre la configuración en planta de un río y su calado. El investigador definió el concepto de “thalweg” que consiste ser una línea imaginaria que pasa por los puntos más profundos de una sección. Para establecer esta relación designa como eje “s” a una línea imaginaria que pasa por el punto medio de cada segmento perpendicular a las tangentes comunes de las orillas. La relación que se busca establecer es entre curvatura del alineamiento en función del eje “s” ($c(s)$), y el calado en función del eje “s” ($y(s)$).

Figura 3-3: Relación entre Curvatura y Calado (M. Vide, Ingeniería Fluvial 64)



Ecuación 3-2

$$\frac{dc(s)}{ds} = k * \frac{dy(s)}{ds}$$

- K es una constante de proporcionalidad.

Toda esta teoría se la desarrollo asumiendo que no existe pendiente vertical o es muy pequeña. Es importante señalar que en base a la ecuación diferencial un cambio brusco en la curvatura del río generará un cambio brusco en la profundidad. Como observación podemos

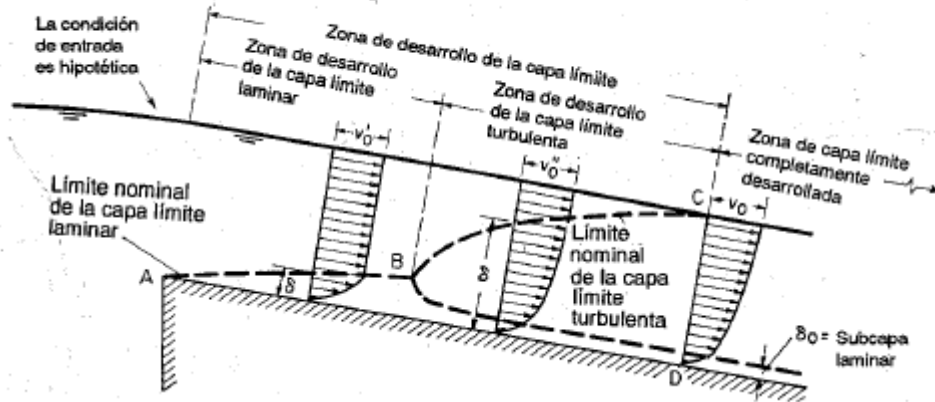
señalar que cuando encaucemos un río deberemos proyectar curvas suaves las cuales varíen gradualmente su curvatura.

3.5 FLUJO UNIFORME.

Un flujo uniforme es aquel en el que la profundidad, área mojada, velocidad y el caudal de la sección son constantes y la línea de energía, la superficie del agua y el fondo del canal son paralelos. En el cálculo de encausamientos de ríos se asumirá que existe una condición de flujo uniforme. Esto se lo hace debido a que facilita en gran manera los cálculos. El flujo cuando viaja encuentra resistencia debido a la superficie del canal, esta es contrarrestada por la fuerza de la gravedad que actúa sobre el agua en la dirección en la que se mueve. El flujo uniforme no puede ocurrir a velocidades muy altas. Esto ocurre debido a que el flujo al alcanzar velocidades muy altas se vuelve inestable, ya que el fluido a altas velocidades puede atrapar aire.

Un río al igual que en los canales artificiales pierde energía debido a la fricción. La fricción está en función del material del cual está compuesto el cauce. Es por ello que la velocidad del flujo varía con respecto a la profundidad. La teoría nos dice que existe una capa límite dentro del flujo sobre la cual la velocidad no depende de la profundidad, pero bajo esta la velocidad si depende de la profundidad. En la siguiente gráfica tomada del libro de Ven Te Chow podemos apreciar lo mencionado.

Figura 3-4 Desarrollo de la capa limite (Chow, Hidráulica de los canales abiertos 190)



En el gráfico podemos ver que bajo la línea ABC la velocidad del flujo depende de la distancia al borde. Por arriba de la misma se puede observar que la velocidad no depende de la profundidad.

3.5.1 ECUACIÓN DE MANNING.

La ecuación de Manning o también conocida como la ecuación de Strickler fue presentada en 1889 por el ingeniero Robert Manning. Esta fórmula ha tenido una gran aceptación dentro de las prácticas ingenieriles. Esta ecuación describe la velocidad media para un flujo turbulento rugoso.

Ecuación 3-3: Ecuación de Manning

$$V = \frac{K_n}{n} * R^{2/3} * S_f^{1/2}$$

- k_n es una constante que para unidades del Sistema Internacional vale $1.0 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$.
- El radio hidráulico está denotado en la fórmula como R .
- S_f es la pendiente de la línea de energía. Para nuestros cálculos supondremos que la pendiente de la línea de energía será igual a la del fondo del cauce.

- La rugosidad esta denotada como “n”.

El factor “n” fricción es el coeficiente de Manning y este representa la influencia que tiene la superficie del cauce sobre la velocidad media. El Autor Ven Te Chow en su libro muestra coeficientes de Manning recomendados para cada tipo de canal según sea el material del cual está conformado. Un río al igual que los canales artificiales poseerán un coeficiente de Manning según sea la superficie de la está conformado. Para modelar un río se deberá tener la precaución de hacer una distinción de diferentes rugosidades para diferentes zonas del cauce. Esto se debe a que muchas veces los ríos presentan un cauce y una llanura de inundación conformadas de diferente material por donde puede circular el agua. A continuación se muestra una tabla tomada del libro de Akan, aquí se indica los valores de rugosidad que pueden ser empleados en el caso de cauces naturales o artificiales según sea el tipo de suelo.

Tabla 3-1 Rugosidades de Manning según el material que conforma el cauce (Akan 61).

Bed material and condition	Depth (ft)	d_{50} (mm)	n
Sand and clay	6.3		0.030
Sand and gravel	3.5		0.032
Smooth cobbles, 4 to 10 inch diameter	1.8		0.032
Gravel and boulders	4.7	172	0.036
Gravel and small cobbles	3.9		0.037
Boulders	11.1	162	0.037
Sand and gravel with several fallen trees in the reach	9.0		0.039
Sand, gravel and few rock outcrops	8.7		0.041
Boulders	8.4	142	0.041
Sand and silt	9.0		0.043
Sand and gravel	4.2		0.045
Rock and boulders	7.9	250	0.051
Angular shaped boulders as large as 1 ft in diameter	1.5		0.057
Coarse sand and a few outcrops	4.9		0.059
Boulders	3.1	220	0.075

3.5.2 SELECCIÓN DE LA RUGOSIDAD DE MANNING.

Comúnmente se tiende a suponer que un canal tiene un único valor de rugosidad. Existen múltiples factores que afectan a la selección del un coeficiente de rugosidad. Es por ello que debemos tener una idea básica para así lograr escoger un número acertado. De acuerdo con el libro de Canales Abiertos de Ven Te Chow dice que para la selección del coeficiente de rugosidad debemos tomar en cuenta los siguientes parámetros:

- a) Rugosidad Superficial: Se refiere a la resistencia que oponen las partículas. Se puede decir que partículas con un diámetro mayor de grano poseen rugosidades mayores.
- b) Vegetación: En las llanuras de inundación la vegetación ejerce una fuerza de resistencia retardando así el flujo.

c) Irregularidades del Canal: Las irregularidades del canal quiere decir cambios bruscos de sección del canal, tamaño y forma.

d) Curvatura: Las curvas con radios grandes generaran valores pequeños de “n”, por el contrario ríos con meandros presentan valores altos de “n”.

e) Sedimentación y Socavación: La sedimentación puede transformar un canal irregular y hacerlo uniforme haciendo que el valor de “n” disminuya. Por el contrario la socavación puede generar un canal aun más irregular haciendo que el valor de “n” aumente.

f) Obstrucción: La presencia de troncos, pilas de puentes, espigones u otras estructuras parecidas aumentan el valor de n.

g) Nivel y Caudal: El coeficiente de rugosidad “n” disminuye cuando el calado aumenta.

A partir de todas estas consideraciones se desarrollo un proceso para estimar el valor de “n”. El procedimiento de Cowan toma en cuenta los siguientes factores: el material, irregularidades, variación de la sección, obstrucciones, vegetación y alineamiento. El investigador señala que el valor de “n” puede calcularse utilizando la siguiente expresión:

Ecuación 3-4

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) * m_5$$

Para el cálculo del coeficiente de Manning “n” utilizando la formula anterior debemos referirnos a la siguiente tabla.

Tabla 3-2: Valores para el cálculo del coeficiente de rugosidad utilizando la Ecuación 3-4.

Condiciones del canal		Valores	
Material involucrado	Tierra	n_0	0.020
	Corte en roca		0.025
	Grava fina		0.024
	Grava gruesa		0.028
Grado de irregularidad	Suave	n_1	0.000
	Menor		0.005
	Moderado		0.010
Variaciones de la sección transversal	Severo	n_2	0.020
	Gradual		0.000
	Ocasionalmente alternante		0.005
Efecio relativo de las obstrucciones	Frecuentemente alternante	n_3	0.010-0.015
	Insignificante		0.000
	Menor		0.010-0.015
	Apreciable		0.020-0.030
Vegetación	Severo	n_4	0.040-0.060
	Baja		0.005-0.010
	Media		0.010-0.025
	Alta		0.025-0.050
Grado de los efectos por meandros	Muy alta	m_5	0.050-0.100
	Menor		1.000
	Apreciable		1.150
	Severo		1.300

3.6 CARACTERÍSTICAS DEL CAUCE DE UN RÍO.

3.6.1 GRANULOMETRÍA.

El material que conforma el cauce del río puede ser granular o cohesivo. Los ríos aluviales están formados por materiales provenientes de su pasado geológico y por lo tanto su lecho suele ser granular. Por otro lado, existen ríos que tienen su cauce inscrito dentro de un contorno fijo de roca por lo que su cauce no puede cambiar. Esto se debe a que en este tipo de ríos el proceso erosivo es muy lento.

El objetivo de la granulometría es estudiar el esfuerzo cortante que las estas son capaces de soportar. De múltiples estudios se ha podido determinar que la densidad de las partículas que conforman el cauce de diferentes ríos es muy parecida, para la mayoría la densidad es

de $2,63 \text{ T/m}^3$ ($\gamma_s=2,63 \text{ T/m}^3$). Ya que el peso de los materiales que conforman el cauce es muy similar el tamaño de las partículas se vuelve un aspecto importante a analizar. La manera más fácil para establecer el tamaño de las partículas es realizando una granulometría.

3.6.2 TÉCNICAS DE MUESTREO.

Existen varias técnicas para tomar muestras en el campo y determinar la granulometría. A continuación señalaremos algunas técnicas de muestreo.

1. Muestreo volumétrico: Esta técnica consiste en extraer un poco de material del cauce para así poderlo tamizar. Generalmente la porción de material que se extrae es sub-superficial ya que este es de menor tamaño. El volumen que se tome debe ser representativo y por ello se recomienda que la mayor partícula no sobrepase el 1% del peso total de la muestra.

2. Muestreo superficial: Se lo usa para determinar granulometría de la coraza o material superficial de gran tamaño. Esta granulometría es utilizada para determinar el umbral de movimiento de las partículas en aguas bajas o medias. El método consiste en marcar con pintura o con algún otro material las partículas del suelo y tan solo recoger las partículas que se encuentren marcadas.

3. Método del conteo superficial: Consiste en un conteo de todas las partículas que se encuentran a una distancia regular. Por ejemplo en este método es posible utilizar pasos, se pueden contar todas las partículas que se tocan con la punta del zapato. El problema de determinar la distribución granulométrica utilizando este método se halla en que se pierde material con diámetros menores a 8 mm. Esto puede repercutir en determinar las fuerzas tractivas admisibles del suelo. Si existen muchas partículas pequeñas el diámetro medio real

será menor al calculado por lo que se admitirá una fuerza tractiva mayor a la que realmente el suelo puede soportar.

4 ENCAUZAMIENTO

4.1 TRAZADO EN PLANTA

En el presente apartado se revisan las pautas para el trazado del alineamiento de un encauzamiento. Para el trazado del alineamiento es posible utilizar varias metodologías propuestas por varios autores, todas ellas tan solo buscan lograr transiciones suaves de curvatura en las curvas de los un alineamiento

4.1.1 CONSIDERACIONES

El encauzamiento del río se refiere a toda intervención realizada en una parte del cauce del río. Los objetivos que se llevan a intervenir un río son: la protección frente a las inundaciones, protección de los márgenes del río, mejorar condiciones de desagüe, mejorar las condiciones de navegabilidad y recuperar espacios naturales en el río. Debemos siempre tener en cuenta que un encauzamiento es una alteración del medio y por lo tanto deberá ser realizada teniendo en cuenta las repercusiones a crearse aguas abajo.

Los ríos son sistemas muy sensibles capaces de responder de diversas maneras a los cambios. Estos se pueden adaptar a las nuevas condiciones debido a que los cauces no son estables. Los encauzamientos tienden a recortar la distancia sobre la cual el flujo viaja y por lo tanto a aumentar la pendiente, como consecuencia la velocidad del flujo aumentará. Si la velocidad es muy elevada el río empezará a erosionar el cauce en busca de estabilidad y por lo tanto aumentará el transporte de sólidos aguas abajo, pudiendo así crear problemas de sedimentación en zonas más alejadas al proyecto. Es por ello que cualquier intervención que quiera realizarse no deberá ser tan brusca y dramática. Por ejemplo si se tiene un río con

muchos meandros no se buscará realizar un encausamiento haciendo un alineamiento recto que rompa estos meandros. Por el contrario se buscará mantener una configuración parecida pero con curvas no tan bruscas y pronunciadas. De esta manera nosotros como ingenieros no ocasionaremos futuros problemas aguas abajo.

Figura 4-1: Corte de un meandro en forma natural. (M. Vide, Ingeniería Fluvial 58)



En la grafica anterior podemos ver que la tendencia natural a cortar un meandro es suavizando paulatinamente las curvas. Por lo tanto al realizar el trazado en planta de un encausamiento deberemos buscar que la nueva alineación conserve ciertas características del meandro.

4.1.2 TRAZADO DEL CAUCE PRINCIPAL

El trazado de un encauzamiento deberá comprender dos etapas el trazado del cauce principal y el de las avenidas. Como principal observación debemos señalar que para el trazado en planta se prefieren geometrías curvas antes que rectas, ya que las rectas tienden a aumentar mucho la pendiente y aumentan las velocidades. También es importante señalar que se busca cambios paulatinos de curvatura.

Para empezar el trazado en planta debemos tener en cuenta que la curva que debemos trazar tiene que presentar cambios graduales de curvatura. Según la ley de Frague los cambios bruscos de curvatura provocaran cambios bruscos en el calado del río, pudiendo ser

esto un grave problema erosivo que traerá problemas aguas abajo por el transporte de sólidos. Por ejemplo, no se deberá utilizar arcos circulares ni rectas para el nuevo trazado ya que existe un cambio brusco en la curvatura.

No se debe exagerar la importancia de determinar las curvas, solo basta con recordar que se debe trazar una curva que cambie paulatinamente su curvatura. Curvas como clotoides, senos o cuadráticas cumplen bien esta misión. Martín Vide recomienda utilizar una curva seno por la semejanza con los meandros naturales.

Ecuación 4-1

$$y = A * \text{sen} \left(\frac{2\pi * x}{\lambda} \right)$$

- y, la coordenada “y” en planta.
- A, amplitud del senoide.
- λ , el periodo del senoide.

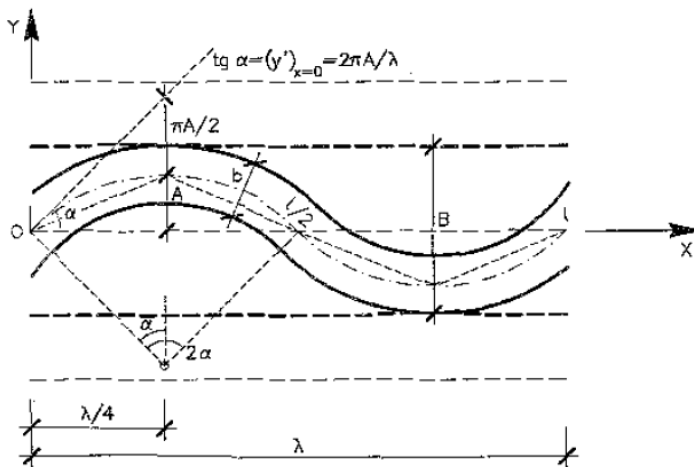
La amplitud, A, se la calcula de la siguiente manera:

Ecuación 4-2

$$A = \frac{(B - b)}{2}$$

- B es el ancho por donde el cauce puede divagar.
- b es el ancho del cauce.

Figura 4-2: Gráficos de los elementos a considerar encauzar un río entre dos límites paralelos



Fargue en sus estudios concluyó que es recomendable hacer que la longitud de curva ($L/2$) sea del orden de ocho veces la anchura b . Otros autores recomiendan que el radio de curvatura sea de cinco a ocho veces el ancho del río.

Es importante observar que si el cauce del río es de un fondo fijo se pierde el interés por realizar un trazo sinuoso. Se busca una sinuosidad cuando el fondo puede ser erosionable así como los márgenes. Además un río con meandros posee ciertos lugares en donde el agua permanece quieta, siendo propicios como hábitat para muchos animales.

La necesidad de encausar los ríos torrenciales y torrentes parte de la capacidad que estos tienen para erosionar el fondo y las orillas. Esto en un futuro ocasiona problemas como inestabilidad de las laderas. En torrentes pequeños es posible construir pequeños diques (presas) que buscan, retener los sólidos transportados impidiendo que abandonen la cuenca y reducen la pendiente al producir una sedimentación en el fondo.

4.2 DISEÑO LA SECCIÓN TRANSVERSAL

4.2.1 ASPECTOS GENERALES

La selección de un alineamiento horizontal es el primer paso del diseño de encauzamiento, después de ello se procede al diseño de la sección transversal. Las secciones más típicas a utilizarse son las trapezoidales aunque estas pueden ser de cualquier forma. Las primeras consideraciones que debemos tener es que la sección tenga la capacidad para soportar un determinado caudal. Pero existen también otros factores, como los materiales, para poder determinar la forma de la sección que vamos a utilizar.

En el diseño de las secciones transversales debemos tomar en cuenta la pendiente lateral. Una pendiente lateral muy pronunciada ocasionará erosión de las márgenes, mientras que si esta pendiente es muy baja incurriremos en un costo muy alto de la obra. En el libro “Open Chanel Hydraulic” de Osman Akan contiene una tabla de pendientes laterales recomendadas, está tabla tan solo consiste ser una recopilación de los hallazgos de varios investigadores como Chow (1959), Chaudhry (1993), Bankston y Baker (1995).

Tabla 4-1: Pendientes laterales recomendadas para los canales (Akan 158)

Material	Side slope, m (run to rise ratio)
Rock	0-0.25
Earth with concrete lining	0.50
Stiff clay or earth	1.0
Soft clay	1.5
Loose sandy soil	2.0
Light sand, sandy loam	3.0

Los valores de “ m ” mostrados en la tabla quieren decir que cuando $m=0.25$ la pendiente será 0.25 horizontal y 1 vertical.

La mayoría de diseños de canales se lo hace considerando un flujo sub-crítico, debido a que esta es la condición más estable. Cuando el número de Froude es cercano 1 el flujo se encuentra en un estado transitorio de sub-crítico a súper-crítico.

La velocidad del flujo bajo la cual se diseñará el canal podrá variar según sea el material que se emplee para la conformación del cauce. Generalmente en la conformación de canales podemos utilizar dos tipos de revestimientos: rígidos y flexibles. El recubrimiento rígido tiene una mayor resistencia al corte. Por lo tanto estas secciones serán menos erosionables. El problema que presentan los revestimientos rígidos es que estos cauces no pueden ajustarse al dinamismo del río, además la falla de este tipo de recubrimiento lleva a la falla de toda la estructura. Entre los tipos más comunes de encausamientos rígidos tenemos los de concreto fundido a pie de obra y prefabricado. Los cauces flexibles se ajustan fácilmente al dinamismo del río por lo que son menos susceptibles a fallas. La resistencia al corte que presentan depende altamente del material del cual están recubierto el cauce. Los recubrimientos flexibles pueden ser piedra de río, piedra recubierta por una malla de acero o el suelo natural del canal o río. También existen recubrimientos temporales que son usados para proteger el margen del río hasta que crezca algún tipo de vegetación o para obras de encauzamiento temporales.

En el diseño de encauzamientos debemos dejar un borde libre, por fines prácticos, entre el tope del canal y el nivel de agua de diseño. Este espacio libre debe ser dejado para ciertos imprevistos temporales que no fueron contemplados en el diseño. No existe una ecuación exacta que nos diga que altura debe tener este espacio libre. La “US Bureau of Reclamation (Chow, 1959)” recomienda usar la siguiente expresión para canales curvos:

Ecuación 4-3

$$F = \sqrt{C * y}$$

- “F” es el borde libre
- “C” es un coeficiente que en unidades métricas oscila entre 0.5 m para un caudal de 0.6 m³/s a 0.76 m para un caudal de 0.85 m³/s o más
- “y” es el calado en metros.

4.3 MÉTODOS DE DISEÑO

Para el diseño de canales existen dos métodos de diseño: el método de la máxima velocidad permisible y el método de la máxima fuerza tractiva. Estos métodos buscan que el fondo del cauce no sufra erosión y que no cambie con el tiempo.

4.3.1 MÉTODO DE LA VELOCIDAD MÁXIMA

El método de la velocidad máxima busca establecer una velocidad bajo la cual el canal no se erosionará. Por lo tanto la velocidad promedio de la sección transversal permanecerá bajo la permisible. La magnitud de esta velocidad máxima depende del tipo de material bajo el cual el canal sea escavado. El “US Army Corps of Engineers” ha tabulado ciertas velocidades recomendadas según sea el material. Estos valores deberán ser reducidos en un 13% para canales moderadamente sinuosos y 22% para canales muy sinuosos. También existen

recomendaciones de incrementar la velocidad recomendada en 0.15 m/s si la profundidad del calado es superior a 1 metro.

Tabla 4-2: Velocidades recomendadas (Akan 161)

TABLE 5.2 Suggested maximum permissible channel velocities (adapted from US Army Corps of Engineers, 1991)

Channel material	V_{MAX} (fps)	V_{MAX} (m/s)
Fine sand	2.0	0.6
Coarse sand	4.0	1.2
Fine gravel*	6.0	1.8
Sandy silt	2.0	0.6
Silt clay	3.5	1.0
Clay	6.0	1.8
Bermuda grass on sandy silt**	6.0	1.8
Bermuda grass on silt clay**	8.0	2.4
Kentucky bluegrass on sandy silt**	5.0	1.5
Kentucky bluegrass on silt clay**	7.0	2.1
Sedimentary rock	10.0	3.0
Soft sandstone	8.0	2.4
Soft shale	3.5	1.0
Igneous or hard metamorphic rock	20.0	6.0

*Applies to particles with d_{50} less than 0.75 in (20 mm).

**Velocities should be kept less than 5.0 fps (1.5 m/s) unless good cover and proper maintenance can be obtained. Slopes should be less than 5%.

El problema de diseño que vamos a enfrentar en el desarrollo de esta tesis presenta como variables conocidas el caudal, la pendiente del canal y el material. Por lo tanto el procedimiento para dimensionar el canal será el siguiente:

1. Determinar el coeficiente de rugosidad de Manning “n”, la pendiente lateral máxima del cauce “m” y la velocidad máxima.
2. Determinar el radio hidráulico utilizando la formula de Manning.

Ecuación 4-4

$$R = \left(\frac{n * Vmax}{k_n * \sqrt{S_f}} \right)^{3/2}$$

De donde k_n es igual a $1.0 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ para el sistema métrico.

3. Determinar el área hidráulica necesaria $A=Q/V_{MAX}$
4. Determinar el perímetro mojado $P=A/R$
5. Sabiendo el área y el perímetro determinar la sección más apropiada.
6. Comprobar el número de Froude para determinar que esto esté cerca del valor crítico
- 1.
7. Añadir una sobre elevación en la sección.

4.3.2 MÉTODO DE LA FUERZA TRACTIVA

En este método se consideran las fuerzas que actúan en las partículas de suelo del fondo y de las paredes del cauce. El fluido en el canal ejerce fuerzas de corte en el fondo y en las paredes del cauce. Esta fuerza tiende a desplazar las partículas, y por lo tanto, erosiona el cauce. Es por esto que la fuerza de corte ejercida por el fluido no debe exceder a las fuerzas resistentes que impiden el movimiento de las partículas.

El fluido cuando se mueve dentro de un canal ejerce fuerza sobre las partículas, pero en las paredes del canal a más de esta fuerza existe la de la gravedad que hace que las partículas tiendan a rodar hacia el fondo del mismo. Es por ello que la fuerza que tiende a mover las partículas es la resultante de la acción combinada de las fuerzas de corte y de las fuerzas de gravedad. La importancia de la fuerza desestabilizadora de la gravedad dependerá del material del cauce, para suelos cohesivos las fuerzas gravitacionales no son tan importantes que como para suelos no cohesivos.

La fuerza tractiva presente en las paredes del canal y en el fondo del canal pueden ser calculadas utilizando las siguientes expresiones encontradas en el libro “Open Chanel Hydraulics” de Akan.

Ecuación 4-5

$$\tau_b = k_b * \gamma * y * S_0$$

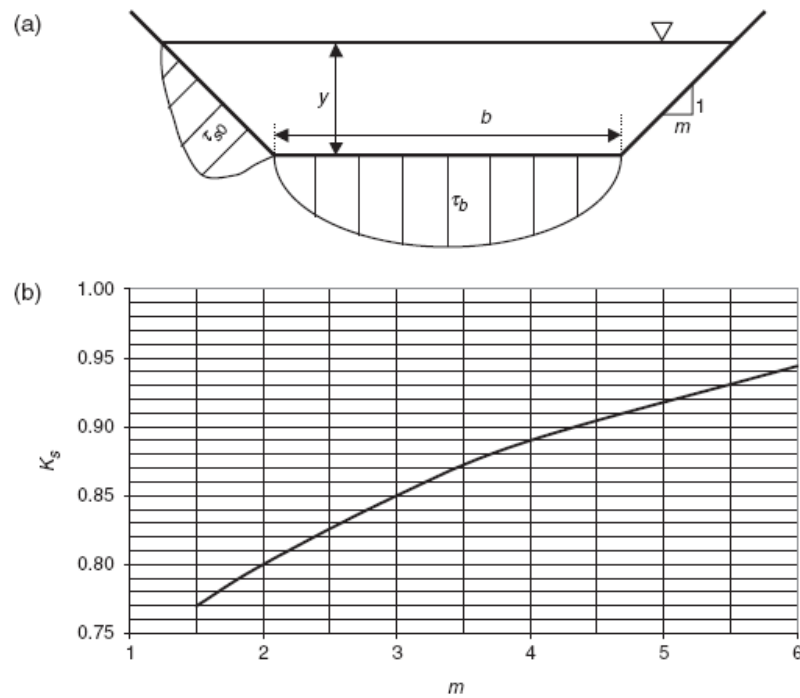
- τ_b es la fuerza tractiva en el fondo del canal.
- k_b es un valor que depende de la pendiente lateral del cauce y de la relación entre el ancho del fondo y el calado. Por simplicidad este valor se lo tomará como 1.
- γ peso especifico del agua.
- y es el calado
- S_0 es la pendiente del fondo del canal.

Ecuación 4-6

$$\tau_{s0} = k_s * \gamma * y * S_0$$

- τ_{s0} es la fuerza tractiva en las paredes del cauce sin tomar en cuenta la acción de la gravedad
- k_s es un valor que depende de la pendiente lateral del cauce y de la relación entre el ancho del fondo y el calado. Los valore de K_s pueden ser obtenidos de la siguiente figura:

Figura 4-3 (Akan 164)



La ecuación anterior tan solo representa la acción del flujo sobre las partículas de las paredes del cauce. Pero esta ecuación aun no toma en cuenta los efectos de la gravedad. Para ello Akan en su libro propone una expresión para tomar en cuenta este efecto. Esta ecuación fue presentada por Chow en 1959.

Ecuación 4-7

$$\tau_s = \frac{\tau_{s0}}{K}$$

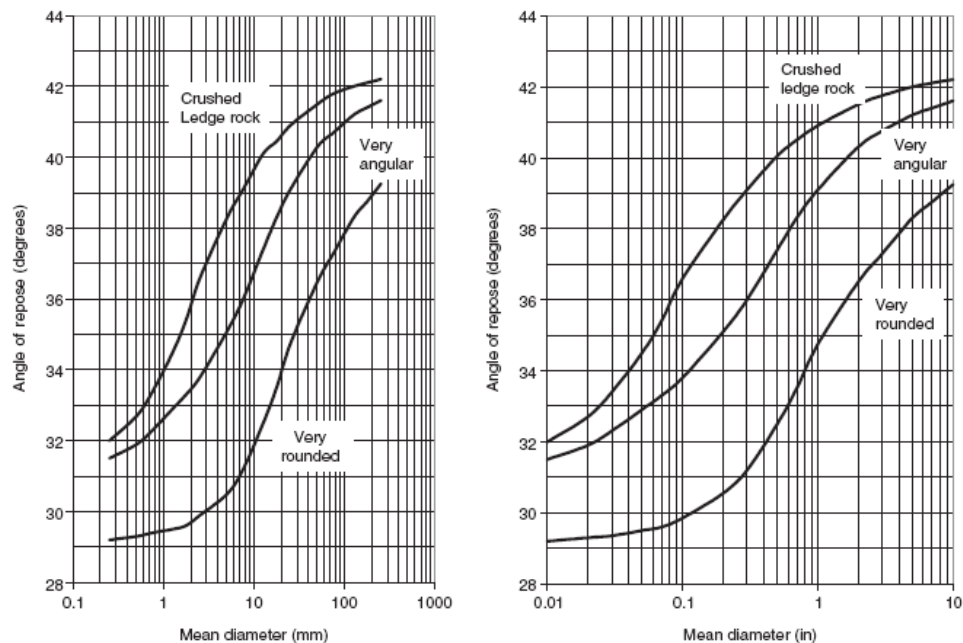
De donde el valor de K se lo puede hallar con la siguiente expresión:

Ecuación 4-8

$$K = \sqrt{1 - \frac{1}{(1 + m^2) * \sin^2(\alpha_R)}}$$

- m es la pendiente lateral.
- α_R es el ángulo de reposo para partículas sin cohesión que forman el cauce del río.

Figura 4-4: Ángulo de de reposo de los suelos no cohesivos según el diámetro de las partículas (Akan 165)

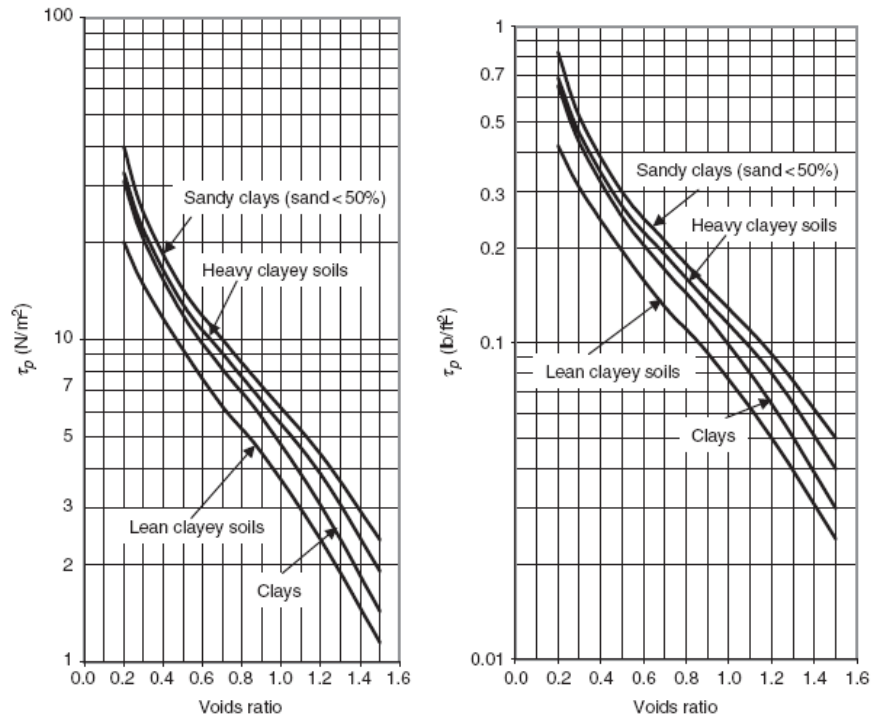


La tabla anterior fue realizada por Simon y Aberson y fue publicada por la ASCE. Esta tabla es de gran utilidad para estimar el ángulo de fricción interna cuando se conoce la granulometría. Para utilizar esta tabla debemos tener en cuenta que solo sirve para suelos no cohesivos. Para cualquier tipo de proyecto será de suma importancia realizar una granulometría.

Las ecuaciones expuestas anteriormente en el presente capítulo son para determinar las fuerzas desestabilizadoras de las partículas. Por otro lado muchos investigadores realizaron muchos experimentos para determinar el esfuerzo que es capaz de soportar un determinado tipo de suelo. Por la gran variedad de tipos de suelo existen múltiples tabulaciones que fueron realizadas en las cinco últimas décadas.

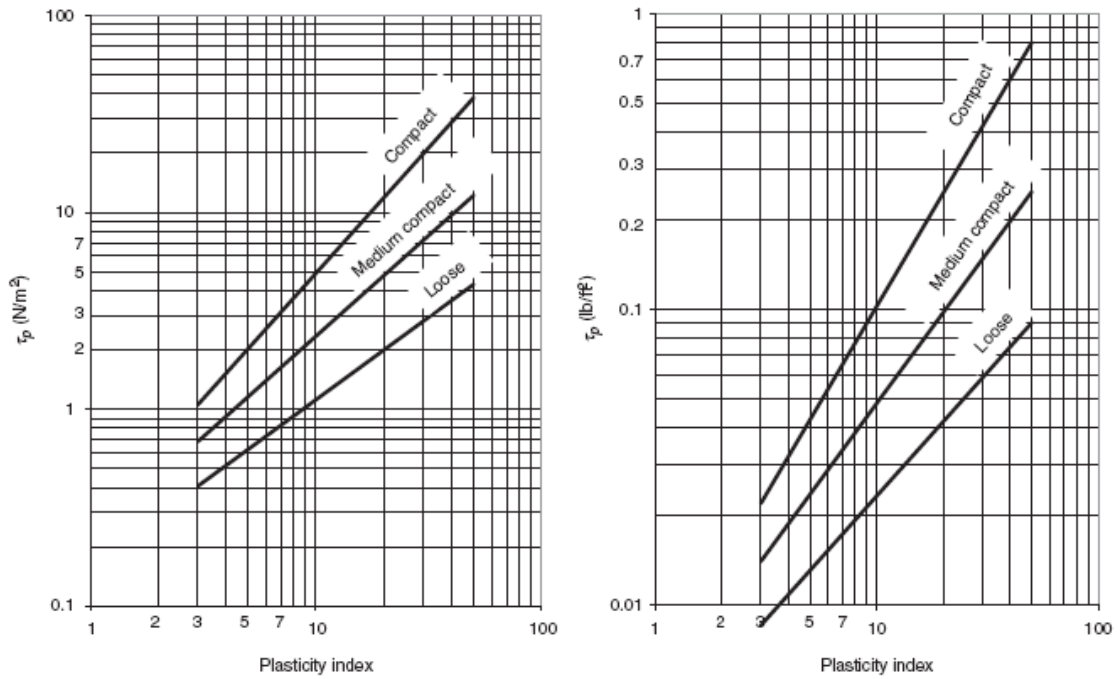
Las figuras expuestas a continuación presentan los esfuerzos tractivos o cortantes permisibles incluyendo la fuerza desestabilizadora de la gravedad para diversos tipos de suelo. Los esfuerzos estabilizadores son denotados con el símbolo τ_p . Los esfuerzos que el flujo induce sobre las partículas no deberá superar este valor.

Figura 4-5 La figura muestra la fuerza desestabilizadora permisible para suelos cohesivos según la relación de vacíos (Akan 166)



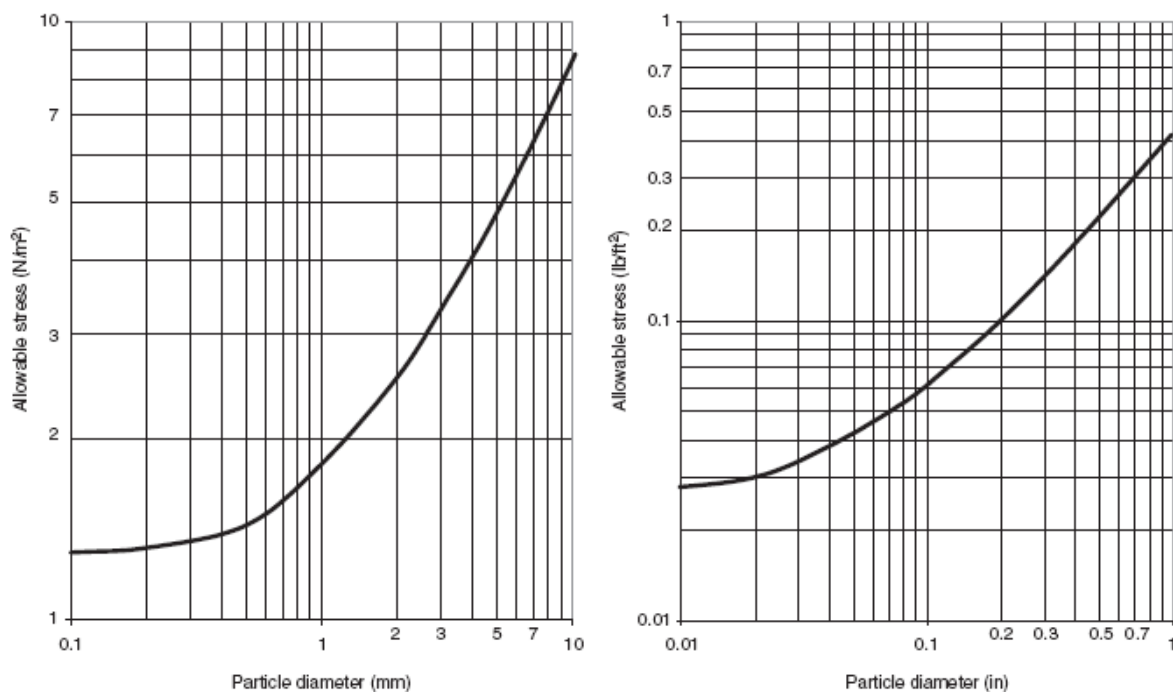
Esta figura fue realizada de acuerdo a los datos experimentales obtenidos por Chow en 1959.

Figura 4-6 Fuerza desestabilizadora permisible para suelos cohesivos en función del índice plástico (Akan 166).



La gráfica fue realizada en base a los datos experimentales de Chen y Cotton en 1988.

Figura 4-7 Fuerza desestabilizadora permisible para suelos no cohesivos en función del diámetro de la partícula (Akan 198)



La gráfica fue realizada con datos experimentales obtenidos por Chen y Cotton en 1988.

Todos estos datos experimentales fueron obtenidos para canales con alineamiento recto. Los canales con alineamientos curvos poseen otro tipo de comportamiento, en la parte exterior de las curvas presentan una mayor velocidad por lo que existirá una tendencia mayor a erosionar. Debido a este fenómeno, las zonas exteriores a la curva estarán más propensas a la erosión y por lo tanto el esfuerzo desestabilizador permisible deberá ser menor que en un canal recto. Para ello se tiene un coeficiente llamado C_p , el cual busca disminuir el esfuerzo permisible, según sea el alineamiento de dicho canal. A continuación se presentan valores de C_p encontrados en el libro de Akan.

Tabla 4-3 Valores de C_p de acuerdo al alineamiento del canal.

Grado de Sinuosidad	C_p
---------------------	-------

Recto	1
Poco Sinuoso	0 .9
Moderado	0 .75
Muy sinuoso	0 .6

Por lo tanto resulta obvio que la sección del canal deberá cumplir con la siguiente desigualdad:

Ecuación 4-9

$$k_b * \gamma * y * S_0 < C_p * \tau_p$$

De aquí también podemos deducir que para un determinado material el calado máximo que podemos tener será:

Ecuación 4-10

$$y_{max} = \frac{C_p * \tau_p}{k_b * \gamma * S_0}$$

De la misma manera que se hizo para deducir la expresión para el calado máximo en el fondo del río podemos ocupar para deducir una expresión para los lados del canal.

Ecuación 4-11

$$\frac{k_s * \gamma * y * S_0}{K} < C_p * \tau_p$$

$$y_{max} = \frac{K * C_p * \tau_p}{k_s * \gamma * S_0}$$

De acuerdo con Akan recomienda seguir los siguientes pasos para realizar el diseño de la sección empleando el método de la fuerza tractiva permisible.

1. Determinar la rugosidad de Manning (n), y los valores del esfuerzo permisible τ_p tabulados en el presente capítulo, la pendiente lateral máxima m y el coeficiente de reducción del esfuerzo permisible debido a la sinuosidad del canal (C_p)

2. Calcular el valor de y_{\max} y seleccionar una sección adecuada acorde al calado máximo calculado.

3. Calcular el número de Freude y verificar que el valor no esté cerca 1.

4. Determinar el valor de K_s y revisar la estabilidad de las paredes del canal comparando τ_p con τ_s ($\tau_s < C_p * \tau_p$)

5. Determinar el borde libre.

5 DEFENSAS FLUVIALES

5.1 INTRODUCCIÓN

Las defensas fluviales realizadas con espigones han sido ampliamente utilizadas en diferentes partes del mundo. Su accionar principalmente está enfocado en la corrección de problemas fluviales y marítimos. En la Figura 5-1 podemos ver el uso de espigones para controlar la erosión del margen izquierdo del cauce. Los espigones aquí al igual que en Río Chiche son utilizados para controlar un problema de socavación. Los ríos aluviales tienen un lecho que está conformado por material sin cohesión el cual puede ser transportado por la corriente cuando ocurre una variación en los caudales. Como vimos en los capítulos anteriores la fuerza tractiva es directamente proporcional con la profundidad del río. Es por ello que se puede decir que todos los ríos aluviales son sumamente dinámicos debido a su gran facilidad para el cambio.

Figura 5-1 (Alfredobi Web)



Los cambios que sufren este tipo de ríos pueden ser de diferentes magnitudes; estos pueden ser muy pequeños o incluso muy severos, estos pueden darse en cuestión de días o en años, todo depende de la vulnerabilidad de la sección. Un río aluvial es estable cuando adquiere un ancho, tirante y una pendiente definida como resultado del caudal sólido y líquido. El mecanismo bajo el cual el río modifica sus características se denomina “Autoajuste”. Estos mecanismos de autoajuste se denominan también grados de libertad.

Los grados de libertad de un río son las posibles variaciones que puede tener este ante la modificación de una variable. Por ejemplo el primer grado de libertad consiste ser un río de fondo fijo, con rugosidades y pendientes dadas. Para este río la única forma de comportarse ante una variación del caudal es subir o bajar el nivel de agua (tirante). El segundo grado de libertad corresponde a un canal parecido al anterior pero con un fondo constituido por material granular. Este tipo de canales pueden transportar caudal sólido y debido a ello estos pueden adoptar su propio tirante o su propia pendiente. El tercer grado de libertad corresponde a aquellos canales que pueden adquirir su propio ancho, tirante y pendiente. Por último existe un cuarto grado de libertad el cual implica que un río no puede conservar su alineamiento. Es decir se forman meandros o se pueden formar un sin número de ramificaciones formando un abanico fluvial.

5.2 CONCEPTO

El hombre en su afán por aprovechar de mejor manera los ríos, desde tiempos muy antiguos se ha ingeniado numerosos sistemas de aprovechamiento de los ríos. Por ejemplo en el río Rin la intervención del hombre en numerosas ocasiones ha permitido obtener beneficios hasta tiempos actuales y hoy en día existen asentamientos humanos y fabricas a

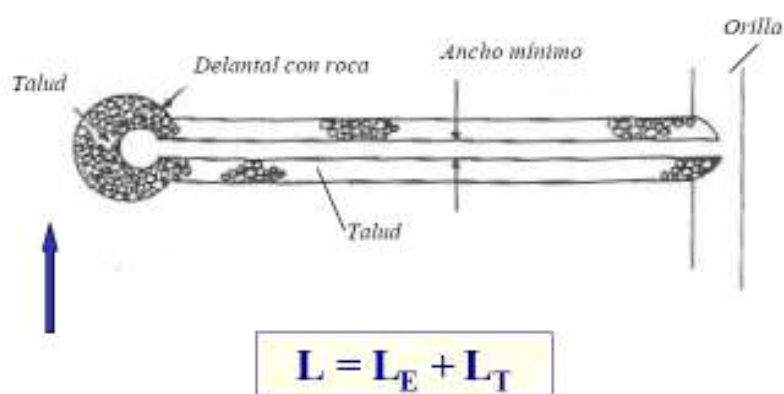
orilla de este río estable. Por otro lado la realidad en el Ecuador es que estamos rodeados por ríos jóvenes, los cuales tiene un comportamiento dinámico. Como consecuencia en el país se tienen muchos problemas aun si solución debido a la movilidad y a la inestabilidad fluvial.

La intervención que el hombre pueda realizar dentro de un río se encuentra motivada en su deseo por estabilizarlo. Dentro de cada país se utilizan diferentes métodos de estabilización de los ríos, respondiendo básicamente a necesidades económicas y técnicas. Las protecciones fluviales suelen ser de dos tipos continuas o discontinuas. Las protecciones continuas pueden ser muros de tierra con taludes protegidos, tablestacados, muros de concreto entre otros. Para este tipo de protección el reto más importante es definir una profundidad de cimentación dependiendo de la profundidad de erosión que pueda alcanzar el río. Las protecciones discontinuas son elementos aislados colocados a cierta distancia que cumplen una función en conjunto. La elección de un tipo de protección para un río se la hace tomando en cuenta factores de riesgo, costo y objetivos que buscamos emplear. En el presenta trabajo trataremos afondo sobre las defensas discontinuas para la fijación de márgenes, como es el caso de los espigones.

5.3 ESPIGONES.

Los espigones son elementos transversales al flujo del agua que comienzan en las orillas, en donde pueden estar empotrados o no y penetran dentro de la corriente. Esto los hace muy vulnerables a la acción del agua.

Figura 5-2 Esquema típico de un espigón tomado de “U.S Department of Transportation” (Felices, Consideraciones sobre las defensas fluviales a base de espigones 31)



En la Figura 5-2 Esquema típico de un espigón tomado de “U.S Department of Transportation” podemos observar que la distancia L_E se denomina longitud de anclaje. Esta parte del espigón se encuentra dentro del terreno natural y su función consiste en disminuir la posibilidad de que exista flujo detrás del mismo. Esta hace que si existe erosión en las primeras etapas el espigón, este no quede separado de la orilla. L_T se denomina longitud efectiva de trabajo y de esta magnitud depende el éxito del sistema. Al producirse sedimentación en las zonas que se encuentran en medio de los espigones esta longitud L_T posteriormente se convertirá en longitud de empotramiento. La cabeza o punta del espigón es el extremo y deberá tener algún tipo de protección, ya que en sus alrededores se produce socavación. La cresta es la longitud desde la orilla hasta la punta del espigón ($L = L_T + L_E$), esta puede estar sumergida o no dentro del cauce del Río. Por último el espigón al igual que cualquier estructura tiene una cimentación, es conveniente realizar una cimentación lo suficientemente profunda para evitar todos los problemas que acarrea la erosión.

Los espigones no trabajan como elementos aislados si no que esto trabajan en conjunto. Estas estructuras tratan de formar una orilla virtual. Cuando encontramos un espigón aislado

nos encontramos con el caso de un deflector. Los principales objetivos de los espigones son: la defensa de los márgenes del río contra de la erosión, formar un cauce más profundo y desviar o reorientar la corriente. Para conseguir los objetivos anteriores los espigones tienen una influencia sobre el flujo reduciendo la velocidad de la corriente en puntos en donde el espigón está presente, desvía la corriente y establece un margen o ancho fijo.

Existen varios tipos de espigones entre los cuales tenemos:

- Espigones rectos, estos espigones pueden tener o no un ángulo con respecto a la orilla.

Este ángulo se lo determina teniendo en cuenta la función que estos van a cumplir.

- Los espigones en forma de “L”, son iguales a los de ángulo recto, si no que al final poseen un vértice perpendicular a la longitud de trabajo. Este tipo de espigón ayuda a estancar el agua en medio de los espigones. Una variante de este tipo de espigones es el espigón en forma de “T”.

- Espigones con cabeza redondeada, la cabeza redondeada le da más rigidez al espigón al mismo tiempo que lo protege de la socavación.

A continuación se ilustran los posibles tipos de espigones.

Figura 5-3: Tipos de espigones (Felices, Consideraciones sobre las defensas fluviales a base de espigones 33)



5.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS EN EL USO DE ESPIGONES.

Los espigones como ya hemos discutido en apartados anteriores, son defensas discontinuas. Este tipo de defensas discontinuas presentan muchas ventajas frente a las defensas continuas. La primera ventaja que presenta es la facilidad de construcción. Los espigones son construidos como muros de gaviones, es por ello que este sistema constructivo no presenta mayores inconvenientes y se lo puede construir con relativa rapidez. Tras de esta ventaja se esconden muchas otras como la facilidad de reparar, posibilidad de utilizar diversos materiales y la posibilidad de ocupar mano de obra de la zona. Pero la principal ventaja de los espigones es que estos pueden ser ajustados en base al dinamismo del río. Muchas veces la modelación hidráulica no es tan precisa, por lo que el proyectista de la obra tan solo posee un estimado de lo que sucederá. Sin embargo en muchas obras hidráulicas el comportamiento esperado es un poco diferente al que sucede, es por ello que muchas veces se deben reajustar los diseños realizados. La ventaja que nos presenta los espigones resulta clara en este punto.

Los espigones también al ser una transición brusca dentro del cauce del río traen también muchas repercusiones. Los espigones al reducir la sección del cauce aumentan la velocidad

del mismo. Partículas que se encontraban estables a una cierta velocidad con la presencia de los espigones son arrastradas aguas abajo. Como resultado es que los espigones causan erosión como una respuesta de un autoajuste, pero esta erosión es muy difícil de predecir. Por lo tanto la presencia de los espigones implican un monitoreo continuo para supervisar que sucede con el cauce y tratar de controlarlo cuando se estime que puede causar algún problema.

5.5 ESPIGONES PERMEABLES E IMPERMEABLES.

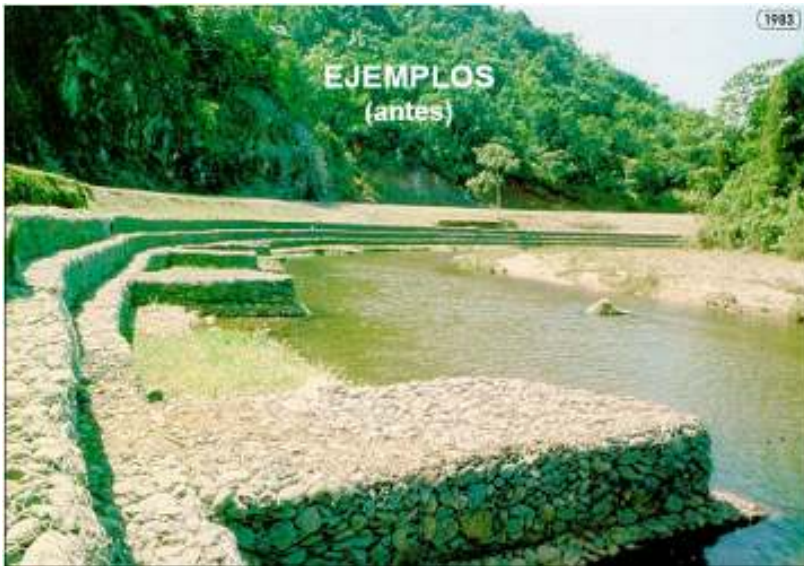
Los espigones pueden ser permeables o impermeables. El uso de cada tipo depende de las características del río, su función y el objetivo.

5.5.1 ESPIGONES PERMEABLES.

Cuando se quiere lograr sedimentación en la parte posterior de los espigones con el fin de formar playas este tipo de espigones son de gran utilidad. Si el espigón es poroso permite el paso del agua a baja velocidad por lo tanto el caudal sólido se sedimentará. La permeabilidad de un espigón se lo mide por su porosidad. La porosidad del mismo se la expresa en porcentaje en función de la relación de vacíos que tiene el material. Estos espigones también son llamados retardadores ya que su función es disminuir la velocidad del agua cerca de los márgenes. Generalmente se encuentran más separados que los impermeables.

Los espigones permeables deben poseer la suficiente porosidad como para permitir que todo el caudal sólido pase a través de ellos. Posteriormente el espacio entre un espigón y otro formará una playa sobre la cual crecerá vegetación. Este sistema de defensa puede ser ajustado conforme se requiera.

Figura 5-4: Espigón permeable. (MACCAFERRI)



5.5.2 ESPIGONES IMPERMEABLES.

Los espigones impermeables funcionan como deflectores de la corriente. Este tipo de espigones son utilizados en ríos navegables cuando se quiere mantener el cauce estable con

un determinado calado. Este tipo de espigones tiene la función de desviar el flujo de la orilla. Se los puede usar también cuando se quiere lograr un estrechamiento de la sección para aumentar el calado. Este fenómeno se lo conoce como profundización del cauce. La idea primordial de esto es eliminar grados de libertad del río haciéndolo de un ancho definido, por lo que el único mecanismo de autoajuste permitido es un aumento de calado. En este tipo de espigones es más difícil realizar cualquier ajuste en base a la necesidad del río.

La Universidad de Kyoto y la de Banglades realizó un estudio sobre los espigones permeables e impermeables. El estudio fue llamado “Flow and Bed deformation around a series of impermeable and permeable Spur Dykes”. Las pruebas se realizaron en un canal de 20 m de largo, 1 metro de ancho, 30 cm de profundidad y 1/3000 de pendiente. Se colocó para cada prueba 10 espigones en los márgenes. En esta prueba se variaron el tipo de espigones de permeables a impermeables con una permeabilidad del 50%. El fondo del modelo era de arena de 0,196 milímetros de diámetro.

De esta investigación se obtuvieron las siguientes conclusiones. Los espigones impermeables reducen significativamente la sección transversal, por lo tanto producen una mayor perturbación de la corriente. Este tipo de espigones producen vórtices alrededor del espigón lo que ocasiona erosión a las cercanías de la base del espigón y son más acrecentadas en los espigones que se encuentran aguas arriba. En este experimento se observó que los espigones permeables ocasionan el mismo fenómeno, pero la erosión que se produce en el fondo es menos severa. En la siguiente figura podremos apreciar la aparición de vórtices en los sistemas de defensas como los espigones.

Figura 5-5:



Este estudio dejó el campo de investigación abierto. De aquí se recomendó que para la aplicación de este tipo de obras, es conveniente realizar un estudio detallado en un modelo físico, ya que aun no existen modelos matemáticos los suficientemente refinados.

5.6 MATERIALES CONSTRUCTIVOS

Los espigones pueden ser contruidos por un sin número de materiales. Entre los materiales más comunes se encuentran los siguientes: material granular, gaviones, concreto, elementos prefabricados, geotubos rellenos con material granular, pilotes de acero, sacos de morteros, sacos de concreto, entre otros.

Las piedras en los espigones se pueden colocar al volteo o en gaviones. Por otro lado un remplazo de este tipo de agregado puede ser los sacos de mortero. Para la preparación de este tipo de sacos generalmente se usa una proporción de arena cemento de 1:10.

5.7 MANTENIMIENTO

Este sistema de defensa necesita un mantenimiento continuo. Debido a variaciones importantes de caudales o crecidas, el río puede acarrear materiales como ramas y troncos los cuales se pueden atascar entre los espigones. Este tipo de material orgánico es

indeseable para la creación de estas playas artificiales. Otra ventaja importante es que a medida que se realizan las labores de mantenimiento se puede ir mejorando el diseño.

6 DISEÑO DE ESPIGONES.

6.1 INTRODUCCIÓN

El diseño de espigones no solo es teórico si no que se debe basar también en la experiencia proveniente de la observación de casos similares y de la puesta en operación del sistema. También podemos basarnos en la utilización de modelos reducidos, modelos matemáticas o investigaciones anteriormente realizadas. Cuando se toman en cuenta investigaciones de laboratorio realizadas en otros lugares o diseños de ciertos ríos, se debe tener en cuenta que fueron realizadas para ciertas condiciones particulares por lo que si intentamos extrapolar los resultados puede que no obtengamos los mismos efectos. El parámetro más importante a tener en cuenta en la construcción de espigones es determinar la longitud de los márgenes que deben ser protegidas.

Para el diseño de espigones no existe un conjunto de normas rígidas como en otros campos de la Ingeniería Civil. El diseñador debe utilizar una amplia recopilación bibliográfica de casos similares ocurridos en otros países o en regiones cercanas a donde se implantó el sistema. Para este tipo de obras se debe tener en cuenta el transporte de sólidos para tener previsto los fenómenos de sedimentación.

Al tratar de realizar un encausamiento debemos tener en cuenta que no queremos incurrir en modificación muy agresivas que vayan en contra de la tendencia natural del río. Es decir el nuevo río tiene que ser capaz de autoajustarse. Cuando encausamos un río estamos limitando los grados de libertad del mismo, por lo tanto hay que tener en cuenta que los cambios en las otras variables no sean muy dramáticos.

Cuando tenemos un río en el cual se desarrollan meandros los sistemas de encauzamientos no deberán imponer cambios bruscos. Por lo tanto es preciso mantener ciertos radios de curvatura los cuales no impliquen cambios dramáticos dentro del recorrido de los ríos. Las curvas que se introduzcan en este tipo de ríos deberán variar suavemente su curvatura y solo bajo condiciones muy necesarias se deberá realizar una alineación recta.

Como consecuencia de diversos análisis se ha encontrado que se debe delimitar el ancho, "B", que debe tener el río luego de haberse construido los sistemas de defensas en función del radio de curvatura "R". José Antonio Masa presentó en el VI congreso Latinoamericano de Hidráulica en 1974 la recomendación expuesta en la Ecuación 6-1, para limitar el ancho del río cuando el cauce este formado por arenas y limos. También el investigador nos señaló que se deben respetar los radios de curvatura existentes. Este hecho hará que el diseño sea más eficiente y más económico. Si se aumenta mucho el radio de curvatura se deberán colocar espigones cada vez a una distancia más cercana, por lo que este método ya no resulta económicamente rentable. En este punto se vuelve más económico realizar una protección continua sobre la orilla afectada. (Felices, Consideraciones sobre las defensas fluviales a base de espigones 17)

Ecuación 6-1

$$2,5 * B < R < 8 * B$$

6.2 CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO

Para el diseño de espigones, según Martín Vide, se deben tener otras consideraciones de mayor importancia. En diseño de espigones señala el autor que debemos tomar en cuenta

factores como: los radios de curvatura del nuevo trazo, determinar un ancho propicio bajo el cual el río vaya a ser estable, la longitud que debe tener el espigón, características de los materiales que se va a emplear, localización en planta y determinación de las socavaciones. Posteriormente se mostrará con más detenimiento cada punto.

6.2.1 ORIENTACIÓN DE LOS ESPIGONES.

La orientación del espigón con respecto a la orilla tiene una gran influencia dentro del diseño de los espigones. Esta está definida por el ángulo α , el cual es el ángulo conformado por el eje del espigón y la orilla aguas abajo. Dentro de la orientación de los espigones tenemos las siguientes alternativas.

- Espigón de ángulo recto $\alpha=90^\circ$

Este tipo de alineación del espigón es generalmente usado cuando se quiere mejorar la navegabilidad del río.

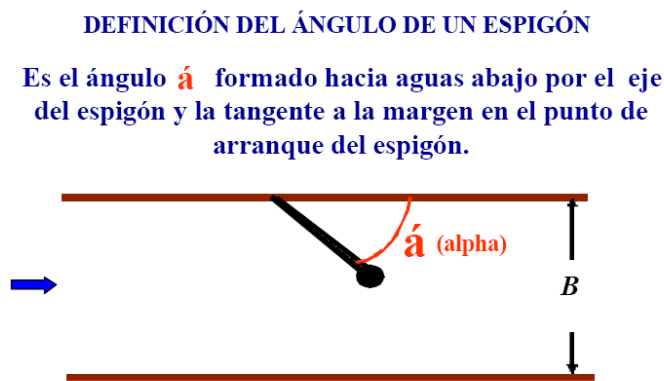
- Espigón inclinado aguas abajo $\alpha<90^\circ$.

En el uso de esta orientación se encuentran opiniones muy divididas unos autores menciona que lo único que ocasiona este tipo de ángulo es atraer el flujo hacia la orilla. Por otro lado Antonio Masa recomienda usarlos cuando el radio de curvatura es menor que $2.5*B$. Cuando sucede esto nos dice que el ángulo α debe estar entre 30° y 70° .

- Espigón inclinado aguas arriba $\alpha>90^\circ$.

Se dice que esta orientación favorece a la sedimentación de material. Se recomienda que este ángulo este entre 100° y 120° (Felices, Consideraciones sobre las defensas fluviales a base de espigones 18).

Figura 6-1: Definición del ángulo α . (Felices, Consideraciones sobre las defensas fluviales a base de espigones 33)



La orientación juega el papel más importante cuando los espigones van a trabajar como deflectores. Pero cuando estos son permeables su orientación no tiene mucha importancia. La función de estos es tan solo disminuir la velocidad del agua para que se produzca la sedimentación de las partículas. Por consideraciones económicas se prefiere utilizarlos en ángulo recto. Según Brown es recomendable que los espigones aguas abajo tengan un $\alpha=30^\circ$ y que este aumente poco a poco para así lograr tener una transición gradual.

6.2.2 SOCAVACIÓN.

Los espigones son reducciones de la sección transversal del cauce del río, por lo tanto existirá un aumento en la velocidad. Existe una velocidad tal en la que el material del fondo del cauce de un diámetro específico será transportado, esta velocidad es la denominada velocidad crítica. Laursen en 1963 derivó una expresión para la velocidad crítica basado en el concepto de esfuerzo cortante del fondo del cauce o fuerza tractiva. La fuerza de corte promedio del canal puede ser escrita como:

Ecuación 6-2: Cortante Promedio

$$\tau_0 = \gamma * R * S_f$$

- τ_0 es la fuerza cortante promedio del fondo del canal
- R es el radio hidráulico
- S_f es la pendiente del fondo del cauce.
- γ peso específico del agua.

Despejando la pendiente del fondo del cauce de la Ecuación 3-3: Ecuación de Manning y reemplazando este término en la anterior ecuación podemos reformular la expresión de la siguiente manera:

Ecuación 6-3: Cortante Promedio basado en la ecuación de Manning.

$$\tau_0 = \frac{\gamma * n^2 * V^2}{k_n^2 * R^{1/3}}$$

- n es el coeficiente de Manning
- V velocidad media del río
- k_n es una constante que para unidades del Sistema Internacional vale 1.0 m^{1/3}/s.
- γ es igual calado

Por otro lado Shield propuso una relación la cual determinaba la fuerza tractiva máxima que una partícula es capaz de soportar según sea su diámetro.

Ecuación 6-4: Esfuerzo de corte crítico para el fondo del cauce.

$$\tau_c = k_s * (\gamma_s - \gamma) * D_s$$

- τ_c fuerza cortante crítica
- k_s coeficiente de Shield.
- γ_s peso específico de las partículas
- D_s Es el diámetro de la partícula

Para encontrar la velocidad crítica igualamos $\tau_c = \tau_0$ y despejamos la velocidad.

Ecuación 6-5: Velocidad Crítica

$$V_c = \frac{k_n}{n} \sqrt{k_s(s-1)} * y^{1/6} * D_s^{1/2}$$

- $s = \gamma_s / \gamma$

Aplicando la formula de Strickler $n = 0.034(Kv * D_{50})$ con un valor de $Kv = 3,28 m^{-1}$.

De donde D_{50} es el diámetro que el 50% de las partículas tienen un diámetro menor. En la formulas también sustituimos $D_s = D_{50}$. Basados en el Libro Introducción a la Mecánica de suelos de Braja M. Das se puede utilizar un valor típico de $\gamma_s = 2,65 \frac{T}{m^3}$ por lo tanto $s = 2,65$. Para este valor de peso específico $k_s = 0,039$.

Reformulando la ecuación anterior en base a estos parámetros obtenemos la siguiente expresión:

Ecuación 6-6: Velocidad Crítica usando la ecuación de Strickler:

$$V_c = k_u * y^{1/6} * D_{50}^{1/3}$$

- $k_u = 6,19 m^{1/2}/s$

Si la velocidad del canal supera la velocidad crítica las partículas serán transportadas por el flujo. Si esto sucede debemos determinar cuál será la profundidad del cauce del río a ser erosionada. Para ello debemos calcular la velocidad en las aproximaciones a los espigones después comparar con la velocidad crítica. Cuando la velocidad crítica es mayor que la velocidad del agua en la aproximación a los espigones ocurrirá una socavación de agua clara, caso contrario ocurrirá una socavación permanente de todo el cauce. De acuerdo con las investigaciones realizadas por Martín Manuel Vide recomienda utilizar para el cálculo de la erosión la hipótesis de agua clara.

6.2.2.1 HIPÓTESIS DE AGUA CLARA

La hipótesis de agua clara es aplicable cuando la velocidad promedio del flujo en la aproximación a la sección es menor que la velocidad crítica. De la igualdad $\tau_c = \tau_0$ despejamos ahora el radio hidráulico y posteriormente despejamos el calado.

Ecuación 6-7 Calculo del calado después de la socavación

$$R = \left(\frac{n^2 * V^2}{k_s * k_n * D_m * (s - 1)} \right)^3$$

Al igual que en la sección anterior podemos ocupar $s = 2,65$ y $k_s = 0,039$. En la ecuación anterior D_s ha sido reemplazado por $D_m = 1.25 * D_{50}$

Asumiendo una sección rectangular y reemplazando con la formula de Strickler $n = 0,034(k_v * D_{50})^{1/6} = 0,034 * \left(\frac{k_v * D_m}{1,25}\right)^{1/6}$ llegamos a la siguiente expresión presentada en el libro de Akan.

Ecuación 6-8: Cálculo del calado necesario.

$$y = \left(\frac{Q^2}{C_u * D_m^{2/3} * W^2} \right)^{3/7}$$

- $C_u = 40 \frac{m}{s^2}$
- W es el ancho del río menos la obstrucción.
- Q es el caudal del río.
- $D_m = 1,25 * D_{50}$
- y representa el calado necesario para dicho diámetro de la partícula.

Por lo tanto la socavación puede ser calculada como la diferencia entre el calado existente y el necesario.

6.2.3 LONGITUD DEL ESPIGÓN.

Como es fácil suponer, en un río natural cada espigón tendrá su propia longitud debido, a la irregularidad del margen del río. Los espigones pueden ser construidos gradualmente por lo que también se recomienda que estos sean construidos hasta una longitud menor que la estimada y que posteriormente se los vaya completando según sea vea la evolución en su comportamiento. No existe ninguna fórmula para determinar la longitud de los espigones, esto depende de la clase de espigón y del objetivo que trate de cumplir. Para los espigones

permeables resulta complicado determinar su longitud. El propósito de este tipo de espigones es disminuir la velocidad del agua para producir sedimentación cercana a las orillas.

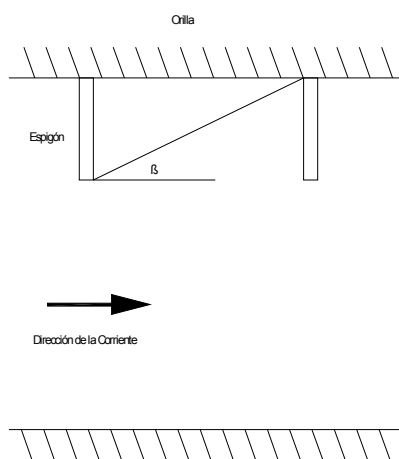
Los espigones permeables tienen dos posibilidades de uso: se los puede emplear en curvas o en tramos rectos muy largos que se pretenda encausar. En el primer caso ha sido ampliamente estudiado para la estabilización de los ríos con meandros. Para este tipo de aplicación la distancia del espigón está dada por la distancia de la orilla que se quiere proteger a la orilla virtual. Para este tipo de obras el Federal Highway Administratio de los Estados Unidos menciona que según varios estudios realizados cuando el espigón sobrepasa el 20% del ancho del río no se obtienen mayores ventajas. Además por consideraciones económicas debemos siempre comparar la longitud total de los espigones con la distancia que está siendo protegida ya que en muchos casos se puede evitar la construcción de espigones y realizar una protección continúa. Para tramos rectos Antonio Maza Álvarez recomendó que la longitud no sobrepase la tercera parte del ancho del río y que el anclaje para estos tipos de obras no debiera ser más que $Lt/4$. Además debemos tener otro tipo de consideraciones cuando los espigones vayan a ser situados en tramos curvos. Es recomendable encontrar la longitud de trabajo del espigón utilizando métodos geométricos para el trazo del alineamiento.

6.2.4 SEPARACIÓN DE LOS ESPIGONES.

“La separación entre los espigones está determinada por el ángulo β de divergencia del flujo al pasar por una zona contraída” (Felices, Consideraciones sobre las defensas fluviales a base de espigones 22). Este ángulo depende de varios factores y uno de ellos es la permeabilidad del espigón. Este valor es único según la situación que experimenta cada río.

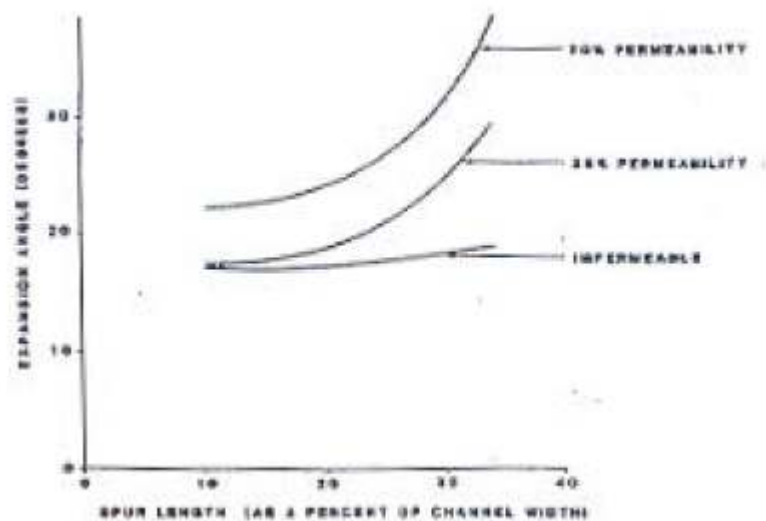
Para los espigones impermeables este valor oscila entre 9° y 17° . Este ángulo se lo conoce como ángulo de expansión y limita la zona que el flujo necesita para perder la perturbación causada por el espigón.

Figura 6-2: Diagrama de la ubicación del ángulo.



S.A. Brown estudio como variaba el ángulo β en función de la permeabilidad del espigón y la relación L_T/B . Los datos experimentales fueron publicados y graficados en “Design of Spur-Type Streambank Stabilization Structures”.

Figura 6-3: Ángulo de expansión en función de la permeabilidad del espigón y la relación L_T/B por Brown (Felices, Consideraciones sobre las defensas fluviales a base de espigones 41).



De la figura anterior podemos concluir cuatro puntos fundamentales. Al aumentar la permeabilidad, el ángulo β aumenta para un valor dado de L_T/B . Otro punto muy importante a tener en cuenta es que el crecimiento del ángulo β se vuelve exponencial para relaciones muy grandes de L_T/B . Por otro lado de las gráficas podemos ver que el ángulo β para espigones impermeables es casi constante e igual a 17° . Además Brown menciona que para un 35% de permeabilidad el comportamiento del espigón es prácticamente como si este fuese impermeable. Al aumentar L_T/B se llegará a un punto en donde el ángulo de expansión crecerá de manera exponencial. También podemos deducir que la separación entre los espigones se encuentra determinada por el ángulo β y la longitud de trabajo del espigón. Como mencionamos anteriormente la longitud de trabajo corresponde a la longitud necesaria para lograr nuestro propósito en la modificación del cauce del río.

La siguiente ecuación busca estimar la separación de los espigones “s” en base del ángulo β .

Ecuación 6-9

$$s = L_T * \cot(\beta)$$

Existen otros investigadores que en base a su conocimiento u observaciones toman valores muy distintos del ángulo de distorsión. Por ejemplo José Antonio Maza recomienda tomar como ángulo de desviación valores entre 9° y 11°. Este hecho daría una mayor separación entre los espigones. Por otro lado Matín Vide recomienda utilizar un ángulo de perturbación de 17° para cualquier tipo de espigones.

Si en el diseño se planificó utilizar espigones tomando en cuenta alguna inclinación con respecto a la orilla del río para utilizarla tabla anteriormente expuesta deberemos realizar algunas modificaciones. Para ello no se deberá utilizar como longitud de trabajo la longitud del espigón si no su proyección perpendicular a la orilla. Por otro lado para el cálculo de la separación en tramos curvos debemos calcularlos como si estos fuesen en rectos y reducirlos a la mitad, según Antonio Felices.

7 APLICACIÓN DEL USO DE ESPIGONES EN EL RÍO CHICHE.

7.1 DESCRIPCIÓN GENERAL.

El proyecto se encuentra ubicado en la ciclo vía “El Chaquiñan”, del cantón de Puenbo, cerca del restaurante el “Cañón del Chiche”. Hace algún tiempo atrás el río presentaba problemas de erosión de la orilla derecha y del pie del talud de la montaña. Como consecuencia la mesa de la ciclo vía comenzó a desmoronarse. Debido a la importancia de la vía por su alto potencial turístico fue totalmente justificado realizar una obra de encauzamiento del río con el fin de proteger la mesa. Actualmente el río se encuentra encauzado bajo una alineación recta. Los espigones construidos fueron puestos para solucionar un problema suscitado debido a la reconfiguración del alineamiento.

El río Chiche es un río joven y trezado de montaña, con un cauce compuesto por material aluvial con partículas de gran tamaño. En la visita realizada se encontró que las obras de defensa fueron construidas con material del cauce con diámetro superior a 10 cm.

La pendiente estimada mediante un levantamiento topográfico es de 1,01% en términos de magnitud. Para el levantamiento topográfico se empleó una estación total marca Leica modelo TC 605. Se ubicó a un auxiliar al inicio del alineamiento recto y se tomó un punto. Después se tomó otro disparó al final del alineamiento recto y se tomó otro punto. Los puntos obtenidos se encontraban referenciados a un sistema de coordenadas impuesto. Una

vez obtenidos los dos puntos se procedió a calcular la pendiente. Para los cálculos posteriores por fines prácticos asumiremos que la pendiente del río es del 1%.

Otra característica importante de todo río es su coeficiente de rugosidad “n”. Este puede ser estimado utilizando la Ecuación 3-4.

$$n = (0,028 + 0,02 + 0,01) * 1,15 = 0,0667$$

Figura 7-1: Modificaciones del alineamiento del río.



De acuerdo con la figura anterior el río fluye de sur a norte. Aquí podemos apreciar que la línea de color rojo corresponde a la configuración actual del río. Por otro lado, la línea azul corresponde al alineamiento que tenía el río antes de ser intervenido. Esta configuración pudo ser establecida con ayuda de una visita de campo y con ayuda de una foto aérea tomada de Google Earth. En la visita de campo se entrevistó a habitantes del sector sobre cuál fue la configuración del río. También, se puede observar en la fotografía anterior que el

cauce antiguo dejó una huella dentro de la vegetación y en el talud de la montaña. Es importante señalar que la longitud del río después del encauzamiento disminuyó. Mediante estimaciones realizadas en base a las fotografías encontradas en Google Earth la longitud de la alineación recta es de 476 metros, mientras que la longitud del río con los meandros era de 570 metros.

Para determinar las dimensiones del río antes de ser encauzado se realizaron entrevistas a los habitantes de la zona. De acuerdo con estas el ancho del río era de 15 metros aproximadamente con un calado de cauce lleno de 2,1 metros, según Juan Martín Vide este caudal se produce con periodos de retorno de 1,5 a 7 años. Esta estimación concuerda con la altura de los espigones construidos. La profundidad del cauce durante la mayoría del año es de 0,70 metros.

Como se menciona un río es un sistema dinámico capaz de cambiar y adaptarse. Un encauzamiento de alineación recta tiende a aumentar la pendiente del fondo del cauce por lo que el agua adquirirá una mayor velocidad, por ende aumentará el transporte de sólidos. Como resultado, a 150 metros aguas abajo del encauzamiento se produjo una playa debido al transporte de sólidos. A 456 metros el río también se encontró otra parte del río que fue modificada debido a la sedimentación.

Figura 7-2: Creación de una playa artificial 150 metros aguas abajo.



Figura 7-3: Influencia de los espigones a 456 metros aguas abajo.



7.1.1 GRANULOMETRÍA

Durante la visita de campo se extrajo una muestra de material del cauce del río. La muestra extraída corresponde a material sub-superficial del cauce. Se ocupó la técnica de muestreo volumétrico descartando todas las partículas con un diámetro mayor a 10 cm. Estas recomendaciones de muestreo fueron tomadas del libro de Juan Martín Vide. Se eligió realizar el muestreo con material sub-superficial debido a que el material superficial es de mayor tamaño mientras que las partículas de abajo poseen un diámetro menor. Como es de

suponerse, cada diámetro de partícula tiene su propia velocidad crítica para ser desplazadas, es decir, las partículas más finas pueden ser desplazadas con mayor facilidad dejando así solo las partículas gruesas en la superficie a este fenómeno se lo denomina acorazamiento (M. Vide, Ingeniería Fluvial).

El peso total de la muestra extraída fue de 47,21 kilogramos. Una vez obtenida la muestra se tamizó 22,97 kilogramos de la misma. A continuación se muestran fotografías del material encontrado en el cauce del río.

Figura 7-4: Material superficial del cauce del río.

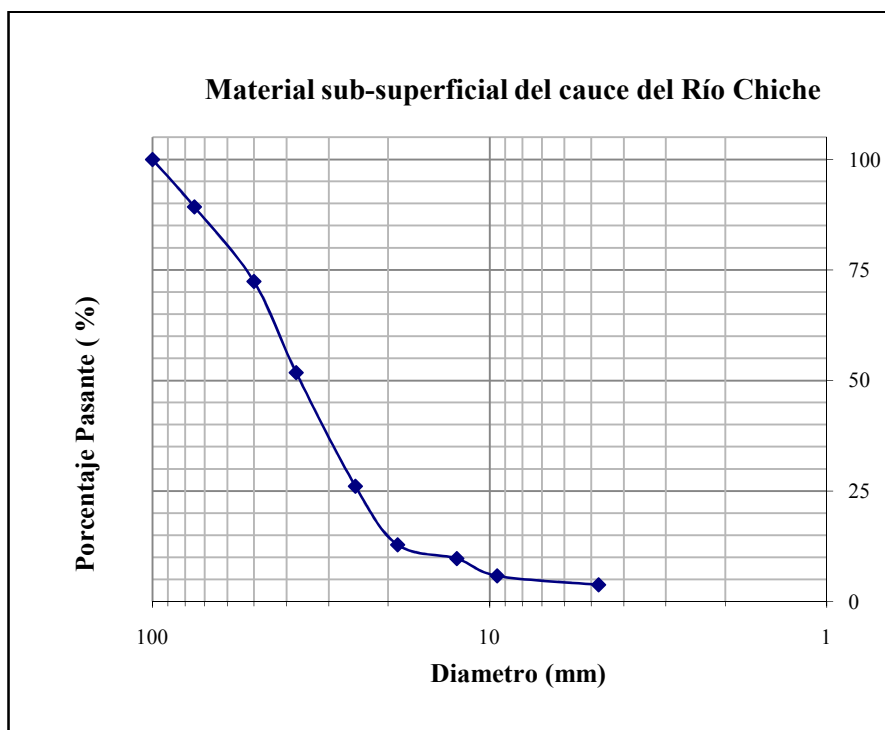


Figura 7-5: Material Sub-superficial del cauce del río.



Con la muestra extraída se procedió a realizar una granulometría. Para su realización se empleo todos los estándares indicados en la norma ASTM – D 2487. La curva granulométrica de la muestra se presenta a continuación.

Figura 7-6: Granulometría del material sub-superficial.



Para los cálculos posteriores que se efectuaron en este diseño se utilizó un diámetro de partícula cuyo pasante sea del 50% en términos de magnitud. Si nos fijamos en el gráfico podemos distinguir que este diámetro es aproximadamente 35 mm (3,5 cm). Los datos granulométricos se encuentran expuestos en el Anexo 1.

Es importante aclarar que se realizó una granulometría del material sub-superficial debido a que este era de menor tamaño, por lo tanto puede ser transportado con mayor facilidad.

7.2 PROBLEMÁTICA ANTERIOR.

Durante el recorrido hecho se pudo observar que el meandro sur del cauce original generaba muchos problemas de inestabilidad al pie del talud de la montaña. Como primer intento de solucionar el problema se construyeron muros en los taludes de la montaña. Años posteriores a esto se decidió modificar el meandro sur del presente proyecto, haciendo un alineamiento recto. Gracias a esta modificación se originó una gran playa a orillas del cauce del río que actualmente son ocupadas como pastizales para el ganado.

Figura 7-7: Muros de piedra para proteger la erosión del talud:



Figura 7-8: Actuales pastizales generados gracias a la reconfiguración del río.



Por otro lado se pudo apreciar que el encauzamiento no fue realizado con espigones, si no estos fueron utilizados para solucionar un problema creado posterior a rectificación del alineamiento. El agua que circulaba por el meandro ubicado en la parte sur del proyecto fue desviada por un cauce artificial de alineación recta. El fin que perseguía este encauzamiento era alejar el río del talud de la montaña ya que este amenazaba a la ciclo vía. Años posteriores el caudal del meandro ubicado en la parte norte fue desviando por la rama recta del río que coincidía con el alineamiento que se uso para encauzar el meandro sur. Esto se determinó al encontrar la existencia de vestigios del cauce del meandro norte y un muro que bloqueaba la entrada de agua a dicho cauce. Una vez que todo el caudal del río fluía por nuevo cauce con alineamiento recto, el río empezó su proceso de reajustarse y se apego al talud de la montaña en la zona donde hoy se colocaron los espigones. Está reconfiguración comenzó a socavar el talud de la montaña e hizo necesaria una nueva intervención sobre el río dando origen a los actuales espigones.

Figura 7-9: Generación del la inestabilidad que posteriormente fue corregida utilizando los espigones.



En la figura anterior podemos observar la zona en donde se generó el problema de erosión una vez modificado el cauce del río. En la misma figura se observa una fotografía en la cual se muestra la socavación causada por el río. Además es posible apreciar unas vigas metálicas que fueron colocadas debido a al derrumbe de la mesa de la vía producto de la socavación.

7.2.1 ESPIGONES.

En busca de solucionar este problema de socavación del talud se construyó un sistema de defensa a base de espigones. Estos fueron contruidos a manera de gaviones, para ello se utilizó cantos rodados encontrados en el cauce del río. Como consecuencia el sistema de defensa está compuesto por partículas de gran tamaño con una alta permeabilidad, esto facilitó a la sedimentación del caudal sólido del río. Los espigones están orientados aguas arriba con un ángulo de 120 grados, acorde a lo visto en la teoría esta disposición favorece a la sedimentación. Los espigones se encuentran separados 21,5 metros y poseen una longitud de 9,2 metros. Estos no se encuentran empotrados dentro de la orilla, si no que se construyó un muro de gaviones paralelo al margen original del río el cual se une con los espigones sirviendo de apoyo a estos. Los espigones poseen una altura de 2,10 metros.

Figura 7-10: Esquema de las condiciones actuales.

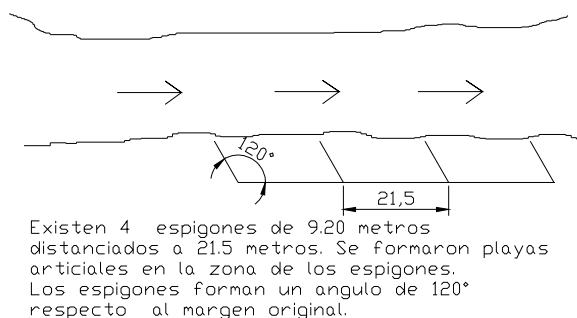


Figura 7-11: Altura de los espigones construidos y formación de las orillas virtuales.



En la figura anterior podemos notar la altura del primer espigón de 2,1 metros. Este espigón es el que disipa la mayor cantidad de energía y en donde se forma primero la orilla virtual. En la fotografía podemos observar que el primer espigón sufrió un asentamiento debido a la erosión en la punta. En la segunda fotografía se puede observar claramente la

presencia de rocas de gran tamaño alrededor del espigón, las cuales fueron coladas durante la construcción de los mismos para evitar los asentamientos debido a los fenómenos erosivos propios del río. Es importante recalcar que estas estructuras al ser flexibles, su falla no implica que estos dejen de funcionar. Esto puede ser observado en la ilustración anterior, el espigón que sufrió este asentamiento sigue cumpliendo su misión de formar orillas virtuales y proteger el talud de la montaña.

7.3 CONSIDERACIONES DE DISEÑO

Para la formulación de la presente alternativa que se propone se consideró la configuración del río antes de los encauzamientos realizados. Es decir se ocupara la alineación sinuosa ilustrada en la Figura 7-1: Modificaciones del alineamiento del río. Además al no poder recopilar información sobre la sección transversal del río se procederá a hacer un estimado ocupando una sección rectangular. En base a los testimonios de los habitantes de la zona y a una comparación con el cauce existente se supone que la sección del cauce fue de 15 metros de ancho. También en la elaboración de la presente alternativa ocuparemos un calado de cauce lleno de 2,10 metros, este dato fue tomado en base a evidencia encontrada en la zona y a los testimonios de moradores del sector. Como se mencionó anteriormente en este documento, éste es el caudal que define la configuración geométrica de un río.

7.3.1 TRAZADO EN PLANTA.

Con ayuda de las fotografías aéreas tomadas de Google Earth se pudo estimar el eje aproximado del antiguo cauce del río. Una vez encontrada esta información se procedió a determinar la zona que va a ser intervenida. Después de ello se determinó la amplitud y la

longitud del alineamiento sinuoso. Por último se procedió a trazar el nuevo alineamiento teniendo como objetivo alejar 5 metros los puntos del cauce más cercanos al talud. Se usa la máxima longitud posible de los espigones, ya que según las recomendaciones de diversos autores la longitud del espigón no deberá ser más que un tercio del ancho del río.

Figura 7-12: Elementos del Río.¹



En la figura anterior podemos ver que el valor de λ es de 458,7 metros, mientras que la amplitud (A) es 53,89 metros. De acuerdo con la teoría vista podríamos ajustar esta alineación y modificarla utilizando una función sinusoidal como una propuesta de nuevo alineamiento. Sin embargo después de realizar un análisis de esta alternativa se llegó a la conclusión de que al realizar esta modificación resultaba muy costosa. Como podemos ver en el gráfico el segmento de alineación posee dos amplitudes diferentes, y al tomar como parámetro de corrección la menor amplitud tendríamos que realizar una gran modificación en la otra cresta del senoide, aproximadamente esta se debería moverse 13 metros y para tal

¹ En el gráfico las acotaciones se encuentran realizadas en metros.

objeto la construcción de espigones ya no tiene sentido. Por lo tanto se optará por otra alternativa para trazar el nuevo alineamiento.

En el Capítulo 4.1 del presente documento se mencionó que la importancia del trazado en planta nacía en la idea de no provocar cambios bruscos en la curvatura de una alineación. Por ejemplo una transición de un alineamiento recto a uno circular consiste ser un cambio brusco de curvatura. Un tramo recto tiene una curvatura infinita mientras que un círculo posee un único valor de curvatura. Por ello se optará por una manera gráfica para realizar la modificación en el alineamiento.

Durante la determinación gráfica del nuevo alineamiento se tuvo la idea de mantener una configuración similar al alineamiento anterior. Además se buscó alejar al río del talud de la montaña en las zonas en las que este se encontraba muy próximo. Para una primera instancia se busca alejar el río 5 metros del talud de la montaña, es importante mencionar que los espigones brindan mucha flexibilidad en el diseño y si por alguna razón se debe alejar el río un poco más, se lo podrá realizar con mucha facilidad a medida que el río se vaya reconfigurando. Además es importante mencionar que para el diseño se está tomando en cuenta el caudal de cauce lleno. A continuación se muestra la alineación propuesta en base a estos criterios.

Figura 7-13: Alineación propuesta.



En la figura anterior podemos observar que la línea de color rojo corresponde al cauce antiguo del río. La línea de color verde corresponde al nuevo cauce. La línea delgada corresponde al eje del río.

Para el trazo del nuevo eje del cauce se buscó que el río mantuviese un alineamiento parecido al original. Se trató de alejar al cauce del río 5 metros del talud de la montaña. Para el trazo del cauce se ocupó una herramienta de Autocad llamada “Splines”. Esta realiza un trazado curvo suavizado ocupando funciones polinomiales, la generación de estas funciones es interna dentro del software. Con esta herramienta logramos obtener cambios paulatinos en la curvatura del trazado, además existe continuidad en los puntos de transición entre las funciones polinomiales. Cuando acaba una función la siguiente continúa teniendo el mismo valor de la pendiente en el punto, es decir las derivadas de las funciones en el mismo punto son iguales. Las “splines” son ampliamente utilizadas cuando se trata de unir puntos de paso obligatorios con curvas suaves. Para este diseño definimos puntos de paso obligatorios

teniendo en cuenta la necesidad de alejar el cauce del río por lo menos 5 metros del talud de la montaña.

7.3.2 DISEÑO ESPIGONES.

7.3.2.1 CALCULO DE LA LONGITUD DE TRABAJO, ESPACIAMIENTO Y LONGITUD DE EMPOTRAMIENTO.

En base al nuevo trazo del alineamiento se determinó la separación de los espigones. Se sabe que los espigones deben tener una longitud de trabajo de 5 metros, con esta información nos remontamos al Capítulo 6.2.4. Debemos mencionar que para el diseño de los espigones se tomó en cuenta que utilizaremos cantos rodados con un diámetro mayor a 10 centímetros, por lo cual los espigones serán semi-permeables.

Para comenzar el dimensionamiento de la separación entre los espigones debemos calcular la relación L_T/B para así poder ocupar Figura 6-3: Angulo de expansión en función de la permeabilidad del espigón y la relación L_T/B por Brown. A partir de esta figura calcularemos el ángulo de expansión el cual determina la separación de estos.

$$\frac{L_T}{B} = \frac{5}{15} = 0.333 = 33.33\%$$

Para esta relación de L_T/B de 33.33% y tomando en cuenta que se está diseñando espigones semi-permeables el ángulo de expansión β es igual a 23° . Conocido este ángulo podemos ocupar la Ecuación 6-9 para calcular la separación de los espigones “s”.

$$s = L_T * \cot(\beta) = 5 * \cot(23) = 11.78 \text{ m}$$

Según recomendaciones de Arturo Felices Rocha en tramos curvos esta distancia ser reducida a la mitad por lo que la separación debería ser de 6 metros aproximadamente.

Juan Martín Vide recomienda utilizar un ángulo de expansión de 15° . Según el autor esto corresponde a una separación de 3 a 4 veces la longitud de trabajo del espigón.

$$s = L_T * \cot(\beta) = 5 * \cot(15) = 18.66 \text{ m}$$

Diversos autores mencionan que la determinación de la separación de los espigones no obedece a reglas estrictas, más bien, cada río tendrá su propia separación acorde a su realidad. Por lo tanto las formulas utilizadas tan solo serán meras recomendaciones. Juan Matín Vide señala que la separación entre los espigones está en función de la velocidad y la curvatura de un río. Éstos parámetros difieren en gran medida de un río a otro.

Como se verá en el siguiente capítulo, en base a la experimentación realizada sobre el modelo la separación entre los espigones que produce el mayor incremento de velocidad en el cauce es $4L_t$ es decir 20 metros. Cuando se determina la separación en base al modelo se toman en cuenta el efecto que tiene la velocidad y la curvatura. El modelo es una representación de la realidad y muestra el comportamiento de las fuerzas que dominan el fenómeno.

En la siguiente tabla presentaremos un resumen de las posibles separaciones a emplearse.

Tabla 7-1: Posibles separaciones entre espigones a emplearse.

Separación entre espigones	
Método empleado	Separación (m)
Recomendación Arturo Felices	6
Recomendación Juan Martín Vide	18,66 o (15-20)
Modelo Hidráulico	20

Como podemos ver no existe un método exacto para definir la separación que deben tener los espigones esto tan solo depende de la experiencia que tenga el diseñador. Otra alternativa puede ser la construcción de modelos hidráulicos los cuales nos brinden una idea de la separación óptima que deben tener estos. La separación de los espigones no puede ser determinada tan solo con relación entre la longitud de trabajo y el ancho (L_t/B), si no se deberá hacer un mayor estudio sobre la influencia que tiene la velocidad y el alineamiento del cauce en la separación de los espigones .

Para el diseño de este encausamiento ocuparemos una separación de 20 metros como se mostrará en el esquema a continuación. Se ha considerado esta separación debido a que esta fue determinada en base al modelo hidráulico en donde se toma en cuenta el efecto que tiene la velocidad y la curvatura.

Figura 7-14: Disposición de los espigones al utilizar una separación de 20 metros.



En el grafico anterior podemos observar que la línea de color verde corresponde al nuevo cauce propuesto. Para lograr el nuevo trazado se pretenden utilizar 21 espigones con una longitud de trabajo de 5 metros y 4 espigones con una longitud de trabajo de 3 metros. Los espigones de menor tamaño tan solo son utilizados para tratar de ajustar el cauce original al alineamiento propuesto.

Como vimos en la teoría los espigones deben tener una longitud de anclaje esto trata de evitar que el espigón se separe de la orilla por fenómenos erosivos iniciales. En el meandro norte del presente proyecto es posible realizar los espigones anclándolos. Para ello Arturo Felices recomienda utilizar una distancia de $L_t/4$, es decir los espigones deberán tener un anclaje de 1,25 metros. Sin embargo en el meandro sur no será posible desarrollar esta longitud de anclaje. Por lo tanto se propone utilizar un muro de gaviones perimetral a la orilla el cual sujete los espigones.

7.3.2.2 CALCULO DE LA SOCAVACIÓN DE LOS ESPIGONES.

Para el cálculo de la socavación procederemos a calcular la velocidad crítica y compararla con la velocidad del agua en el cauce. Para ello ocuparemos la Ecuación 6-6: Velocidad Crítica usando la ecuación de Strickler: .

- $k_u = 6,19 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$

$$V_c = k_u * y^{1/6} * D_{50}^{1/3} = 6,19 * 2,1^{1/6} * 0,035^{1/3} = 2,29 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Utilizando el programa Flow Master calculamos la velocidad y el caudal de la sección del río, estos son: $2,09 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ y $65,69 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ respectivamente. Para ello ocupamos los siguientes datos: coeficiente de rugosidad de Manning del río de $0,0667$, pendiente del 1%, calado del río de 2,1 metros, un ancho de 15 metros y una sección rectangular

Como la velocidad crítica es mayor que la velocidad del cauce se puede utilizar la hipótesis de agua clara. Para ello ocuparemos la Ecuación 6-8: Cálculo del calado necesario. Como vimos en el capítulo anterior $D_m = 1,25 * D_{50}$ y $C_u = 40 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$. Debemos recordar que los espigones tienen una longitud de trabajo de 5 metros, por lo tanto el ancho del río menos la obstrucción será de 10 metros ($W=10\text{m}$). De los ensayos granulométricos se determinó que $D_{50}=0,035\text{m}$ o 3,5 cm.

$$y = \left(\frac{Q^2}{C_u * D_m^{2/3} * W^2} \right)^{3/7} = \left(\frac{65,69^2}{40 * (1,25 * 0,035)^{2/3} * 10^2} \right)^{3/7} = 2,53 \text{ m}$$

La estabilidad del cauce para el caudal dado y un ancho obstruido de 10 metros es de un calado de 2,53 metros. Por lo tanto la profundidad de socavación.

$$\Delta y = 2,53 - 2,10 = 0,43 \text{ m}$$

Por lo tanto la base de los espigones deberá estar a más de 0,43 metros por debajo del fondo del cauce.

Anteriormente se estableció una profundidad de socavación de acuerdo al diámetro de la partícula. Sin embargo debemos aclarar que el material superficial del cauce del río presenta diámetros muy superiores a la muestra extraída. Al hacer la estimación de la socavación utilizando este método estamos siendo conservadores. De acuerdo a lo visto en el Capítulo 4.3.1 la velocidad admisible no erosiva del cauce depende del material que lo conforma. Para un río conformado de roca sedimentaria la velocidad admisible es de 3 m/s. Sin embargo debemos corregir esta velocidad admisible debido a la sinuosidad del alineamiento. De acuerdo Akan la velocidad debe disminuirse en un 22%.

$$V_{ad} = 3 * 0.78 = 2.34 \frac{m}{s}$$

El valor calculado anteriormente deberá ser comparado con la velocidad que tendrá el flujo con la presencia de los espigones. De la experimentación en el modelo hidráulico pudimos determinar que la velocidad del flujo aumentará en un 12% para una separación de los espigones de 4 veces su longitud. Por lo tanto la velocidad del flujo ante la presencia de espigones podrá ser calculada aumentando el 12% a la velocidad del río.

$$V_{Con \text{ espigones}} = 1.12 * 2.09 = 2.34 \frac{m}{s}$$

El aumento de velocidad debido a la presencia de los espigones igual a la velocidad permisible. Por lo tanto podemos concluir que cualquier reajuste que sufra el río será suave y no creará cambios drásticos en la profundidad del cauce.

Pese a todo esto, es recomendable colocar el material que fue escavado para la construcción de los espigones alrededor de los mismos. Esto disminuirá el proceso de erosión de la punta del espigón. En este río en particular el material superficial es de gran tamaño, estas rocas actuarán como defensas protegiendo al espigón.


7.3.2.3 DIMENSIONAMIENTO Y CÁLCULO DE ESTABILIDAD.

En base al análisis anterior determinamos la necesidad de implementar espigones que tengan una altura de 2,10 metros, que estén a más de 0,43 metros por debajo del fondo del cauce y que tengan una longitud de trabajo de 5 metros. Las dimensiones comerciales de las mallas utilizadas para la construcción de muros de gaviones se presentan en la siguiente tabla obtenida por los productores Ideal Alambrec (Alambrec).

Tabla 7-2: Dimensiones de las mallas utilizadas para muro de gaviones.

Usos Frecuentes

- Obras hidráulicas para el control de flujos.
- Habilitación de canales.
- Obras que requieren contacto directo con el agua.
- Estructuras diseñadas en zonas medias o bajas.
- Muebles, aberturas tipo compuerta.
- Protección para pilas de turbinas y arboles.
- Muros de contención.



Guiones Tipo Torón Meandros

Long. (m)	Ancho (m)	Alt. (m)	Dimensión Abierta (m)	Dimensión Abierta (m)	Peso (kg/m²)	Apertura (m)	Peso (kg/m²)
1.00	1.00	1.00	1.41	1.41	42	100x100	1.30
2.00	1.00	1.00	1.41	1.41	42	100x100	1.30
3.00	1.00	1.00	1.41	1.41	42	100x100	1.30
4.00	1.00	1.00	1.41	1.41	42	100x100	1.30

Guiones Tipo Torón Planchales

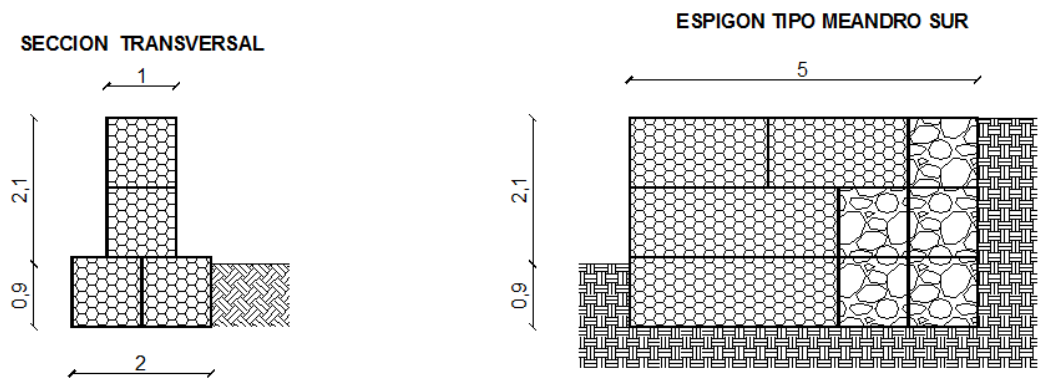
Long. (m)	Ancho (m)	Alt. (m)	Dimensión Abierta (m)	Dimensión Abierta (m)	Peso (kg/m²)	Apertura (m)	Peso (kg/m²)
2.00	1.00	1.00	1.41	1.41	42	100x100	1.75

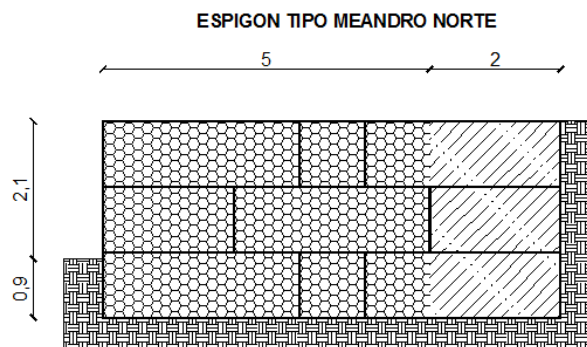
Guiones Tipo Torón

Long. (m)	Ancho (m)	Alt. (m)	Dimensión Abierta (m)	Dimensión Abierta (m)	Peso (kg/m²)	Apertura (m)	Peso (kg/m²)
1.00	1.00	1.00	1.41	1.41	42	100x100	1.30
2.00	1.00	1.00	1.41	1.41	42	100x100	1.30
3.00	1.00	1.00	1.41	1.41	42	100x100	1.30

En base a las a las dimensiones comerciales de las mallas procedimos a realizar el diseño de los espigones. Para el diseño de espigones se ocuparon mallas de 1, 2 y 3 metros de largo y de altura de 1 metro.

Figura 7-15: Esquema de los espigones propuestos.

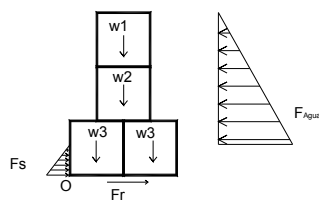




En la figura anterior podemos ver que los espigones del meandro norte tienen una longitud total de 7 metros con 2 metros empotrados en la orilla del cauce. Para la construcción de estos espigones se ocupará mallas de 1, 2 y 3 metros de largo con un ancho y un alto de 1 metro. En el meandro sur se emplearon espigones de 5 metros de largo en los cuales está incluido un muro perimetral a la orilla. Para su fabricación se propone emplear mallas de 2 y 3 metros. Tanto en el meandro sur como en el norte se empleará la misma sección transversal.

Determinada la geometría de los espigones calculamos la estabilidad de los mismos ante las cargas existentes. Para ello se dividió las cargas en dos grupos, cargas estabilizadoras y desestabilizadoras. Dentro de las cargas estabilizadoras se encuentra la fuerza de fricción y el empuje pasivo del suelo. La única fuerza desestabilizadora que interviene es la presión del agua. En el análisis se tomó en cuenta la estabilidad de los espigones ante el deslizamiento y el volcamiento. Para comprobar la estabilidad se ocupó una franja de 1 metro de largo.

Figura 7-16: Fuerzas interventoras



En la figura anterior “Fs” representa el empuje pasivo del suelo, “Fr” la fuerza de fricción, “F_{Agua}” el empuje del agua y “w” el peso para cada nivel del muro. A continuación se presenta el cálculo para determinar las fuerzas anteriormente descritas. Para el cálculo de las fuerzas se emplearon los datos detallados a continuación.

Tabla 7-3: Datos empleados para el cálculo de la estabilidad

$\varphi =$	34	
$\gamma_{\text{suelo}} =$	1.92	t/m ³
$\gamma_{\text{h}_2\text{O}} =$	1	t/m ³
$\gamma_{\text{gavión}} =$	2	t/m ³
$\mu =$	0.500	

Los datos que se usarán para los presentes cálculos no fueron obtenidos de manera experimental, ellos corresponden a consultas bibliográficas realizadas para el desarrollo del presente trabajo. Los pesos específicos fueron tomados del libro Ingeniería Fluvial de Martín Vide.

Para el cálculo ángulo de reposo (φ) se empleo la Figura 4-4: Angulo de de reposo de los suelos no cohesivos según el diámetro de las partículas y se determinó que su valor es igual a 34° ($\varphi = 34^\circ$). Braja M. Das señala un coeficiente de fricción “ μ ” igual a 0,5 que se produce entre el muro y el suelo.

$$k_p = \frac{1 + \text{sen}(\phi)}{1 - \text{sen}(\phi)} = \frac{1 + \text{sen}(34)}{1 - \text{sen}(34)} = 3,54$$

$$w_i = \gamma_{\text{gavi3n}} * \text{Volumen}$$

$$F_r = \mu * (w_1 + w_2 + w_3)$$

$$F_s = \frac{1}{2} k_p * \gamma_{\text{suelo}} * (3 - 2,10 - 0,43)^2$$

$$F_{\text{Agua}} = \frac{1}{2} * \gamma_{\text{Agua}} * (2,10)^2$$

Tabla 7-4: Fuerzas

Fuerzas Estabilizadoras		
Fuerza	Cantidad	Unidad
w ₁	2	t
w ₂	2	t
w ₃	4	t
F _s	0.75	t
F _r	4.00	t
Fuerza des-estabilizadora		
F _{Agua}	2.205	t

Una vez calculadas las fuerzas se procedi3 a calcular el factor de seguridad ante deslizamiento.

$$FS_{\text{Deslizamiento}} = \frac{4+0,75}{2,205} = 2,15$$

Para el cálculo de la estabilidad de los espigones ante el volcamiento se calcularon los momentos estabilizadores y des-estabilizantes con respecto al punto “O” mostrado en la Figura 7-16: Fuerzas interventoras. A continuación se presentan los momentos resultantes de estas fuerzas.

Tabla 7-5: Momentos

Momentos Estabilizadores		
Fuerza	Momento (T*m)	
w ₁	M ₁	2.0 0
w ₂	M ₂	2.0 0
w ₃	M ₃	4.0 0
F _s	M _s	0.2 3
Momento desestabilizador		
F _{Agua}	M _{Agua}	3.5 3

Una vez calculados los momentos procedimos a calcular el factor de seguridad ante el volcamiento.

$$FS_{Volcamiento} = \frac{2+2+4+0,23}{3,53} = 2,33$$

Para el diseño de muros se recomienda que los factores de seguridad sean mayores a 2 (Das, Fundamentos de Ingeniería Geotécnica 450). Podemos ver que para las dimensiones propuestas de los espigones tenemos factores de seguridad superiores a 2, por lo tanto el diseño propuesto es aceptable.

7.4 PRESUPUESTO DE CONSTRUCCIÓN.

Como complemento al presente trabajo se hizo un presupuesto referencial de la construcción de espigones. Para ello se realizó un análisis de precios unitarios en donde se identifico tres rubros importantes para la construcción de este sistema de defensa. La construcción de gaviones, excavación en agua y la colocación del material alrededor de los espigones son los tres rubros que intervienen para determinar el precio en estos sistemas de defensa. Adicionalmente se puede tener más rubros de acuerdo al proceso constructivo a utilizarse pero los presentados a continuación son los más importantes. El análisis de precios unitarios para cada rubro se encuentra expuesto en el

Anexo 2.

Tabla 7-6: Presupuesto referencial

Presupuesto Referencial					
Conce pto	Rubro	Uni dad	Canti dad	Precio Unitario (\$/Unidad)	Total (\$)
Espig ones					
	Construcción de gaviones	m3	588	84.38	49617. 78
	Excavación sin clasificar a máquina en agua	m3	294	3.13	919.04

	Colocación del material alrededor de los espigones	m3	294	2.93	860.24
Sub- Total					51397. 07
Muro					
	Construcción de gaviones	m3	1448	84.38	12218 8.01
	Excavación sin clasificar a máquina en agua	m3	579	3.13	1809.9 5
Sub- Total					12399 7.96
<i>Total</i>					17539 5.03

8 MODELAJE HIDRÁULICO DE UNA SECCIÓN CURVA DEL RÍO CHICHE.

8.1 ASPECTOS CONSIDERADOS EN EL DISEÑO.

Para el desarrollo de este trabajo se tomó una sección curva del Río Chiche la cual presentaba problemas de erosión en el talud de la montaña, ésta consistía ser la sección más crítica debido al riesgo inminente que esta ocasionaba a la ciclo vía. No fue posible realizar el modelaje de todo el tramo que se propone a ser encausado debido al alto costo que hubiese implicado la construcción del mismo.

Para el diseño del modelo se tomo el tramo sur del alineamiento original del cauce del río. En base a los testimonios de los moradores de la zona se tomo un ancho de 15 metros de para el modelo. Realizando una evaluación de campo pudimos constatar que la altura de cauce lleno era de 2,1 metros, los cuales serán utilizados para el modelo. Debido a que no existía evidencia del cauce no se pudo establecer la conformación real del mismo, es por ello que se utilizará una sección rectangular. Los resultados del presente modelo nos proporcionarán unos buenos estimados de la variación de la velocidad debido a la presencia de los espigones y nos permitirá confirmar la separación óptima que deben tener los espigones.

Figura 8-1: Sección del río a modelarse.



El inicio del tramo a modelarse corresponde a las coordenadas N 792190,88 metros y E 9978739,26 metros. El final del tramo a modelarse tiene como coordenadas N 792216,17 metros y E 9978951,19 metros. Las coordenadas anteriores tan solo son referenciales y fueron tomadas de software Google Earth. En la figura la línea anaranjada corresponde al tramo del río que se propone modelar.

8.2 ESCALAS.

En un modelo hidráulico las escalas deben permitir observar claramente el fenómeno hidráulico. Una escala muy reducida hace que el investigador no pueda tomar medidas apropiadas. Por otro lado una escala muy grande aunque facilita la toma de mediciones hace que el modelo sea excesivamente costoso.

Mediante recomendaciones del personal docente de ésta institución y de recopilaciones bibliográficas se observó que un modelo con escala distorsionada era la mejor alternativa

para el desarrollo del proyecto. Además el modelo hidráulico también tiene un fin didáctico, se prevee que éste sea utilizado en las clases de Ingeniería Hidráulica.

Figura 8-2: Conformación del cauce a modelarse



En la figura anterior podemos observar que la línea de color anaranjado corresponde al meandro del cual se construyó el modelo.

Como ya mencionamos anteriormente el modelo será de escala distorsionada y de lecho fijo, por lo tanto se ocuparan diferentes escalas longitudinales y de calado. Primero definiremos la escala de distorsión “e”. De acuerdo a la Ecuación 2-3 la distorsión es la razón entre la escala longitudinal y la escala del calado. Usaremos como escala longitudinal $\lambda_L = 200$, este valor significa que el modelo será 200 veces más pequeño en longitud que el prototipo. Por otro lado en el modelo hidráulico manejaremos un calado de 2 centímetros por lo que la escala del calado queda expresada de la siguiente manera:

$$\lambda_y = \frac{2,1}{0,02} = 105$$

Por lo tanto la distorsión queda definida de la siguiente manera:

$$e = \frac{200}{105} = 1,905$$

Una vez definida la distorsión procedemos a calcular la escala de la pendiente del modelo. Como se mencionó antes debido a al manejo de diferentes escalas el modelo y el prototipo poseerán diferentes pendientes. A continuación se presenta el cálculo de la escala de la pendiente:

$$\lambda_i = \frac{1}{e} = \frac{1}{1,905} = 0,5249$$

La pendiente del modelo (i_m) queda definida de la siguiente manera, debemos recordar que mediante mediciones en terreno se determino que la pendiente del prototipo (i_p) era del 1%:

$$i_m = \frac{i_p}{0,5249} = 1,905\%$$

El ancho del modelo (B) será de 15 centímetros por lo que λ_b será igual a 100.

Una vez definidas las principales escalas geométricas podremos calcular la escala del caudal λ_Q según la Ecuación 2-6.

$$\lambda_Q = \lambda_y^{3/2} * \lambda_b = 105^{1,5} * 100 = 107593$$

De acuerdo a la Ecuación 2-7 la escala del coeficiente de rugosidad (n) queda definido como:

$$\lambda_n = \frac{\lambda_y^{1/6}}{\sqrt{e}} = \frac{105^{1/6}}{\sqrt{1,905}} = 1,5737$$

Una vez determinada la escala de rugosidad calculamos la rugosidad que deberá tener el modelo. El coeficiente de rugosidad de Manning del modelo deberá ser de 0,042. Los cálculos serán presentados a continuación.

$$n = \frac{0,0667}{1,5737} = 0,042$$

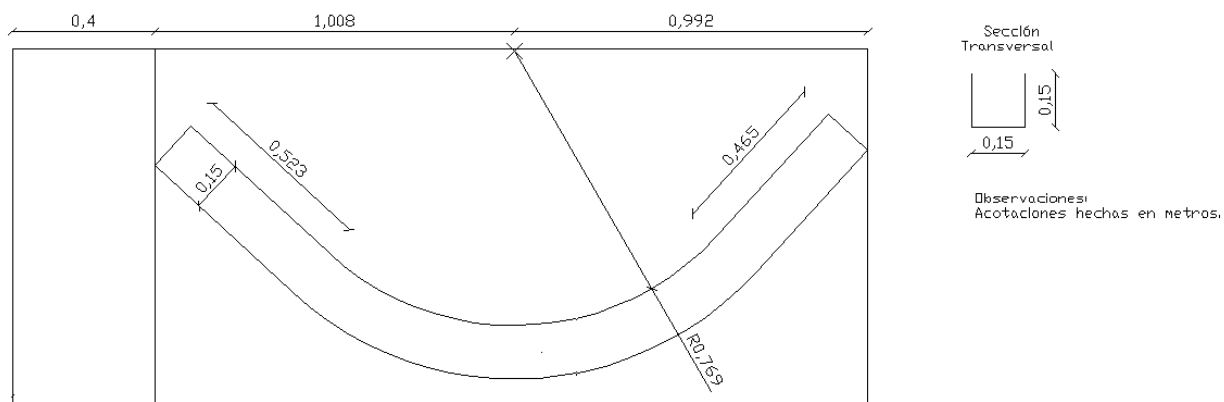
Este coeficiente de rugosidad resulta demasiado alto como para ser implementado con los materiales que tenemos al alcance para el modelo. Por lo tanto procederemos a colocar pequeños pedazos de acrílico transversales al flujo que se encuentren sumergidos hasta lograr alcanzar la velocidad necesaria.

8.3 DISEÑO DEL MODELO

Una vez definidas las escalas se procedió a dimensionar el modelo. Para la construcción del canal se ocupará acrílico el cual posee una rugosidad de Manning de 0,011. Además se colocaran elementos transversales para así aumentar el coeficiente de Manning y lograr la velocidad esperada. Al aplicar todas las escalas de dimensiones a la construcción del modelo, las dimensiones de este quedaron definidas como se esquematizan a continuación.

Figura 8-3: Dimensiones del modelo.

Las acotaciones observadas están en metros.



Por facilidad constructiva el alineamiento del río se aproximó a un círculo de radio 0,77 metros. La mesa fue construida en madera con marcos metálicos. El ancho de la mesa es de 1 metro y el largo de 2 metros, además existe una mesa pequeña de 1 metro por 0,4 metros. La sección del canal es de 15 centímetros de ancho y 15 centímetros de alto. El alto del canal es mayor al requerido debido a que el modelo será usado en prácticas de laboratorio de la Universidad San Francisco por lo que se puede necesitar calados mayores.

El modelo fue construido utilizando una pendiente del 1,905%, según lo calculado. Para lograr este desnivel se construyó una mesa que se apoya en un extremo con otra mesa. La mesa más grande se la alza de un extremo y se la sujeta con unos pernos metálicos a la otra. En el modelo se ocupó un desnivel de la mesa de 0,038 metros (3,8 centímetros) los cuales representa la pendiente que se trata de modelar. Con fines de preservar el modelo para realizar prácticas de laboratorio de la clase de Hidráulica la pendiente del mismo también es regulable. Por lo cual será posible realizar diversas prácticas de laboratorio en este modelo.

El modelo cuenta con un sistema de recirculación de agua. Para ello se colocó un tanque de agua en la base de la mesa en el cual toda el agua se deposita una vez que ésta circuló a lo

largo todo el canal. Este tanque está conectado a una bomba la cual eleva el agua hasta el inicio del canal. La capacidad de la bomba es de 40 l/min o 0,000667 m³/s.

Los espigones que se utilizarán en dentro del modelo serán impermeables. Estos serán de 5 centímetros de longitud de trabajo contruidos de madera. Se estudia esta longitud ya que los autores recomiendan utilizar espigones que no tengan una longitud más que un tercio del ancho del río. La altura de los espigones será de 10 centímetros con el fin de evitar que el flujo pase sobre el espigón.

Figura 8-4: Modelo Hidráulico



8.4 CALIBRACIÓN

Una vez construido el modelo en base a las dimensiones propuestas y con los materiales propuestos se procedió a calibrarlo. Para calibrar el modelo se utilizó la velocidad como parámetro, para ello se comparaba la velocidad estimada del agua en el cauce del río (prototipo), con la velocidad en el modelo.

En base a la investigación de campo se supuso un cauce rectangular de 15 metros de ancho y 2,1 metros de profundidad, con un coeficiente de rugosidad de Manning de 0,0667 y una pendiente del 1% establecida mediante un levantamiento topográfico en campo como fue calculada en el capítulo anterior. Utilizando el software Flow Master se procedió a calcular la velocidad del río utilizando la formula de Manning.

Tabla 8-1: Propiedades Hidráulicas del Prototipo

Descripción del proyecto		
Canal	Canal Rectangular - Prototipo río	
Método	Formula Manning	
Resolver	Descarga	
Datos Ingresados		
Coeficiente de Manning	0,067	
Pendiente	0,010000	m/m
Calado	2,10	m
Ancho	15,00	m
Resultados		
Descarga	65,69	m ³ /s
Área Mojada	31,5	m ²
Perímetro Mojado	19,20	m
Ancho	15,00	m

Resultados		
Profundidad	1,25	m
Crítica		
Pendiente Crítica	0,049739	m/m
Velocidad	2,09	m/s
Cabeza de	0,22	m
Velocidad		
Energía Especifica	2,32	m
Número de	0,46	
Froude		
Tipo del Flujo	Sub-crítico	

La velocidad del río es de 2,09 m/s, utilizando las escaladas seleccionadas la velocidad del modelo sería:

$$\lambda_v = \lambda_y = 105$$

$$v_m = \frac{2,09}{105} = 0,019904 \frac{m}{s} = 19,9 \frac{cm}{s}$$

Una vez calculada la velocidad que debe tener el flujo en el modelo se procedió a colocar elementos transversales que obstaculicen al flujo para así lograr obtener el coeficiente de Manning deseado. Mediante un ensayo de prueba y error se logró estimar una configuración de elementos que hacen que la velocidad del modelo sea la esperada. Se colocó pedazos de acrílico transversales al flujo de 0,3 centímetros de espesor. Estos elementos sumergidos dentro del flujo redujeron la velocidad hasta llegar a una velocidad de 21,41 cm/s lo cual representa un 7,59% de error. En cada intento por lograr una

configuración óptima se tomaron 10 mediciones de la velocidad del flujo en el modelo, por lo tanto el valor señalado corresponde a la media. El valor del error con el que vamos a trabajar en este modelo es aceptable para los fines que tiene este proyecto, ya que no estamos trabajando con la sección real del río. Por último es importante señalar que dicha configuración produjo un calado de 2 centímetros.

Tabla 8-2: Configuración de los obstáculos transversales al cauce.



Una vez obtenida la velocidad deseada procedemos a determinar el coeficiente de Manning que produce las obstrucciones puestas. Para ello ocuparemos en programa Flow Master V6.1. Utilizando los datos de diseño del modelo como ancho de 15 centímetros, caudal de $0,000667 \text{ m}^3/\text{s}$ y calado de 2 centímetros calculamos dicho coeficiente.

Figura 8-5: Cálculo del coeficiente de rugosidad para la disposición de elementos transversales.

Descripción		
Propiedades hidráulicas modelo		
Sección	Canal Rectangular	
Transversal		
Método	Formula de Manning	
Resolver para	Coeficiente de Manning “n”	
Ingresos de datos		
Pendien	0,019050	m/
te		m
Cala	0,02	m
do		
Anc	0,15	m
ho		
Cau	0,0007	m ³
dal		/s
Resultados		
Coeficiente de Manning	0,042	
Área Mojada	3,2e-3	m ²
Perímetro mojado	0,19	m
Ancho	0,15	m
Profundidad Crítica	0,01	m
Pendiente Crítica	0,0918	m/
	71	m

Resultados		
Velocidad	0,21	m/s
Cabeza de Velocidad	2,28e-	m
	3	
Energía específica	0,02	m
Número de Froude	0,47	
Tipo de Flujo	Sub-	
	crítico	

En la tabla anterior podemos observar que el coeficiente de Manning calculado como resultado de colocar las obstrucciones fue de 0,042. Este número corresponde al valor de rugosidad con el cual se está diseñando el modelo. La exactitud del número se debe a que en el programa no es posible ingresar el caudal exacto de $0,000667 \text{ m}^3/\text{s}$, si no que este automáticamente lo redondea a $0,0007 \text{ m}^3/\text{s}$. La precisión en los cálculos es suficiente para el propósito de este trabajo. Es importante observar que el número de Froude es menor que uno ($Fr=0,47 < 1$). Es importante también mencionar que el número de Froude del modelo ($Fr=0,47$) es muy parecido al del prototipo ($Fr=0,46$) con lo cual se cumple la semejanza de Froude del modelaje hidráulico. La diferencia entre los dos número es de un 2,17%.

8.5 PROCEDIMIENTO Y RESULTADOS.

8.5.1 SELECCIÓN DE VARIABLES.

Dentro de una experimentación se entiende como variable a todos los factores que son capaces de influir en el resultado. En este apartado procederemos a determinar cuáles son las

variables dentro de la experimentación y definiremos cuales son controladas, dependientes e independientes.

Dentro de la experimentación con el modelo las siguientes variables serán controladas:

- Pendiente
- Rugosidad
- Caudal
- Alineamiento
- Longitud de los espigones
- Permeabilidad de los espigones
- Altura de los espigones
- Calado

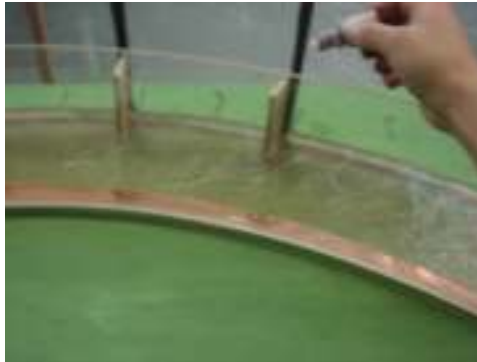
La selección de las variables dependientes e independientes se debe a la naturaleza de la experimentación que tiene objeto definir la distancia óptima que deben tener los espigones en este tramo del río. Para la experimentación se definió como variable independiente la separación de los espigones y como variable dependiente la velocidad del flujo. La selección de las variables dependientes e independientes parte del objetivo de la experimentación que consiste en determinar cómo influye la separación de los espigones en la velocidad del flujo.

8.5.2 PROCEDIMIENTO.

Una vez construido el modelo y calibrado se procedió a la experimentación. Para ello se fijo un calado de 2 centímetros utilizando un flujo continuo de agua. Primero se tomó datos de velocidad del flujo de agua sin la presencia de los espigones. Después se tomaron

mediciones de la velocidad del flujo con presencia de espigones. La separación de los espigones era variable, ya que se busca determinar cuál es la influencia de esta sobre la velocidad del agua.

Figura 8-6



Para el desarrollo de la experimentación se varió la distancia de separación de los espigones cada 5 centímetros. Se colocó un espigón en el medio de la curva y después se pusieron el resto de espigones a una distancia señalada. En total se utilizaron diez espigones y se verificaba que estos al ser colocados no sobrepasen el inicio y el final de la curva. Por lo tanto el número de espigones que se utilizaba variaba para cada separación.

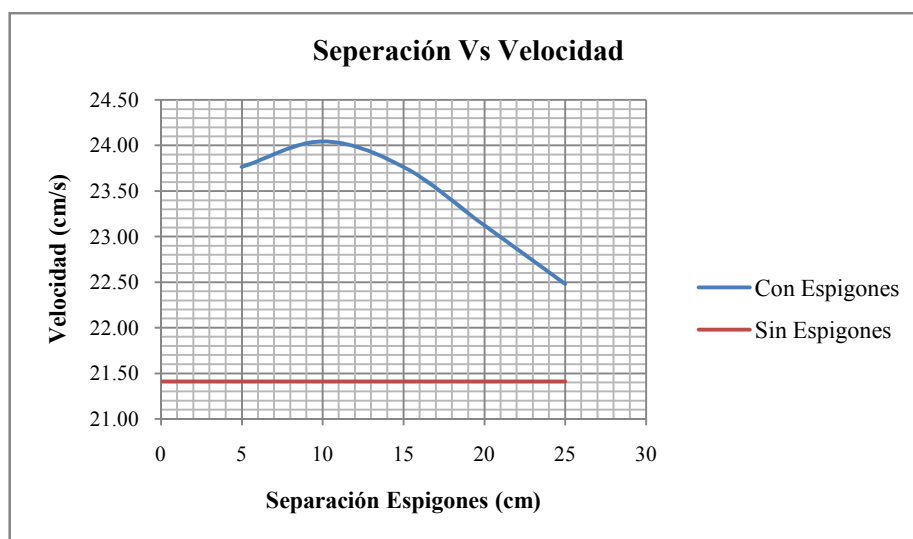
Para la medición de los datos se ocupó colorante, cronómetro y un flexómetro. Con ayuda del flexómetro se medía la distancia de afectación de los espigones. Después se arrojaba una gota de colorante al inicio de la zona de espigones y se tomaba el tiempo que el colorante demoraba en alcanzar el final de la zona con espigones. Este procedimiento se lo realizaba diez veces con el objetivo de poder obtener una media. Esto se lo realizaba debido a que los datos eran obtenidos de manera manual. Una vez tomado las diez mediciones de

tiempo se separaban 5 centímetros los espigones y se volvía a realizar el procedimiento antes descrito. Se experimento con separaciones de 5, 10, 15, 20 y 25 centímetros.

8.5.3 RESULTADOS

Con el tiempo medio obtenido mediante el procedimiento descrito anteriormente se procedió a calcular la velocidad del flujo para cada separación de los espigones. En el gráfico expuesto a continuación se ilustra la relación encontrada en el modelo entre la velocidad del flujo y la separación de los espigones.

Figura 8-7



En el gráfico podemos observar que mientras aumenta la separación de los espigones la velocidad del flujo aumenta hasta un cierto punto y después decrece. Aproximadamente, para este caso bajo las condiciones descritas anteriormente, la velocidad del flujo aumenta hasta una separación de los espigones de 10 centímetros ($S_m = 10$ cm). Esta distancia equivale a 2 veces la longitud de trabajo del espigón ($S_m = 2 L_t$). El objetivo de los espigones es que estos modifiquen el cauce del río mediante un auto ajuste del mismo. Por lo tanto se buscará

que los espigones logren el máximo aumento de la velocidad. Para la geometría del río será óptimo utilizar una separación de 20 metros ($S_p=200*S_m$). Para el diseño de los espigones en el presente trabajo se ocupó esta separación. Como vimos en el desarrollo de la teoría del presente trabajo esta es la distancia que es la recomendada por diversos autores como Juan Martín Vide. Los datos empleados para la elaboración del gráfico anteriormente citado se encuentran expuestos en el Anexo 3.

Como sabemos una reducción en la sección transversal implica un aumento en la velocidad del flujo ante un mismo caudal. Por ello resulta interesante saber el porcentaje que aumentó la velocidad ante la presencia de los espigones. En la tabla expuesta a continuación se muestra el aumento de velocidad utilizando tan solo los datos experimentales.

Tabla 8-3: Cambio de velocidades debido a la presencia de espigones

Separación (cm)	Razón de diferencia ($V_{Con\ espigones}/V_{Sin\ espigones}$)
5	1.11
10	1.12
15	1.11
20	1.08
25	1.05

De los resultados anteriores podemos ver que la velocidad del agua en el modelo aumentó en un 12% como máximo ante la presencia de espigones. En el río ocurrirá este mismo aumento de velocidad, por lo tanto fue preciso calcular la erosión que sufrirá el fondo del cauce utilizando la teoría de agua clara.

9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente trabajo se logró determinar la separación óptima que deben tener los espigones en el tramo de río que fue modelado. Debemos recordar que la separación de los espigones también se ve afectada por factores como la velocidad y la curvatura. Por lo tanto los resultados obtenidos del presente modelo tan solo pueden ser aplicables al tramo del río que fue modelado. La separación óptima de los espigones para esta sección del río fue de 4 veces la longitud de trabajo.

En el modelo se tenía previsto alcanzar una velocidad sin los espigones de 19.9 cm/s al aplicar todas las escalas de diseño. Sin embargo la velocidad real que se consiguió fue de 21.41 cm/s al colocar las obstrucciones en el canal. Esta velocidad mayor se puede atribuir a que las paredes laterales del modelo presentaban una rugosidad mucho menor a la diseñada, ya que no se colocaron obstrucciones en las mismas. La medición de velocidades durante la experimentación no son precisas debido a que estas fueron realizadas de manera manual, lo cual es una gran fuente de error. El método hidrométrico utilizado fue el del flotador y según diversos autores éste debe usarse tan solo cuando no se dispongan de otros instrumentos para medir la velocidad. Para el desarrollo del presente proyecto se ocupó este método debido a que con el caudal alcanzando con la bomba no se logró apreciar bien la altura de agua en un tubo pitot. Se recomienda para futuras prácticas aumentar el caudal para así lograr un mayor calado en el cual sea posible tomar mediciones utilizando un tubo pitot. Para lograr dicho fin será preciso proveer de otra bomba al modelo hidráulico.

El error en la calibración de la velocidad del modelo fue del 7,59%, pero este error no repercutió en gran medida al determinar al calcular los parámetros del modelo como el número de Froude o el coeficiente de rugosidad de Manning. El número de Froude del modelo fue de 0.47 mientras que el del prototipo fue de 0.46. Este número difiere en un 2,17% respecto al prototipo. Por lo cual se puede decir que el modelo está cumpliendo con el principio de la semejanza de Froude. El coeficiente de rugosidad de Manning que se consiguió en el modelo fue de 0,042. Este valor corresponde al coeficiente de rugosidad con el que el modelo fue diseñado.

Para determinar la separación de los espigones de forma empírica deberemos profundizar las investigaciones e incluir otros parámetros como la curvatura, la velocidad del flujo antes de la obstrucción, entre otros factores. En el modelo construido para el presente trabajo es posible variar la pendiente del canal, por lo cual se podrá realizar un estudio de la influencia que tiene los espigones ante diferentes velocidades o regímenes de flujo.

Los espigones son un sistema de defensa discontinua de los márgenes del río. La aplicación de estos debe ser ampliamente analizada antes de proponerlos como solución. En el caso del encauzamiento de del tramo modelado del río Chiche su aplicación no resulta muy óptima debido a que se debe construir un muro perimetral al cauce del río. Sin embargo esta solución traería menos alteraciones del río aguas abajo. El diseño propuesto cuenta un alineamiento que se ajusta a la curvatura original. Las curvas en el diseño de la nueva alternativa no presentan cambios bruscos de curvatura por lo que no existirá una socavación del fondo del río muy severa, con ello el problema de transporte sólidos no será trascendental.

En el diseño propuesto se encauzó 453,63 metros lineales a un costo 175.395,63 dólares americanos tomando como referencia precios actuales. Es evidente que la cantidad de material el cual es movido cuando se construyen espigones es mucho menor que cuando se reconfigura el alineamiento embaulando el río, como se lo hizo en este tramo del Río Chiche al hacerlo recto. El encauzamiento del río bajo esta alineación trajo problemas como la erosión del talud derecho el cual afectó a la ciclo vía del Chaquiñan y la playas que se formaron aguas abajo. El río en busca de un reajuste ante la nueva configuración se apego al talud y posteriormente lo erosionó haciendo necesario la construcción de espigones. Por tal razón, una intervención más suave como la propuesta no hubiese generado tales problemas.

Según la granulometría realizada se estimó que el material sub-superficial que conforma el cauce tiene un diámetro de partícula medio de 3,5 centímetros. Para los cálculos se supuso que éste material puede ser transportado por el río. Sin embargo, el río Chiche al tener un cauce conformado por rocas sedimentarias posee partículas con mucho mayor tamaño. Estas partículas se encuentran dispuestas de tal manera que conforman una coraza en el fondo y en las paredes del cauce, haciendo que el río sea capaz de tolerar una velocidad mayor a la que se está considerando para el diseño.

Por último para la construcción es recomendable colocar el material producto de la excavación alrededor de los espigones con el fin de prevenir la erosión inicial. En este río en particular este material tiene la ventaja de ser de gran tamaño por lo cual este no podrá ser transportado por el agua.

La reconfiguración del alineamiento del río a una recta aumenta la velocidad del río a 2.29 m/s, los cálculos están expuestos en el Anexo 4. Esta velocidad es un 10% mayor que

la velocidad del río antes de sufrir el cambio de alineamiento. Con los espigones logramos un aumento de la velocidad del flujo en un 12% pero después de un tiempo, a medida que el río se reajuste y erosione el margen opuesto a los espigones, esta velocidad disminuirá y será muy parecida a la original de 2.09 m/s. Esto es posible gracias a que con los espigones dejamos aun ciertos grados de libertad, como el ancho del cauce y la profundidad, en los que el río puede reajustarse. Por otro lado el cambio de alineación a una recta hace que la velocidad a la salida de la zona intervenida aumente. A diferencia con los espigones la velocidad no puede disminuir debido a que el río posee un cauce fijo el cual no puede reajustarse.

10 ANEXOS

Anexo 1

Material sub-superficial del cauce del Río Chiche					
Malla No.	Diámetro (mm)	Masa de Suelo Retenido (kg)	Retenido acumulado (kg)	% Retenido	% Pasa
4	100	0.00	0	0.00	100.00
3	75.00	2.46	2.46	10.73	89.27
2	50.00	3.88	6.34	27.60	72.40
1 1/2	37.50	4.75	11.09	48.28	51.72
1	25.0	5.89	16.98	73.94	26.06
3/4	18.750	3.04	20.02	87.17	12.83
1/2	12.50	0.72	20.74	90.31	9.69
3/8	9.50	0.90	21.64	94.21	5.79
No. 4	4.75	0.47	22.12	96.28	3.72
Pasa No. 4		0.31	22.42	97.62	2.38

Tamaño muestra (kg) 22.97

Anexo 2

Construcción de gaviones					
RUBRO :	UNID AD :	M3	RENDIMIENTO :	1.08	
A.- MATERIALES	UNID.	CANTIDAD	P. UNITARIO	TOTAL UNIT.	%
		(A)	(B)	(C) = (A x B)	
Piedra Bola Negra (Gavión)	M3	1.15	7.90	9.09	13.46
Malla Gavión 2x1x1	U.	0.50	39.46	19.73	29.23
Alambre Galvanizado # 18	Kg.	0.80	1.14	0.91	1.35
SUB-TOTAL MATERIALES (A)				29.73	44.04
B.- MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS	CANT.	TARIFA A	COSTO HORA	TOTAL UNIT.	
	(A)	(B)	(C) = (A x B)	(D) = (C / R)	
Herramientas Manuales	1.00	0.50	0.50	0.46	0.69
SUB-TOTAL MAQUINARIAS Y HERRAMIENTAS (B)				0.46	0.69
C.- MANO DE OBRA	CANT.	JORNAL / HR.	COSTO HORA	TOTAL UNIT.	
	(A)	(B)	(C) = (A x B)	(D) = (C / R)	
Peón (Cat. I)	9.00	2.13	19.17	17.75	26.29
Maestro de estructura mayor SECAP (Cat. V)	1.00	2.13	2.13	1.97	2.92
SUB-TOTAL MANO DE OBRA (C)				19.72	29.21
D.- TRANSPORTE	DIST.	T - M3	COSTO M3/KM	TOTAL UNIT.	
	(A)	(B)	(C)	(D) = (A x B x C)	
Piedra Bola Negra (Gavión)	85.00	1.15	0.18	17.60	26.06
SUB-TOTAL TRANSPORTE (D)				17.60	26.06
TOTAL DE COSTOS DIRECTOS (A + B + C + D)				67.51	100.00
COSTOS INDIRECTOS	0.25			16.88	
PRECIO UNITARIO ASUMIDO			USDS	84.38	

RUBRO :	Excavación sin clasificar a máquina en agua					
		UNIDAD :	M3	RENDIMIENTO :	1	
A.- MATERIALES	UNID.	CANTIDAD	P. UNITARIO	TOTAL UNIT.	%	
		(A)	(B)	(C) = (A x B)		
SUB-TOTAL MATERIALES (A)				0.00	0.00	
B.- MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS	Horas Equipo	TARIFA A	COSTO HORA	TOTAL UNIT.		
	(A)	(B)	(C) = (A x B)	(D) = (C / R)		
Herramientas Manuales	0.32	0.50	0.16	0.16	6.40	
Retroexcavadora	0.08	25.00	2.00	2.00	79.97	
SUB-TOTAL MAQUINARIAS Y HERRAMIENTAS (B)				2.16	86.37	
C.- MANO DE OBRA	Horas Hombre	JORNAL / HR.	COSTO HORA	TOTAL UNIT.		
	(A)	(B)	(C) = (A x B)	(D) = (C / R)		
Ayudante Operador CAT II	0.08	2.13	0.17	0.17	6.81	
Operador CAT GI	0.08	2.13	0.17	0.17	6.81	
Maestro de Obra CAT IV	0.01	2.13	0.02	0.02	0.85	
SUB-TOTAL MANO DE OBRA (C)				0.34	13.63	
D.- TRANSPORTE	DIST.	T - M3	COSTO M3/KM	TOTAL UNIT.		
	(A)	(B)	(C)	(D) = (A x B x C)		
SUB-TOTAL TRANSPORTE (D)				0.00	0.00	
TOTAL DE COSTOS DIRECTOS (A + B + C + D)				2.50	100.00	
COSTOS INDIRECTOS	0.25			0.63		
PRECIO UNITARIO ASUMIDO			USDS	3.13		

Colocación del material alrededor de los espigones					
RUBRO :		UNIDAD :	M3	RENDIMIENTO :	1
A.- MATERIALES	UNIDAD	CANTIDAD	P. UNITARIO	TOTAL UNIT.	%
		(A)	(B)	(C) = (A x B)	
SUB-TOTAL MATERIALES (A)				0.00	0.00
B.- MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS	Horas Equipo	TARIFA	COSTO HORA	TOTAL UNIT.	
	(A)	(B)	(C) = (A x B)	(D) = (C / R)	
Retroexcavadora	0.08	25.00	2.00	2.00	85.44
SUB-TOTAL MAQUINARIAS Y HERRAMIENTAS (B)				2.00	85.44
C.- MANO DE OBRA	Horas Hombre	JORNAL / HR.	COSTO HORA	TOTAL UNIT.	
	(A)	(B)	(C) = (A x B)	(D) = (C / R)	
Ayudante Operador CAT II	0.08	2.13	0.17	0.17	7.28
Operador CAT GI	0.08	2.13	0.17	0.17	7.28
SUB-TOTAL MANO DE OBRA (C)				0.34	14.56
D.- TRANSPORTE	DIST.	T - M3	COSTO M3/KM	TOTAL UNIT.	
	(A)	(B)	(C)	(D) = (A x B x C)	
SUB-TOTAL TRANSPORTE (D)				0.00	0.00
TOTAL DE COSTOS DIRECTOS (A + B + C + D)				2.34	100.00
COSTOS INDIRECTOS		0.25		0.59	
PRECIO UNITARIO ASUMIDO			USD\$	2.93	

Anexo 3

Separación (cm)	Velocidad (cm/s)
Sin espigones	21.41
5	23.77
10	24.04
15	23.77
20	23.12
25	22.48

Anexo 4

Utilizando la Ecuación 3-4 calculamos el coeficiente de rugosidad teniendo en cuenta la modificación del alineamiento.

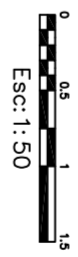
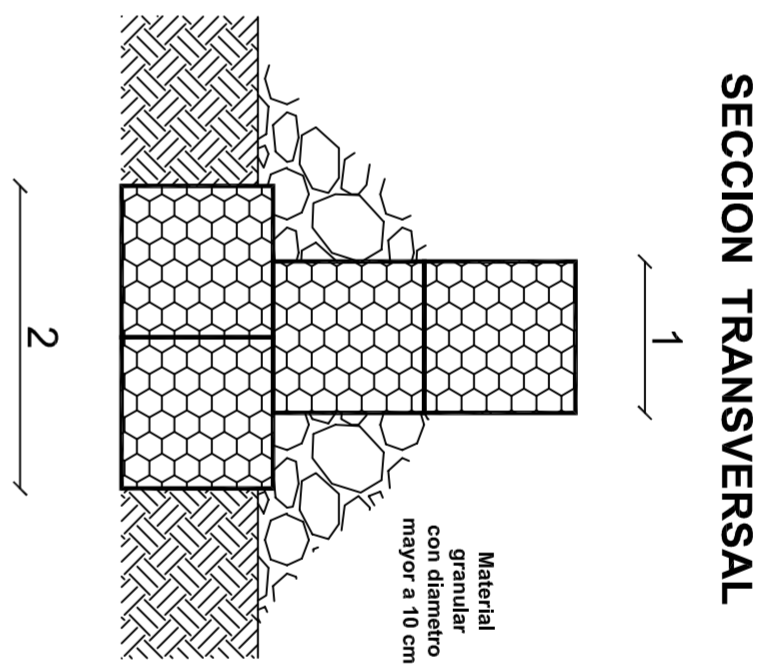
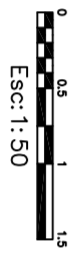
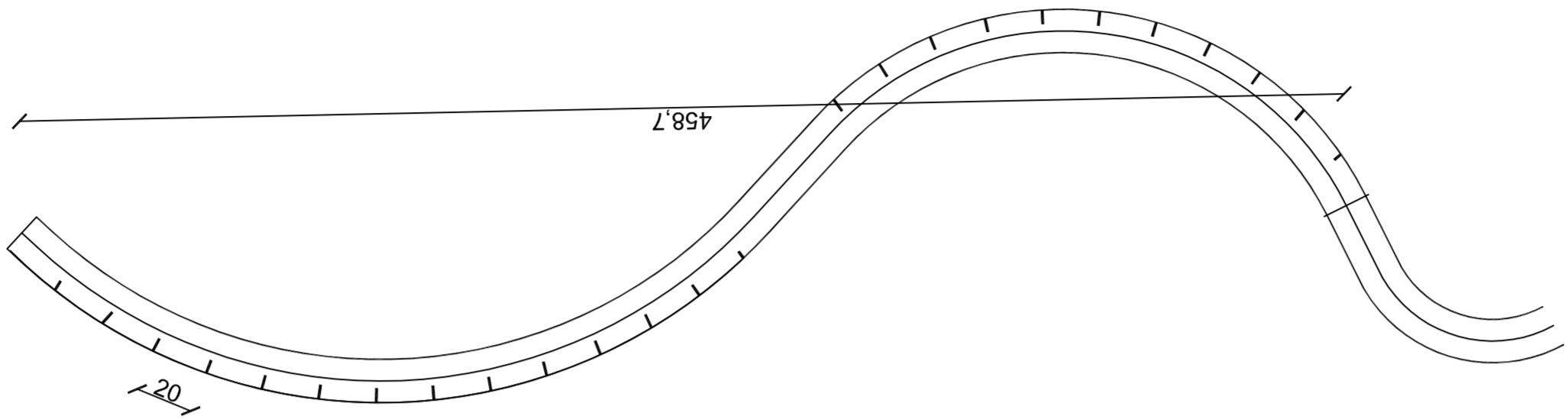
$$n = (0,028 + 0,02 + 0,01) * 1,00 = 0,058$$

Una vez calculado el coeficiente de Manning para el río con alineamiento recto procedemos a calcular la velocidad del agua suponiendo un caudal para de cauce lleno de $65.69 \text{ m}^3/\text{s}$.

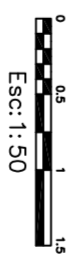
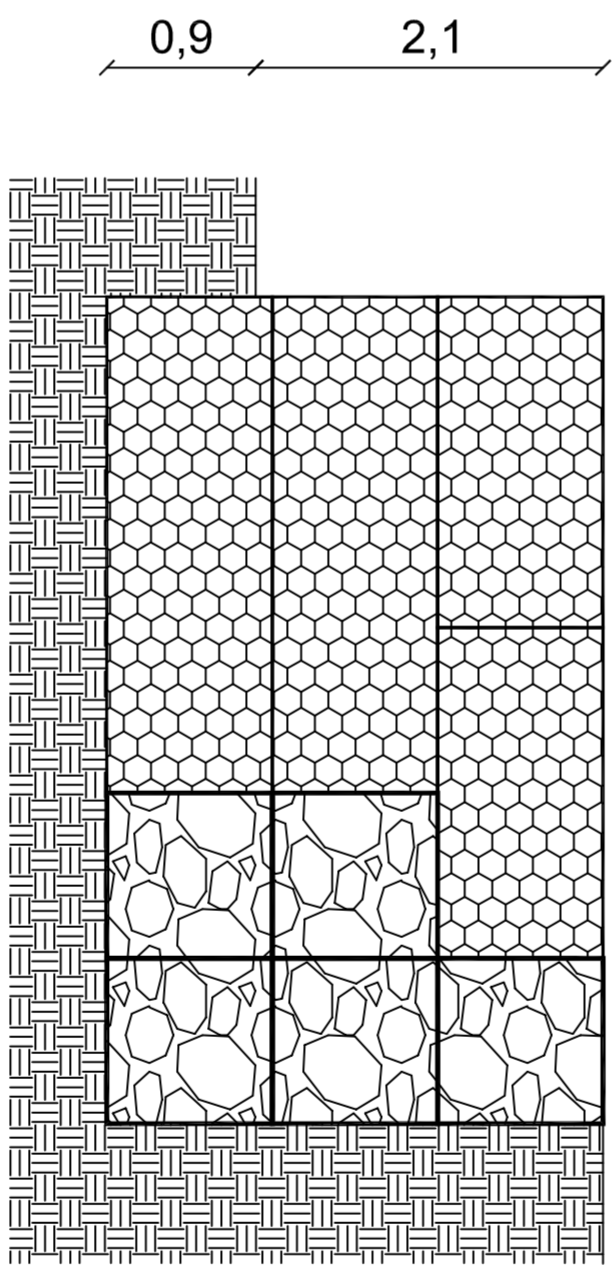
Descripción del proyecto	
Canal	Canal Rectangular - Prototipo río alineamiento recto.
Método	Formula Manning
Resolver	Calado
Datos Ingresados	
Coeficiente de Manning	0,058

Datos Ingresados		
Pendiente	0,010000	m/m
Caudal	65.69	m ³ /s
Ancho	15,00	m
Resultados		
Descarga	65.69	m ³ /s
Área Mojada	29.7	m ²
Perímetro Mojado	18.83	m
Ancho	15,00	m
Profundidad	1,25	m
Crítica		
Pendiente Crítica	0,0376	m/m
Velocidad	2,29	m/s
Cabeza de	0,29	m
Velocidad		
Energía Especifica	2,18	m
Número de	0,53	
Froude		
Tipo del Flujo	Sub-crítico	

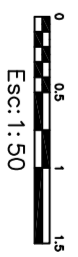
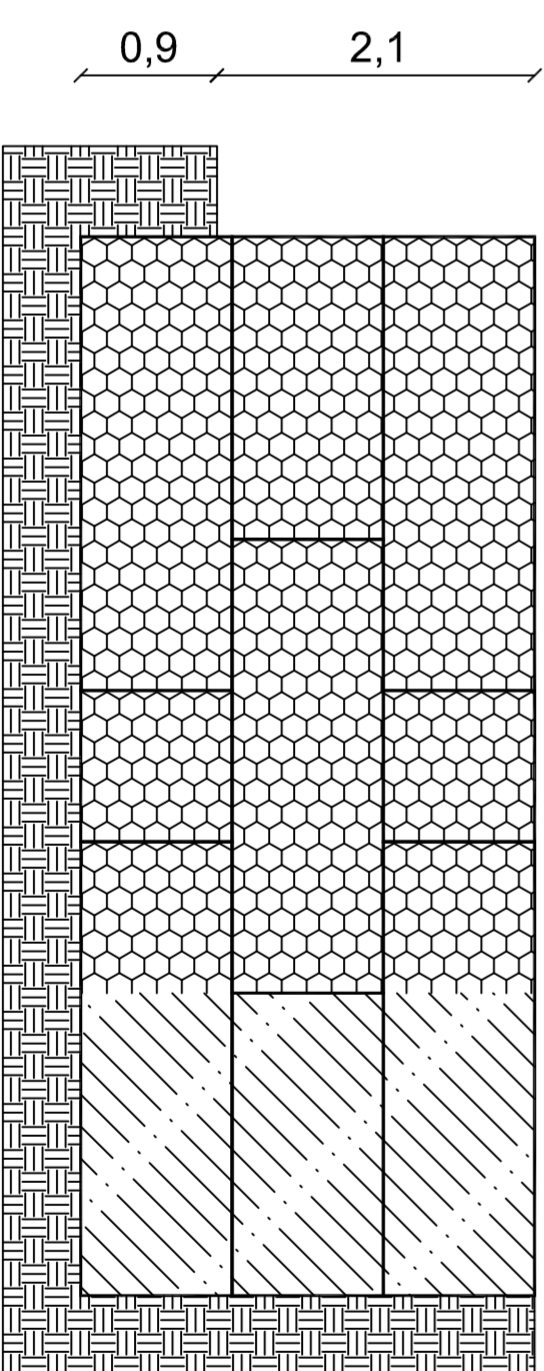
Anexo 5



ESPIGON TIPO MEANDRO SUR



ESPIGON TIPO MEANDRO NORTE



C-1

ESCALA: INDICADA

ESPIGONES

ENCAUZAMIENTO DE LA CURVA DEL RIO CHICHE

PUEMBO

PICHINCHA

Universidad San Francisco de Quito

Diseñado J.P.V

Fecha 22/11/2010

SIMBOLO

DESCRIPCION

DIA

REVISION

11 BIBLIOGRAFÍA

Akan, Osama. Open Chanel Hidraulic. Oxford: Elsevier, 2006.

Alambrec, Ideal. "Ideal Alambrec." 2010. 13 Octubre 2010

<<http://www.idealalambrec.com/web/ideal>>.

Alfredobi. "Wikipedia." 1999. 26 09 2010

<<http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Espigones.jpg>>.

Chow, Ven Te. Hidraulica de los canales abiertos. Colombia: Nomos, 1994.

—. Hidráulica de los canales abiertos. Colombia: Nomos, 1994.

Das, Braja M. Fundamentos de Ingenieria Geotécnica. Sacramento: Thomsom Learning, 2001.

—. Fundamentos de Ingeniería Geotécnica. Sacramento: Thomsom Learning, 2001.

Felices, Arturo Rocha. "Consideraciones sobre las defensas fluviales a base de espigones." XVI Congreso de Ingeniería Civil. Arequipa, 2007. 44.

—. "Consideraciones sobre las defensas fluviales a base de espigones." XVI Congreso de Ingeniería Civil. Arequipa, 2007. 44.

MACCAFERRI. "Defensas Ribereñas." Deflectores.

Russell, George. Hidráulica. México: CECSA, 1976.

—. Hidráulica. Mexico: CECSA, 1976.

Vide, Martín. Ingeniería Fluvial. Colombia: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 2003.

—. Ingeniería Fluvial. Colombia: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 2003.

Vide, Matín. Ingeniería de Ríos. Catalunya : Alfaomega, 2003.

—. Ingeniería de Ríos. Catalunya: Alfaomega, 2003.