

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE CIVIL

DISERTACIÓN DE GRADO PREVIA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERÍA CIVIL

"MODELO HIDRÁULICO DE UN CANAL EN CURVA PARA ESTUDIAR LA INCIDENCIA DE LOS ESPIGONES EN EL CONTROL DE LA EROSIÓN"

SARA ALEJANDRA VALDOSPINOS NAVAS

Quito, 2011

Agradecimientos

Para poder realizar esta tesis de la mejor manera posible fue necesario el apoyo de muchas personas a las cuales quiero agradecer.

En primer lugar a mis padres, Sonia y Néstor ,por su apoyo y amor en todo momento.

A mis hermanas y amigas, por todo lo compartido, su ayuda y apoyo sin condiciones.

A mis amigos, compañeros y profesores de la PUCE, que formaron parte de esta aventura y siempre se quedarán en mis recuerdos.

RESUMEN

El presente trabajo se trata de la construcción de un modelo hidráulico de un canal en curva con el objetivo de estudiar la incidencia de los espigones en el control de la erosión.

En primer lugar, para un mejor entendimiento del tema tenemos los conceptos básicos, la clasificación, la historia, los objetivos, los criterios de diseño y las ventajas del espigón. Así también una explicación completa de los modelos hidráulicos, los objetivos, las escalas para poder escoger la mejor para el modelo a construirse.

A continuación, se detalla la construcción del modelo, como se obtuvieron las medidas, los materiales con los que se construyó el modelo, también la construcción del modelo es decir la unión de cada una de sus partes y por último la calibración del modelo para poder realizar los ensayos. De la misma manera se construyeron los espigones.

Una vez construido y calibrado el modelo se prosiguió con las prácticas, se realizaron 5 prácticas, en las cuales se colocó los espigones a diferente distancia para ver cuál es la más óptima en el control de la erosión en canales en curva.

Por último, se analizaron los resultados obtenidos en las prácticas en lo referente a velocidad del agua en el canal con lo que se prosiguió a realizar las conclusiones y recomendaciones de la disertación.

TABLA DE CONTENIDOS

1. Capítulo: Antecedentes 10

1.1. Generalidades 10

1.1.1 Introducción 10

1.1.2 Espigones Permeables 14

1.1.3 Espigones Impermeables 16

1.1.4 Materiales Constructivos 17

1.1.5 Mantenimiento 17

1.2. Historia del uso de espigones en cauces naturales 17

1.3. Objetivo de usar los espigones en el control de la erosión 18

1.4. Criterio de diseño de los espigones 20

1.4.1 Introducción 20

1.4.2 Orientación de los Espigones 22

1.4.3 Socavación 24

1.4.4 Longitud del espigón. 27

1.4.5 Separación de los espigones. 28

1.5. Ventajas del uso de espigones 31

2. Modelos hidráulicos 33

2.1. Objetivo de la modelación física 33

2.2. Selección de las variables 34

2.3. Semejanza geométrica 34

2.4. Similitud cinemática 35

2.5. Similitud dinámica 36

2.6. Condiciones de similitud 37

2.6.1 Número de Froude (Fr) 37

2.6.2 Número de Reynolds (Re) 38

2.7. Justificación de las escalas en el modelo 39

2.7.1 Definición 39

2.7.2 Selección de Escala 40

3. Capítulo 3: Construcción del modelo 42

3.1. Introducción 42

3.1.1 Ríos 44

3.2. Obtención de las medidas del modelo en función de las escalas seleccionadas 46

3.3. Planos del modelo 48

3.4. Materiales seleccionados para construir el modelo 50

3.4.1 Acrílico 51

3.5. Secuencia fotográfica explicativa en construcción del modelo 53

3.5.1 Construcción de la mesa de soporte del modelo físico y de la bomba de succión. 53

3.5.2 Colocación del canal curvo sobre la mesa de soporte. 54

3.5.3 Instalación del sistema de recirculación del agua 56

3.6. Secuencia fotográfica en donde se observa la calibración del modelo 57

3.6.1 Tubo Pitot 58

3.6.2 Toma de datos 60

3.6.3 Resultados 62

4. Capítulo 4 Prácticas de laboratorio 64

4.1. Introducción general 64

4.2. Selección del material para la construcción de los espigones. 64

Los espigones utilizados en los ensayos son espigones impermeables y tienen las siguientes características físicas y geométricas: 64

4.3. Elaboración del modelo general para toma de datos 66

4.4 Práctica # 1 67

4.3.1. Espigones expuestos en la entrada y salida de la curva. 67

4.4.2 Toma de datos ... 68

4.4.3 Análisis de los resultados ... 68

4.5 Práctica # 2 ... 69

4.5.2 Espigones ubicados cada 30˚. ... 69

4.5.3 Toma de datos ... 69

4.5.4 Análisis de los resultados ... 70

4.6 Práctica # 3 ... 70

4.6.2 *Espigones ubicados cada 45˚.* ... 70

4.6.3 Toma de datos ... 71

4.6.4 Análisis de los resultados ... 71

4.7 Práctica # 4 ... 72

4.7.1 Espigones ubicados cada 20˚. ... 72

4.7.2 Toma de datos ... 73

4.7.3 Análisis de los resultados ... 73

4.8 Práctica # 5 ... 74

4.8.1 Espigones expuestos en la entrada y salida de la curva ubicados cada 60˚. ... 74

4.8.2 Toma de datos ... 74

4.8.3 Análisis de los resultados ... 75

4.9 Conclusiones de las prácticas. ... 75

5 Capítulo 5 Conclusiones y Recomendaciones ... 78

5.2 Conclusiones ... 78

5.2 Recomendaciones ... 80

6 Bibliografía ... 81

Justificación:

La investigación es uno de los pilares del desarrollo educativo en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, ya que es parte de los lineamientos propuestos en el anteproyecto de la Ley de Educación Superior.

Una prioridad de la Facultad de Ingeniería de la PUCE es disponer de los instrumentos necesarios que permitan realizar las tareas de investigación, desarrollo tecnológico y prestación de servicios de alta especialización mediante la utilización de técnicas teóricas, experimentales y de simulación en modelos físicos y matemáticos, relacionadas con los problemas hidráulicos; así como maestrías en esta área. El Modelo hidráulico de un canal en curva para estudiar la incidencia de los espigones en el control de la erosión sería una pieza importante para estas tareas.

Si nos remitimos al campo académico es importante que los alumnos observen la incidencia de los espigones no solamente mediante fórmulas empíricas sino también bajo la visualización del fenómeno hidráulico en tres dimensiones que únicamente pueden ser visualizadas en un modelo físico a escala, como el propuesto.

Alcance:

El presente estudio comprende:

- Construcción del modelo físico.
- Calibración del modelo.
- Diseño de las prácticas para laboratorio.
- Planos finales de la ubicación

Objetivos:

a) Objetivo general:

Construir un modelo físico a escala en el laboratorio de hidráulica de la facultad de ingeniería para el estudio de la incidencia de espigones.

b) Objetivo específico:

1) Ver la incidencia de los espigones con diferentes alturas de agua en el canal circular.
2) Realizar una comparación de la efectividad de la disipación de la energía los espigones en función de la geometría.
3) Realizar una comparación de la efectividad de la disipación de la energía en función de la ubicación de los espigones.
4) Realizar, dentro de lo posible, recomendaciones del uso de espigones que podría ser utilizada en el control de la erosión en los ríos de nuestro país.

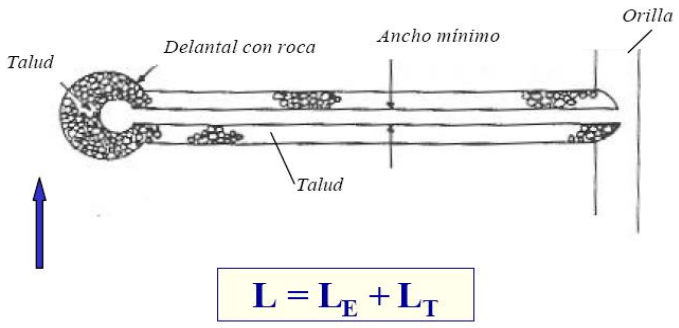
1. Capítulo: Antecedentes

1.1. Generalidades

1.1.1 Introducción

Los espigones son diques transversales a los flujos normales de agua en canales o cauces naturales, implantados en la orilla en donde pueden estar empotrados o no, y penetran dentro de la corriente. Esto los hace muy vulnerables a la acción del agua.

Normalmente son más bajos que las orillas del cauce principal de modo que quedan sumergidos bajo las aguas altas de las grandes crecidas. Pueden ser permeables ("abiertos") o impermeables ("cerrados"). La circulación de las aguas altas de las crecidas es un tanto controlada por los espigones. Esto puede causar una pérdida de capacidad hidráulica en el cauce, pero al mismo tiempo tiene como beneficio acentuar la tendencia a la sedimentación de finos en los espacios entre espigones, lo que permite reducir poco a poco el ancho del río y formar un cauce principal estable y único. (Sin la presencia de meandros, no trenzado).



En donde:

- L: Longitud del espigón (m)
- Le: Longitud de anclaje (m)
- Lt: longitud efectiva (m)

Figura 1.1 Esquema típico de un espigón U.S Department of Transportation

Fuente: *Ing. Arturo Rocha Felices, Consideraciones sobre las defensas fluviales a base de espigones, XVI Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Arequipa, 2007*

En la figura 1.1 se puede observar las partes constitutivas de un espigón: una que se desarrolla al interior del terreno natural denominada $L_{E;}$ y, la otra que se desarrolla en el cauce del río o canal que se denomina $L_{T.}$ La parte del espigón que se denomina L_E corresponde a la longitud de anclaje, es la parte del espigón que se encuentra dentro del terreno natural y su función consiste en disminuir la posibilidad de que exista flujo detrás del mismo. Esta longitud hace que, si existe erosión en las primeras etapas de su funcionamiento, el espigón no quede separado de la margen. Por su parte, $L_{T,}$ se denomina a la longitud efectiva de trabajo, y de esta magnitud depende el éxito del funcionamiento del espigón como un 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 del espigón. Esta deberá tener algún tipo de protección, ya que en sus alrededores se produce socavación. La cresta está constituida por la parte superior del espigón y es la longitud desde la orilla hasta la punta del espigón, puede estar sumergida o no dentro del cauce del Río. Por último, el espigón al igual que cualquier estructura u obra civil tiene una cimentación, considerándose necesario la conveniencia de planificar y realizar una cimentación profunda, para evitar todos los problemas que acarrea la erosión.

La operación óptima de los espigones se obtiene del funcionamiento adecuado de todas las obras que conforman el conjunto del mismo, pues los efectos disminuyen si trabajan como elementos aislados. La planificación de varios espigones en un tramo corto del río o canal, trata de formar una orilla virtual. Cuando se planifica un espigón aislado se trata del caso de un deflector.

Los principales objetivos que se trata de alcanzar con la construcción de los espigones son:

- Defender las márgenes del río en contra de la erosión;
- Formar un cauce más profundo; y,
- Desviar o reorientar la corriente.

Para conseguir los objetivos anteriores en puntos del cauce del río o canal en donde el espigón está presente, su implantación ejerce un control y una influencia sobre el flujo del agua, modificando el área, variando la velocidad y a la vez desviando la dirección de la corriente, estableciendo un flujo o movimiento del agua con un margen o ancho fijo.

Existen varias formas de implantación y diseño de los espigones, dependiendo del objetivo a alcanzar con su diseño y construcción, entre las cuales tenemos:

- Espigones rectos: estos espigones pueden tener o no un ángulo con respecto a la orilla. Este ángulo se determina según la función que va a cumplir el espigón. Generalmente, tienen la cabeza redondeada le da mayor resistencia y por lo tanto más rigidez al espigón, al mismo tiempo que lo protege de la socavación.



Figura 1.2 Formas de espigones, espigón recto con punta redonda.

Fuente: *Ing. Arturo Rocha Felices, Consideraciones sobre las defensas fluviales a base de espigones, XVI Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Arequipa, 2007*

- Espigones en forma de "L": tiene la misma geometría y el esquema es igual que aquel del espigón en ángulo recto, la diferencia radica en que al final de su tramo recto perpendicular al eje del río o canal posee un vértice con un tramo perpendicular a la longitud de trabajo del espigón en ángulo recto. Este tipo de espigón permite estancar el agua en medio de dos espigones continuos, alcanzando de esta manera mejorar sus efectos. Una variante de este tipo de espigones es el espigón en forma de "T" cuya forma es equivalente a una doble.

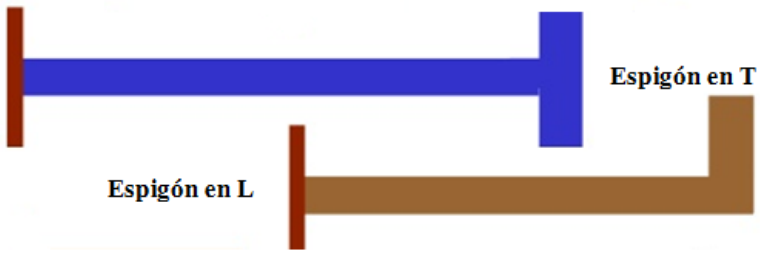


Figura 1.3 Formas de espigones, espigón en forma de "L" y "T".

Fuente: *Ing. Arturo Rocha Felices, Consideraciones sobre las defensas fluviales a base de espigones, XVI Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Arequipa, 2007*

- Espigones en forma de "J": el espigón en forma de "J" o palo de hockey es usado en un número limitado de situaciones, puesto que no parecen proporcionar ningún beneficio mayor que aquellas que se pueden lograr con el uso de otro tipo de espigones.

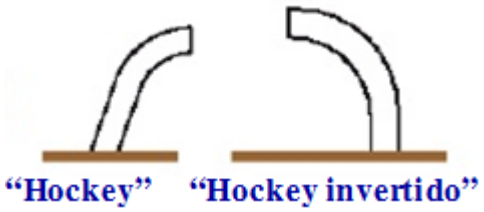


Figura 1.4 Formas de espigones, espigón en forma de "J".

Fuente: *Ing. Arturo Rocha Felices, Consideraciones sobre las defensas fluviales a base de espigones, XVI Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Arequipa, 2007*

1.1.2 Espigones Permeables

Cuando se quiere lograr sedimentación en la parte posterior aguas arriba de los espigones con el fin de formar playas, los espigones tipo permeables son los recomendados cuyas características de diseño y funcionamiento son de gran utilidad para alcanzar este objetivo. Cuando el espigón es poroso admite el paso del agua a baja velocidad, forzando, por lo tanto, que el caudal sólido se detenga y sedimente. La permeabilidad de un espigón se lo mide por su porosidad, la cual se la puede medir y expresar en porcentaje, en función de la relación que tiene el volumen de vacíos con el volumen total del material utilizado en la construcción del espigón. Estos espigones también se les conocen o son llamados retardadores, ya que además tienen como función disminuir la velocidad del agua cerca de las márgenes de los cauces de los ríos o canales. Generalmente se encuentran más separados que los impermeables.

Los materiales utilizados en la construcción de los espigones permeables deben disponer de la suficiente porosidad como para permitir que todo el caudal del agua o líquido pase a través de los poros o huecos dejados para este efecto. Este movimiento del agua a través de los poros, ocasionará una pérdida energética causada por el paso del agua a través de las porosidades del espigón y, como consecuencia de esta pérdida, la velocidad disminuirá, lo que permitirá la sedimentación de las partículas sólidas acarreadas y

presentes en forma natural en el agua de los ríos y canales. Posteriormente, con el transcurso del tiempo y la ocurrencia de crecidas, el espacio entre un espigón y otro se llenara de sedimentos, formando una playa sobre la cual crecerá vegetación. Este sistema de manejo y defensa de las márgenes de un río o canal puede ser ajustado conforme se requiera.

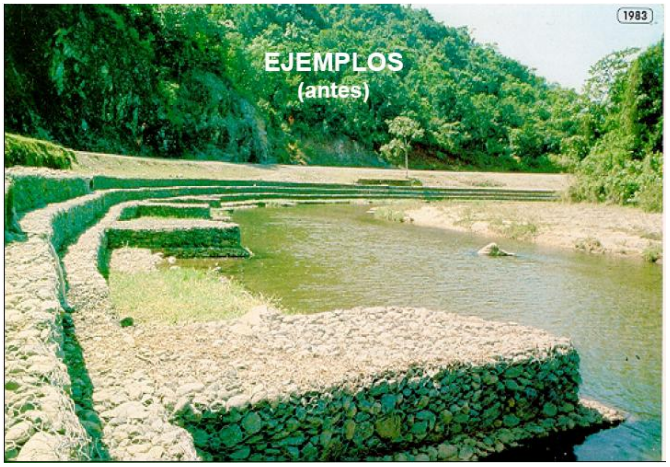


Figura 1.5 Espigón Permeable

Fuente: Maccaferri, Obras Fluviales Deflectoras, http://www.maccaferri.com.br, Diciembre 2010



Figura 1.6 Espigón Permeable

Fuente: Maccaferri, Obras Fluviales Deflectoras, http://www.maccaferri.com.br, Diciembre 2010

1.1.3 Espigones Impermeables

Los espigones impermeables funcionan como deflectores de la corriente de agua en los cauces naturales y ríos. Este tipo de espigones son ampliamente utilizados en ríos navegables cuando se quiere mantener el cauce estable con un determinado calado; tienen la función de desviar el flujo de la orilla y concentrar el mismo en la parte central del cauce. Los espigones impermeables se los puede utilizar también cuando se quiere lograr un estrechamiento de la sección del cauce para aumentar el calado. Este efecto de la construcción de los espigones impermeables se lo conoce como profundización del cauce. La idea primordial de esto es eliminar el grado de libertad del movimiento del agua en el cauce del río, controlando su mecánica natural y haciéndolo de un ancho definido, por lo que el único mecanismo de autoajuste permitido es un aumento de calado. En general, con un sistema de espigones impermeables se busca disminuir el área de flujo y aumentar la velocidad media de la corriente.

1.1.4 Materiales Constructivos

Los espigones pueden ser construidos con un sin número de materiales, la mayoría de los cuales se encuentran en el cauce del río o canal en la zona de intervención. Entre los materiales más comunes se encuentran los siguientes: tabla-estacados de madera o concreto, troncos de árboles y ramas, elementos prefabricados de mortero o concreto, elementos prefabricados de acero y alambre, y con gaviones (cajas conformadas con mallas de alambre llenas de material pétreo).

1.1.5 Mantenimiento

Para garantizar una operación adecuada de los espigones y que cumplan con el propósito para los que fueron construidos, es necesario planificar la reparación y mantenimiento de los mismos, cuyas labores generalmente se las realiza en época de estiaje para garantizar la seguridad y la terminación de los trabajos programados. La reparación y el mantenimiento se deberá planificar para hacerse después de cada crecida importante, ya que el río lleva consigo diferentes materiales que se quedan en el cauce y entre los espigones y que pueden utilizarse en estas labores. El diseño puede irse mejorando, como parte de las labores de mantenimiento y como consecuencia de las observaciones que se realicen de su funcionamiento.

1.2. Historia del uso de espigones en cauces naturales

La utilización de espigones para obras de encauzamiento de los grandes ríos europeos, empezaron en el Siglo XIX, en ríos de poca o baja pendiente y cuya morfología era trenzada con la presencia de meandros. El objetivo principal de su planificación y construcción fue sanear zonas pantanosas para evitar la incubación de vectores que causaban las enfermedades contagiosas, como el paludismo y también estabilizar el cauce. El procedimiento estaba dirigido a obtener que el río formase un cauce único más

profundo. Desde finales del Siglo XIX, durante el Siglo XX y parte del Siglo XXI se ha tenido como objetivo el tratar de mantener un cauce estable con suficiente calado para garantizar la navegación.

En los Estados Unidos fue desarrollada desde 1988 una estación experimental que construya e investigue el comportamiento de espigones, para lo cual se han sustentado en la construcción modelos físicos a escala para observar, analizar y estudiar su comportamiento y los efectos de su construcción.

En algunos países se han planificado y estudiado varias formas de un cauce de aguas bajas inscrito en otro de aguas altas un poco más ancho utilizando modelos físicos a escala de espigones, que a su vez se encuentren inscrito dentro de otros más anchos que permitan circular las grandes crecidas.

1.3. Objetivo de usar los espigones en el control de la erosión

Desde tiempos muy antiguos, el hombre en su afán por aprovechar de mejor manera los ríos, se ha ingeniado numerosos sistemas de aprovechamiento de los mismos. En los ríos maduros como en el río Rin tiene un sistema de defensas desarrollado a lo largo de muchos años, lo que ha permitido obtener beneficios, existiendo hoy en día asentamientos humanos, fábricas, parques, escenarios culturales y deportivos, etc. a orilla de este río con características seguras, estables y garantizando un manejo ambiental positivo por efecto de las obras planificadas y construidas.

Por otro lado, la realidad geomorfológica en el Ecuador es que está conformado por estructuras geológicas jóvenes, recientes y como resultado de esto la presencia de ríos jóvenes, los cuales tiene un comportamiento dinámico pues su curso y la forma de este están en constante cambio. Esto trae consigo numerosos problemas de movilidad e inestabilidad fluvial no resueltos y los consecuentes efectos como deslizamientos e inundaciones que tantos daños causan. Una de las formas de controlar y defenderse de

esos cambios fluviales, es decir, de controlar la inestabilidad fluvial y de manejar un río, es planificar y construir defensas que permitan un funcionamiento controlado de los mismos.



Figura 1.2 Espigones construidos con gaviones, para proteger las márgenes de un río. Fuente: Enciclopedia Wikipedia, Espigones, internet www.wikipedia.com, Diciembre 2010.

La intervención que el hombre pueda realizar dentro del cauce de un río se encuentra motivada en su deseo por estabilizar el mismo mediante una planificación, cuyos resultados vayan en su beneficio. Dentro de cada país se utilizan diferentes métodos de estabilización de los ríos, respondiendo básicamente a necesidades económicas y técnicas.

Las funciones de los espigones dependen de los objetivos que se busquen, generalmente pueden ser:

- Reducir la velocidad de la corriente cerca de la orilla.
- Desviar, es decir, alejar, la corriente de la orilla.
- Prevenir la erosión de las márgenes.
- Establecer y mantener un ancho prefijado para el río.
- Fijar las márgenes, es decir, estabilizar el cauce fluvial.

- Controlar la migración de meandros.
- Creación del efecto de curva en una bocatoma.
- Otras.

Y así cumplir con los siguientes objetivos:

- Defensa de las márgenes contra la erosión. A estos espigones se les llama generalmente retardadores (del flujo).
- Formación de un cauce más profundo, con fines de navegación. A estos espigones se les llama deflectores.
- Desviar u orientar la corriente. Se usan en problemas especiales.
- Puede haber también espigones que cumplan los dos primeros objetivos. Se les llama retardadores-deflectores.

1.4. Criterio de diseño de los espigones

1.4.1 Introducción

El diseño de espigones no solo es teórico, sino que se nutre y fundamenta en la experiencia proveniente de los criterios de diseño y en la observación del funcionamiento utilizado en otros casos similares y de la evaluación de los sistemas de espigones en operación. También se basan en la utilización de modelos físicos reducidos a escala, modelos matemáticos o investigaciones anteriormente realizadas. Cuando se toman en cuenta investigaciones de laboratorio realizadas para solucionar problemas en otros lugares o diseños específicos de ciertos ríos, se debe tener en cuenta que fueron realizadas para ciertas condiciones particulares, por lo que, si se intenta extrapolar, deberá realizarse un exhaustivo análisis o de otra manera pueda que no se obtengamos resultados perseguidos. El parámetro más importante a tener en cuenta en la construcción de espigones es determinar la longitud de las 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 ingeniero debe utilizar una amplia gama de conocimientos en hidráulica, hidrología, sedimentación, mecánica de suelos y rocas, y en la recopilación bibliográfica de casos similares construidos en otros países o en regiones cercanas en donde se quiere utilizar este mismo procedimiento para el manejo de los cauces de los ríos. En este tipo de obras es de mucha importancia el trasporte de sólidos, de cuyo análisis se puede prever los fenómenos de transporte y sedimentación en el diseño y construcción de los espigones.

Al realizar el diseño y la construcción de espigones, para lograr el encauzamiento de un río, se debe tratar de no introducir modificaciones muy agresivas que vaya en contra de la tendencia natural del río. Es decir, el nuevo río tiene que ser capaz de auto ajustarse. Cuando se encauza un río se esta 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 y que el río siga su tendencia natural.

En ríos en donde se desarrollan meandros, los sistemas de encauzamiento no deberán imponer cambios bruscos, siendo recomendable mantener ciertos radios de curvatura en la conformación geométrica horizontal, los cuales no impliquen cambios dramáticos dentro del recorrido de los ríos. Las curvas que se introduzcan en este tipo de ríos deberán ser suaves, en lo posible se debe tratar que el radio de curvatura sea variado. 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 el o los sistemas de defensa en función del radio de curvatura “R”. Para limitar el ancho del río cuando el cauce está formado por arenas y limos se recomienda lo expuesto en la Ecuación 1.1[1]. Se debe respetar los radios de curvatura existentes; esto hará que el diseño sea más eficiente y

[1] José Antonio Masa, VI congreso Latinoamericano de Hidráulica, 1974

más económico. Si los radios de curvatura disminuyen, las distancias entre espigones también disminuyen por lo que no resulta económicamente rentable. En este punto se vuelve más económico realizar una protección continua sobre la orilla afectada.

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

Para el diseño se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones: determinación del radio de curvatura de los nuevos elementos del nuevo trazado y el ancho propicio bajo el cual el río garantice una cierta estabilidad. La longitud que debe tener el espigón, características de los materiales que se van a emplear, localización en planta y determinación de las socavaciones. Más adelante se analizará con un mayor detalle cada uno de estos puntos.

1.4.2 Orientación de los Espigones

La orientación del espigón con respecto a la orilla tiene una gran influencia dentro del diseño de un conjunto de espigones para la protección o modificación de un cauce de un río.La orientación está definida por el ángulo α, el cual a su vez está definido como 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 α=90°

  Este tipo de alineación del espigón es utilizada cuando se quiere mejorar la navegabilidad del río. Generalmente se utilizan espigones impermeables, normales a la orilla o a la dirección de la corriente.
- Espigón inclinado aguas abajo α<90°.

  En el uso de esta orientación se encuentran opiniones muy divididas, unos autores mencionan que lo único que ocasiona este tipo de ángulo es atraer el flujo

hacia la orilla. Por esto, José Antonio Maza[2] recomienda que, en un tramo recto, en una curva regular, el espigón forme un ángulo de 70° en dirección de la corriente. Si la curva es irregular y tiene un radio de curvatura menor a 2,5B, los ángulos del espigón estarán entre valores de 70° y 30°.

- Espigón inclinado aguas arriba α>90°.

  Son los espigones más usados. Se dice que esta orientación favorece a la sedimentación de material y desvío de la corriente. Se recomienda que este ángulo este entre 100° y 120°.

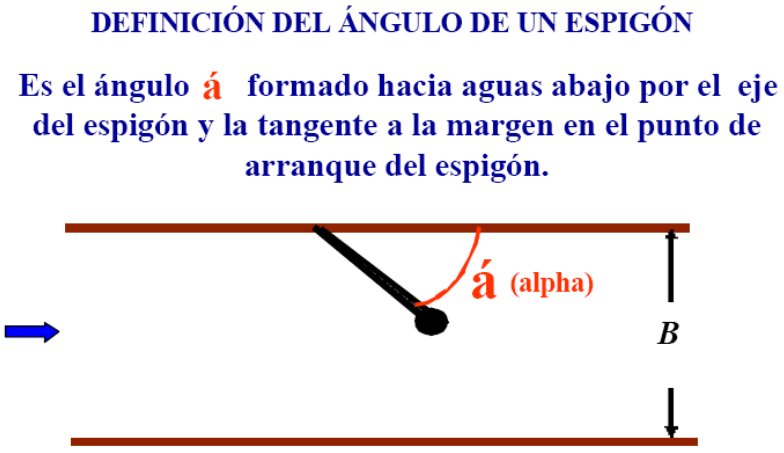


Figura 1.3 Definición del ángulo α.

Fuente: Ing. Arturo Rocha Felices, Consideraciones sobre las defensas fluviales a base de espigones, XVI Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Arequipa, 2007

La orientación juega el papel más importante cuando los espigones van a trabajar como deflectores, pero no existe una unanimidad de criterios de cuál es el ángulo óptimo que debe utilizarse. Cuando éstos son permeables, su orientación no tiene mucha importancia. La función de éstos es tan solo disminuir la velocidad del agua para que se

[2] . Ing. José Antonio Maza Álvarez, especialista en hidráulica fluvial y mecánica de ríos.

produzca la sedimentación de las partículas. Por consideraciones económicas se prefiere utilizarlos en ángulo recto.

1.4.3 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 que, el material del fondo del cauce de un diámetro específico determinado será transportado; esta velocidad es la denominada **velocidad crítica**. Laursen[3] en 1963, luego de varias investigaciones, derivó una expresión para la velocidad crítica, basada en el concepto de **esfuerzo cortante** presente en el fondo del cauce o **fuerza tractiva**. La fuerza de corte promedio del canal puede ser escrita como:

Cortante Promedio

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

- τ_0: Fuerza cortante promedio del fondo del canal (t/m^2)
- R: Radio hidráulico (m)
- S_f: Pendiente del fondo del cauce.
- γ: Peso específico del agua. (t/m^3)

Despejando de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, $V = \frac{K_n}{n} * R^{\frac{2}{3}} * S_f^{\frac{1}{2}}$, la pendiente del fondo del cauce y remplazando en la anterior ecuación se puede reformular la expresión de la siguiente manera:

Cortante Promedio basado en la ecuación de Manning.

[3] Laursen, E. M., "An Analysis of Relief Bridge Scour," Journal of Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers.

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

- n : Coeficiente de Manning
- V : Velocidad media del río
- k_n: Constante que para unidades del Sistema Internacional vale 1.0 $m^{1/3}/s$.
- y : Calado

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

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 Shields.
- γ_s : Peso específico de las partículas
- D_s : Diámetro de la partícula

Para encontrar la velocidad crítica se iguala τ_c=τ_0 y se despeja la velocidad.

Velocidad Crítica

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

- $s = \gamma_s/\gamma$

Aplicando la fórmula de Strickler $n = 0.034(Kv * D_{50})$

En donde

- $Kv = 3{,}28\, m^{-1}$.
- D_{50} es el diámetro en el cual el 50% tiene un menor diámetro, en la fórmula también se sustituye $D_s = D_{50}$.

- Basados en el Libro "Introducción a la Mecánica de Suelos" cuyo autor es 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, se obtiene la siguiente expresión:

Velocidad Crítica usando la ecuación de Strickler:

$$Vc = k_u * y^{1/6} * {D_{50}}^{\frac{1}{3}}$$

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

Si la velocidad del canal supera la velocidad crítica las partículas serán transportadas por el flujo. Si esto sucede, se debe determinar cuál será la profundidad del cauce del río a ser erosionada. Para ello se debe 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 Juan Manuel Vide, recomienda utilizar para el cálculo de la erosión la hipótesis de agua clara.

1.4.3.1.1 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 τ_c=τ_0 se despeja ahora el radio hidráulico y posteriormente el calado.

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 se puede ocupar $s = 2{,}65$ y k_s=0,039. En la ecuación anterior Ds ha sido reemplazado por $D_m = 1.25 * D_{50}$

Asumiendo una sección rectangular y remplazando con la fórmula de Strickler $n = 0{,}034(k_v * D_{50})^{1/6} = 0{,}034 * \left(\frac{k_v * D_m}{1{,}25}\right)^{1/6}$ se llega la siguiente expresión:

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 : Ancho del río menos la obstrucción. (m)

1.4.4 Longitud del espigón.

Como es fácil de suponer, en un río natural cada espigón tendrá su propia longitud debido a la irregularidad que presentan las márgenes del río. Los espigones pueden ser construidos gradualmente, por lo que se recomienda que en su proceso de desarrollo y ejecución se lo realice de una forma gradual, incrementando la longitud del espigón hasta una prolongación menor que la estimada y que posteriormente se vaya completando según sean adecuados y positivos los resultados para la evolución en su comportamiento. No existe ninguna fórmula que permita determinar la longitud de los espigones, esto depende de la clase de espigón y del objetivo que trate de cumplir.

Para los espigones impermeables es más fácil determinar la longitud, pues por lo general lo que se busca con ellos es disminuir el ancho del río, de modo de formar un canal central que para un determinado caudal produzca el calado requerido para garantizar la

navegación, considerando que esta es la condición que determina la longitud del espigón.

Para los espigones permeables resulta complicado determinar su longitud. El propósito de este tipo de espigones es disminuir la velocidad del agua para lograr 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 encauzar.

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, cuando el espigón sobrepasa el 20% del ancho del río no se obtienen mayores ventajas[4]. Además, por consideraciones económicas se debe 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 continua.

Para tramos rectos, se recomienda que la longitud del espigón no sobrepase la cuarta parte del ancho del río, y que el anclaje para estos tipos de obras no debiera ser más que Lt/4.[5]

1.4.5 Separación de los espigones.

La separación de los espigones es la distancia que hay entre uno y otro, medida a lo largo de la orilla. La separación entre los espigones está determinada por el ángulo β de divergencia del flujo al pasar por una zona contraída, por la presencia de espigones a una zona de mayor sección.

[4] Federal Highway Administratio, Estados Unidos
[5] José Antonio Maza Álvarez,Diseño de Espigones, VI Congreso Latinoaméricano, 1974

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 del cauce del río que el flujo necesita para perder la perturbación causada por el espigón.

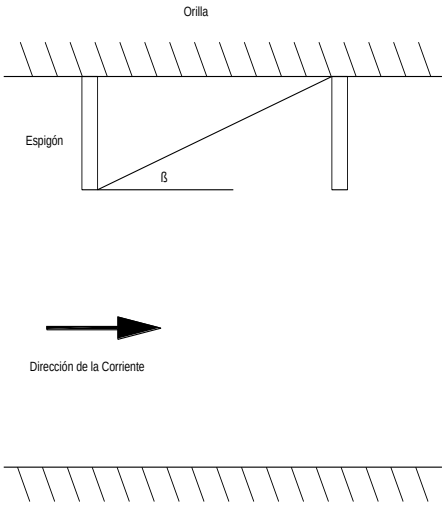


*Figura 1.4 Diagrama de la ubicación del ángulo***.**

Fuente: Ing. Arturo Rocha Felices, Consideraciones sobre las defensas fluviales a base de espigones, XVI Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Arequipa, 2007

S.A. Brown[6] estudió cómo variaba el ángulo β en función de la permeabilidad del espigón y la relación L_T/B. De la Figura 1.4 se puede de deducir que la separación entre los espigones se encuentra determinada por el ángulo β y la longitud de trabajo del espigón. Como se analizó anteriormente, la longitud de trabajo corresponde a la longitud necesaria para lograr el propósito en la modificación del cauce del río.

[6] Brown Scott A, Design of spur-type streambank stabilization structures,1985

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

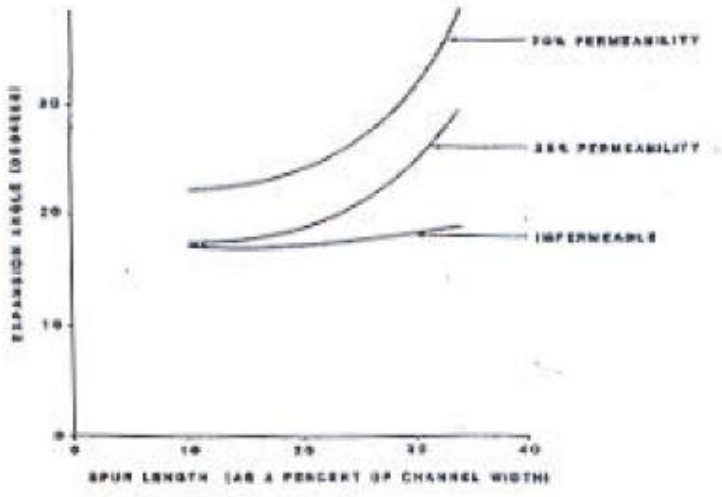


Figura 1.5 Angulo de expansión en función de la permeabilidad del espigón y la relación LT/B por Brown. (Felices 41)

Fuente: Ing. Arturo Rocha Felices, Consideraciones sobre las defensas fluviales a base de espigones, XVI Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Arequipa, 2007

De la figura anterior se puede obtener como conclusión cuatro aspectos técnicos fundamentales:

- Al aumentar la permeabilidad, el ángulo β aumenta para un valor dado de L_T/B.
- En el diseño de los espigones es muy importante tener en cuenta que el crecimiento del ángulo β se vuelve exponencial para relaciones muy grandes de L_T/B.
- En las curvas presentadas en la Fig. 1.5 se puede observar que el ángulo β para espigones impermeables es casi constante e igual a 17°. Además, Brown emite

su criterio mencionando 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.

Existen otros investigadores que en base a su conocimiento y experiencia a través de 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 longitudinal entre espigones.

Si en el diseño se planifican espigones tomando en cuenta alguna inclinación con respecto a la orilla del río, para utilizar las curvas de la Fig. 1.5 anteriormente expuesta se deberá realizar algunas modificaciones para su correcta utilización. Además cuando los espigones vayan a ser situados en tramos curvos, se deberá tener otro tipo de consideraciones para su adecuado diseño y utilización. Es recomendable encontrar la longitud de trabajo del espigón utilizando métodos geométricos. Para el cálculo de la separación en tramos curvos, se aplica el siguiente criterio de diseño de espigones que deberá calcularse como si éstos fuesen a ubicarse en tramos rectos y reducirlos a la mitad.

1.5. Ventajas del uso de espigones

Los espigones presentan ciertas ventajas para obtener un sistema de defensa de los cauces de los ríos, la más importante es que son de carácter discontinuo, en comparación de sistemas continuos. Esto hace que la construcción de los espigones sea de fácil ejecución, la cual está ligada a otras ventajas como es el bajo costo, facilidad de reparación, posibilidad de usar diversidad de materiales, facilidad de introducir mejoras para optimizar su funcionamiento; y de una manera general, permite el uso de la experiencia del personal de operación y la mano de obra locales. Los espigones en su mayoría 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.

Los espigones ocasionan cambios importantes, por lo que se constituyen en una transición brusca dentro del cauce del río, lo que obviamente ocasiones variados efectos y muchas repercusiones en su funcionamiento. Los espigones al reducir la sección del cauce aumentan la velocidad del mismo. Partículas que se encontraban estables a una cierta velocidad del agua en el cauce del río, con la presencia de los espigones son arrastradas aguas abajo. Como resultado se obtiene que los espigones causen erosión como una respuesta de un autoajuste, pero esta erosión es muy difícil de predecir. Por lo tanto, la presencia de espigones implican la necesidad de realizar un monitoreo continuo para supervisar qué sucede con el cauce y tratar de controlar sus efectos cuando se estime que puede ocasionar algún problema.

2. Modelos hidráulicos

2.1. Objetivo de la modelación física

El análisis y diseño de los espigones es muy difícil realizar en un modelo analítico de oficina ya que es necesario estudiar y comprender los fenómenos físicos complejos que tienen lugar y en la actualidad resulta que se encuentran más allá del campo de la aplicación normal de ingeniería, cuyo análisis hidráulico no es la excepción. Cuando se tienen obras de gran tamaño o con una gran repercusión social y económica, es importante realizar pequeños modelos físicos para así lograr predecir cuál será el comportamiento de una determinada obra en un cierto medio.

Los modelos físicos reducidos son una solución para estudiar y determinar el comportamiento de un prototipo, ante la dificultad de realizar el estudio analítico de oficina o utilizando modelos matemáticos. En Ingeniería Fluvial, existe una gran dificultad en generar modelos matemáticos, pues el comportamiento de un río es poco predecible y tiene un alto grado de variabilidad. Aunque los modelos matemáticos hoy en día han tenido un gran desarrollo, la garantía de sus resultados y funcionamiento están estrechamente vinculados con la construcción y verificación utilizando modelos físicos. Los algoritmos y ecuaciones utilizadas en los modelos matemáticos son calibrados de acuerdo a los resultados obtenidos en pruebas de laboratorio y/o de datos obtenidos en el campo. Es por ello que la construcción de modelos a físicos a escala para la solución de problemas de ingeniería hidráulica tendrán gran cabida dentro del estudio de problemas que no pueden resolverse mediante análisis de oficina o utilizando modelos matemáticos y deberá ser la herramienta adecuada para las futuras generaciones.

El inconveniente que presentan los modelos reducidos se halla en su 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 y por lo tanto su optimización, lo que permite obtener

ventajas constructivas, de ejecución y económicas. Esto obviamente trae ahorro de tiempo y costos y genera una mayor confianza y tranquilidad a todos los actores que están involucrados 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 requieren de importantes recursos económicos, permiten optimizar y predecir el comportamiento adecuado de las obras y de esta manera obtener ahorros que muchas veces son mayores al costo del modelo físico a través del ahorro, evitando o limitando futuras correcciones o reajustes que también demandaran recursos.

2.2. Selección de las variables

Los modelos hidráulicos reducidos están basados en el principio de similitud o de semejanza. El principio de semejanza es un conjunto de conceptos y métodos de análisis que orientan en la decisión de cómo construir o ensayar un modelo.

El uso de modelos hidráulicos, implica que éstos deben ser semejantes al prototipo, para la cual debe satisfacerse las leyes de similitud Geométrica, Cinemática y Dinámica, que en conjunto relacionan magnitudes físicas homólogas definidas entre ambos sistemas.

En los modelos físicos a escala o reducidos es casi imposible conseguir que todas las fuerzas sean reducidas de tal manera que todas estas tengan la misma influencia que en el prototipo. Sin embargo, tanto en el modelo como en el prototipo, existen fuerzas principales que gobiernan el comportamiento. En la Ingeniería de Ríos la fuerza que domina el comportamiento es la gravedad. Cuando esto ocurre, el modelo físico a escala se lo puede representar bajo la condición de similitud que se denomina o se conoce como la semejanza de Froude, la cual será mencionada y analizada a continuación.

2.3. Semejanza geométrica

Representa la proporcionalidad de las dimensiones del modelo con las del prototipo.

Esta es la noción más básica del principio de la semejanza. Entre el modelo y el prototipo existe semejanza geométrica cuando las relaciones entre todas las dimensiones correspondientes u homólogas en modelo y prototipo son iguales. Esta similitud se expresa con la escala de longitudes:

$$El = \frac{Lp}{Lm}$$

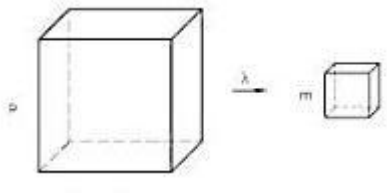


Figura 2.1 Semejanza Geométrica

Fuente: Juan Pedro Martin Vide, Ingeniería de Ríos, Edición UPC, 2007, Pág. 330

2.4. Similitud cinemática

Representa la proporcionalidad de las velocidades que se presentan en el modelo con las que se presentan en el prototipo (λv).

Entre modelo y prototipo existe semejanza cinemática si:

- La trayectoria de las partículas móviles homólogas son geométricamente semejantes.
- Las relaciones entre las velocidades de las partículas homólogas son iguales.

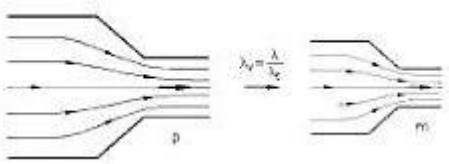


Figura 2.2 Semejanza cinemática (en líneas de corriente)

Fuente: Juan Pedro Martin Vide, Ingeniería de Ríos, Edición UPC, 2007, Pág. 331

2.5. Similitud dinámica

Representa la proporcionalidad de las fuerzas que actúan sobre masas correspondientes en el flujo del modelo y en el flujo prototipo en todos los puntos del campo de flujo. Para que exista similitud dinámica entre dos sistemas, deben ser semejantes geométrica y cinemáticamente.

Las condiciones requeridas para la semejanza completa se obtienen a partir del segundo principio del movimiento de Newton, $\Sigma Fx = M\ a_x$. Las fuerzas que actúan en el movimiento de un fluido pueden ser cualquiera de las siguientes, o una combinación de las mismas: fuerzas viscosas, fuerzas debidas a la presión, fuerzas gravitatorias, fuerzas debidas a la tensión superficial y fuerzas elásticas.

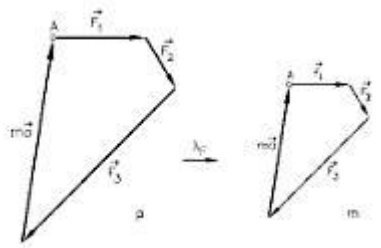


Figura 2.2 Semejanza Dinámica

Fuente: Juan Pedro Martin Vide, Ingeniería de Ríos, Edición UPC, 2007, Pág. 331

2.6. Condiciones de similitud

2.6.1 Número de Froude (Fr)

Se utiliza la similitud de Froude cuando el flujo o movimiento del agua es característico a superficie libre, como en el caso de vertederos, embalses, playas, mareas, bahías, canales, ríos, quebradas, llanuras de inundación, estructuras de control de niveles, captaciones, desarenadores, compuertas, esclusas, etc.

El flujo en un canal abierto de clasifica de acuerdo a un criterio de energía. Para una descarga determinada, el flujo de energía es una función de su profundidad y velocidad. La clasificación del flujo en cauces de ríos se lo caracteriza por el número adimensional de Froude (Fr):

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{(g} \times h')}$$

En donde:

- V: Velocidad (m/s)
- g: gravedad (m/s^2)
- h´: altura hidráulica
- A: A/B´
- A: área hidráulica
- B´: ancho de la superficie del agua

Fr < 1: flujo subcrítico (lento)

Fr= 1: flujo crítico

Fr>1 : flujo supercrítico (rápido)

2.6.2 Número de Reynolds (Re)

El número de Reynolds es adimensional y caracteriza, en la dinámica de fluidos, la corriente del fluido. Se utiliza para estudiar su movimiento en el interior de una tubería, o alrededor de un obstáculo sólido.

Es la relación entre la fuerza de inercia y la fuerza de rozamiento interna de un líquido. Se representa por Re. El número de Reynolds desempeña un papel de capital importancia en los experimentos con modelos hidrodinámicos, ya que los comportamientos de éstos en los buques, aviones, etc., que ejemplifican, son iguales cuando sus respectivos números de Reynolds coinciden.

Permite, además, determinar la llamada velocidad crítica o velocidad de Reynolds, que específica aquella para la cual el régimen de circulación pasa de laminar (R<2100) a turbulento (R>2100).

$$Re = \frac{\rho \vartheta s D}{\mu}$$

En donde:

- ρ: densidad del fluido
- ϑs: velocidad característica del fluido
- D: diámetro a través de la cual circula el fluido
- μ: viscosidad dinámica del fluido

En los flujos de superficie libre, las fuerzas gravitacionales controlan tanto la ubicación como el movimiento de la superficie del agua. La influencia de las fuerzas de gravedad e inerciales en los movimientos a superficie libre se ven representadas por el número de Froude. Corresponden a este tipo de flujo aquellos movimientos del agua que se

representan en canales naturales, artificiales y en vertederos, en donde la superficie del agua esté en contacto con la atmósfera.

Las escalas de semejanza predominantes que se deducen de la semejanza de Froude son la velocidad $\lambda v = \lambda^{1/2}$ y el caudal $\lambda q = \lambda^{5/2}$, siendo λ la escala geométrica entre el prototipo y el modelo.

2.7. Justificación de las escalas en el modelo

2.7.1 Definición

Escala es la relación constante entre las variables del mismo tipo entre dos estructuras similares.

Si las variables son Jp en el prototipo y Jm en el modelo, en puntos análogos de la estructura, se dirá que la escala de la variable J es Ej y se define como:

$$Ej = \frac{Jp}{Jm}$$

Existirán entonces escalas para la longitud, el área, el volumen, la velocidad, el caudal, la fuerza, el tiempo, etc.

Los modelos hidráulicos a escala pueden dividirse en no distorsionados y distorsionados. En los modelos hidráulicos no distorsionados se ocupa una escala única para todas las dimensiones. Esto origina prototipos extremadamente grandes y costosos.

También, se puede realizar los mismos análisis sobre un modelo con escala distorsionada, que consisten en modelos con una diferente escala para cada dimensión (horizontal y vertical). Estos modelos resultan más económicos pero inducen a mayores pérdidas de energía, por lo cual sus resultados serán menos exactos y se deberá prestar mayor atención a su estudio e interpretación, que en un modelo no distorsionado.

2.7.2 Selección de Escala

La selección de la escala en un modelo hidráulico reducido se lo debe realizar de tal manera que permita observar claramente los parámetros en el representado. Una escala muy reducida hace que el investigador no pueda observar los indicados parámetros ni tomar medidas apropiadas. Por otro lado, una escala muy grande, aunque facilita la toma de mediciones, hace que el modelo sea excesivamente costoso.

También, se recomienda al momento de seleccionar la escala, se tome en consideración, que mientras se ejecute la operación en el modelo, el efecto escala en lo posible sea lo más reducido.

Mediante el estudio de recopilaciones bibliográficas y por las limitaciones físicas puestas a disposición por la Facultad de Ingeniería de la PUCE se decidió que un modelo con escala distorsionada era la mejor alternativa para el desarrollo del proyecto.

La escala geométrica del modelo se determinará a partir del espacio y el caudal disponibles en el sitio de experimentación. Adoptando la similitud de Froude, por lo tanto el campo gravitacional deberá ser el mismo en prototipo y modelo

Para la construcción de canal, se adoptó una escala de 1:18, con esta escala se puede cumplir con el criterio de similitud de la Ley de Froude, tener un adecuado modelo para poder realizar los mediciones sin ningún problema para cumplir con los objetivos de la disertación, y, también cumplir con diferentes factores que limitan la selección del modelo, como son: velocidades, dimensiones lineales de la estructura, caudales máximo, medio y mínimo, etc.

2.7.2.1 Coeficientes de Escalamiento

Debido a que en este tipo de modelo, las fuerzas de gravedad e inerciales son las que predominan, las escalas más utilizadas que se deducen de la semejanza de Froude son:

Magnitud Derivada	**Dimensión**	**Criterio de Semejanza de Froude**
Tiempo (λ_t)	T	$\lambda^{1/2}$
Masa (λ_M)	M	λ^3
Velocidad	LT^{-1}	$\lambda^{1/2}$
Velocidad Angular	T^{-1}	$\lambda^{-1/2}$
Aceleración	LT^{-2}	1
Caudal	T^3L^{-1}	$\lambda^{5/2}$
Fuerza	$M\ LT^{-2}$	λ^3
Presión	$ML^{-1}T^{-2}$	λ

3. Capítulo 3: Construcción del modelo

3.1. Introducción

Para la construcción del modelo hidráulico se tomó en cuenta el tamaño del laboratorio y la capacidad del sistema de bombeo y reciclaje de los caudales a ser utilizados durante la realización de las pruebas. En función del concepto general de que los modelos hidráulicos son construcciones en escala reducida o simplificada de obras, máquinas o sistemas de ingeniería que representan la geometría, las características dinámicas y cinemáticas del prototipo que permiten estudiar en ellos el comportamiento de determinados fenómenos y de esta manera perfeccionar los diseños, antes de iniciar la construcción de las obras u objetos reales o prototipo se estudió lo siguiente.

El objetivo de esta investigación es estudiar y analizar mediante la simulación del movimiento del agua a lo largo de un tramo de canal en donde se desarrolla una curva en forma de un retorno desarrollando un ángulo de 180º. Como puede apreciarse en la siguiente Figura 3.1 el Río Negro en su descenso hacia el río Pastaza desarrolla este tipo de geometría, que presenta varias particularidades entre las cuales las más importantes son que en la parte exterior de la curva es el lugar donde se produce más erosión en el desarrollo del perfil longitudinal del río, mientras que en la parte interior se produce una deposición de los sedimentos. Esto se debe a que la velocidad tiene un valor alto en la parte exterior mientras que disminuye sustancialmente en la parte interior erosionando en la parte exterior y sedimentando en la parte interior de la curva.

Este río es de montaña, por lo tanto, desciende grandes alturas en pequeñas longitudes del mismo, es decir la pendiente longitudinal del río es alta. Adicionalmente a este hecho, por la gran energía que disponen estos ríos tienen una alta capacidad de transporte de sedimentos y, por lo tanto, una alta concentración de los mismos. La

granulometría es variable desde bloques de grandes dimensiones hasta partículas muy finas que se transportan en forma de suspensión en el agua de estos ríos.



Figura 3.1 Intersección del Río Negro y Río Pastaza, meandro en el Río Negro

Fuente : Google Earth, 1˚24'95'' S, 78˚11'51,32''O, elevación 1244, enero 2011

Cuando estos ríos siguen descendiendo, las diferencias de altura van disminuyendo y por lo tanto disminuye la energía para el transporte de los sedimentos, de tal manera que en las llanuras o planicies ya no se encuentran los grandes bloques y mayormente el sedimento que se está transportando es fino y se encuentra en suspensión. Esta particularidad hace que los ríos en las llanuras o planicies formen curvas y meandros, cuya característica es que en su camino hacia aguas abajo forman estas curvas o meandros en los cuales, como ya fue explicado, presentan un comportamiento del flujo o movimiento del agua, en el cual, la parte exterior o cóncava de las curvas presenta una mayor velocidad por lo que existirá una tendencia mayor a erosionar y en la parte interior de las mismas la velocidad es menor y por lo tanto la tendencia es a depositar el sedimento que estaba siendo arrastrado por la corriente. Debido a este fenómeno, las zonas exteriores a la curva estarán más propensas a la erosión y las interiores a la sedimentación, por lo tanto, el esfuerzo desestabilizador permisible deberá ser menor

que en un canal recto que en el exterior de una curva pero mayor en el interior de la misma.

3.1.1 Ríos

Los ríos poseen un régimen determinado por el tamaño de la cuenca y por la cantidad de las precipitaciones. Los factores que influencian el régimen hidráulico de un río son el caudal o escorrentía, la pendiente, rugosidad, recorrido y otros. Por ejemplo, en ríos de montaña, como los presentes en las montañas de la sierra de nuestro país, el régimen del río es consecuencia de las precipitaciones, aunque determinados ríos tienen la influencia del deshielo de los grandes glaciares presentes en las grandes elevaciones, además como contribución a sus caudales estos ríos reciben las aguas provenientes de los acuíferos o aguas subterráneas, los cuales constituyen el aporte del caudal base de los ríos en los periodos secos.

La pendiente clasifica a los ríos en torrenciales cuando presentan pendientes mayores al 1,5% y en torrentes cuando la pendiente es mayor al 6%. La pendiente determina el tipo de flujo, es decir determina si este es subcrítico – laminar, subcrítico - turbulento, supercrítico – laminar y supercrítico - turbulento.

En un tramo de 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 subcrítico – laminar. Un flujo subcrítico - turbulento se produce cuando F es menor que la unidad y R está en el rango turbulento. En el diseño de encauzamientos se debe observar que el Número de Froude sea menor que la unidad, por lo tanto, uno de los dos regímenes subcríticos anteriores estará presente en el diseño de canales abiertos.

Existen dos tipos de configuraciones posibles de encontrar en la naturaleza: un río puede ser meandriforme o trenzado. Si se observa la configuración geométrica de un río se puede notar que la configuración geométrica es muy compleja. Los ríos con meandros poseen los siguientes parámetros geométricos a considerar:

- B, ancho del río
- A, amplitud del sinusoide
- a, A/2
- λ, Longitud del sinusoide
- y, calado

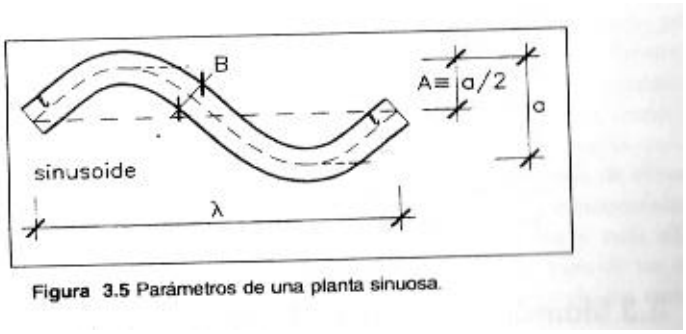


Figura 3.5 Parámetros de una planta sinuosa.

Figura 3.2 Parámetros de una planta sinuosa
Fuente: Martín Vide, Ingeniería de Ríos, Edición UPC, 2007,Pag 57

Con estos parámetros se puede establecer una relación empírica entre el ancho y la profundidad de flujo. 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 de llanura o planicie están compuestos por un cauce principal, por donde circula el caudal la mayor parte del tiempo, y una parte plana arriba del cauce normal por donde circulan las avenidas, que son lugares de inundación o para caudales con un periodo de retorno grande.

En este tipo de ríos 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 de planicie o llanura, cuya característica es que poseen pequeñas pendientes pero grandes caudales generalmente disponen de un cauce fijo y de llanuras de inundación. El caudal que llega a rebosar el cauce es de suma importancia por qué es éste el responsable de dar la forma y las dimensiones del mismo.

3.2. Obtención de las medidas del modelo en función de las escalas seleccionadas

Para plantear la construcción de un modelo físico hidráulico a escala reducida es necesario conocer a profundidad las características del prototipo como las siguientes: geometría básicamente descrita por el ancho, profundidad y pendiente de las márgenes, pendiente longitudinal del río, rugosidad, hidrológicas como la variación de los caudales y sedimentológicas como la carga de sedimentos para cada uno de los caudales, y también debe conocerse con suficiente detalle las obras que se planifican construir en el río para realizar el estudio y análisis respectivo.

De la información disponible del prototipo que se pueda representar en el modelo dependerá el éxito de los estudios en el modelo hidráulico. A continuación se mencionará la información básica que se necesita para la construcción del modelo hidráulico de un canal en curva.

Cabe recalcar que el presente tema de disertación es netamente didáctico. Los valores adoptados para construir el modelo corresponden a un canal de sección rectangular de 15 m de ancho y cuyo caudal es de 0.6×10^{-3} m^3/s. El ancho del canal en prototipo corresponde a 2.7 m y la profundidad a 1.8 m. Estos valores permiten ser representados en el laboratorio pues se dispone del espacio y la infraestructura respectiva.

Como ya fue sugerido anteriormente, la escala seleccionada para la construcción del modelo físico hidráulico es de 1:18.

El prototipo tiene las siguientes características y dimensiones:

- La longitud del tramo del río o canal a ser modelado es de 40 m; en el modelo esto significa una longitud de 222 cm.
- El ancho promedio es de 2.70 m que en el modelo significa 15 cm.
- La pendiente del tramo del canal a ser representado en el modelo es de uno por mil 1/oo.
- El canal tiene un ancho promedio de 40 m, que en el modelo significa 15 cm y se trata de reducirlo a 30 m, mediante la construcción de los espigones para posteriormente construir un puente.
- Para la construcción del canal se ocupará acrílico el cual posee una rugosidad de Manning de 0,035.

Sustentado en que la presente investigación en modelo hidráulico reducido tiene propósitos didácticos para relacionar caudales, velocidades, carga de sedimentos y a que por motivos de limitaciones presupuestarias no se pudo obtener información de campo para la construcción de este modelo físico hidráulico reducido, se construirá un modelo que permita definir los anteriores parámetros que sustente el presente estudio, en acrílico con una sección rectangular que abarque una curva de 180º, representando la rugosidad del prototipo escogido.

De esta manera se respaldará los conocimientos teóricos con evidencias observadas en el modelo físico hidráulico, permitiendo de esta manera relaciones de lo teórico con lo práctico y la profundización de conocimientos. De igual manera, permitirá adquirir conocimientos que podrán ser utilizados en trabajos futuros tanto de diseño como de construcción de obras hidráulicas. El funcionamiento del modelo físico hidráulico reducido permitirá obtener resultados que proporcionarán claras

evidencias para relacionar la variación de la velocidad con el caudal, la profundidad de flujo, el acarreo y deposición de sedimentos debido a la geometría del canal y a la presencia de los espigones con una ubicación óptima de los mismos.

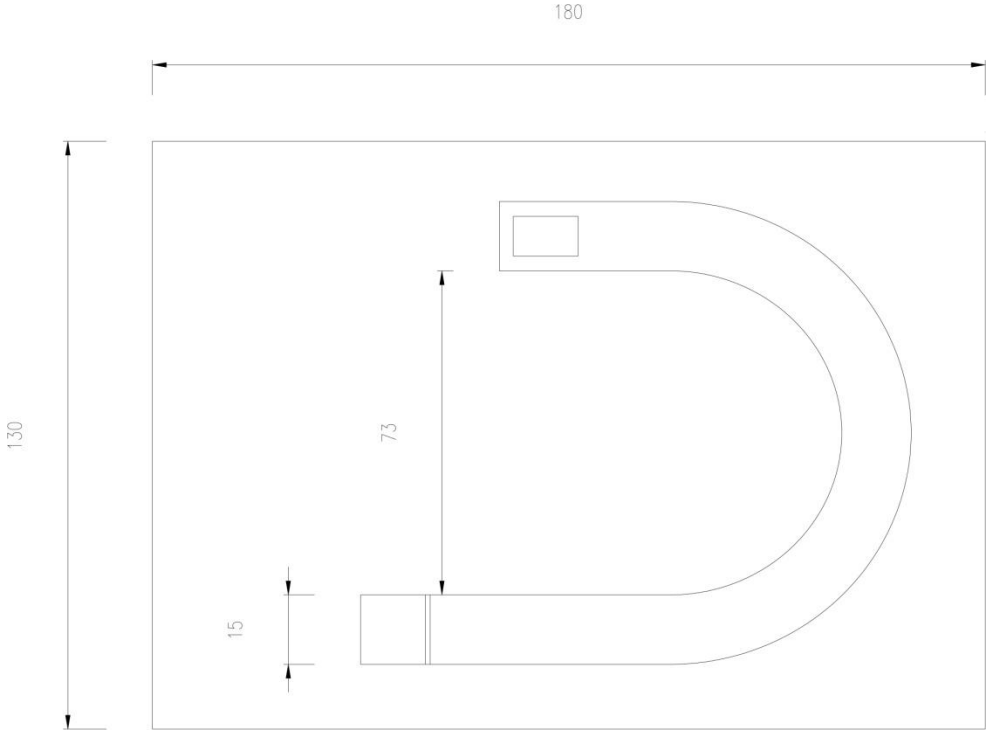
Las anteriores consideraciones y los valores establecidos han permitido definir las siguientes dimensiones para el modelo físico hidráulico:

- Caudal de diseño: existen criterios de diseño que se ha venido modificando a través del tiempo en base a nuevos conocimientos de la hidrología y la hidráulica, la creciente población y por lo tanto la superficie destinada a viviendas y su protección, para precautelar la vida de la población, experiencias anteriores y consideraciones básicas para adoptar el caudal de diseño, ya que en toda obra hidráulica se determina el caudal de diseño en función de la importancia y tamaño de la estructura, así como de su vida útil, la cual establece que esta obra prestará servicio sin modificación alguna durante este lapso de tiempo.
- Caudal a ser representado en el modelo 0.6×10^{-3} m^3/s (0.81 m^3/s).

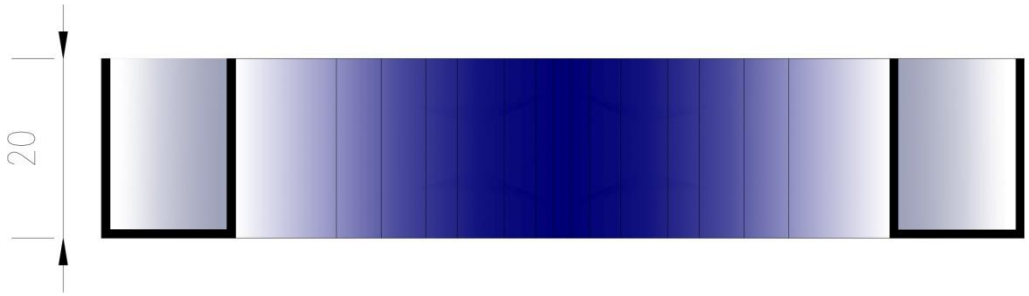
3.3. Planos del modelo

El tramo del río que debe ser representado en el modelo corresponde a una curva derecha exterior de retorno y con una declinación de 180º en donde se debe representar las condiciones de funcionamiento ya definidas para obtener las mediciones respectivas para sustentar el presente estudio e investigación.

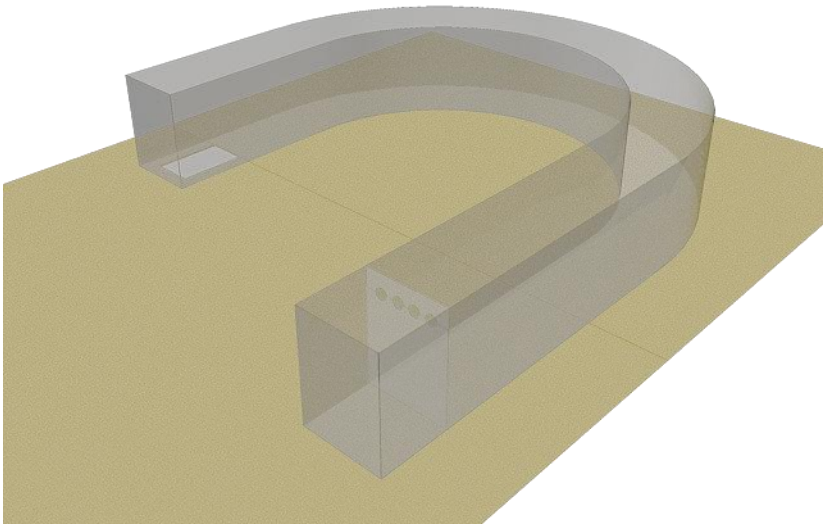
- Planta general del Modelo hidráulico de un canal en curva



- Corte longitudinal del Modelo hidráulico de un canal en curva.



- 3D del Modelo hidráulico de un canal en curva



3.4. Materiales seleccionados para construir el modelo

La finalidad de la presente investigación es analizar, estudiar, observar e identificar fenómenos hidráulicos. Por este motivo es necesario utilizar en la construcción del modelo físico a escala materiales que permitan representar las características del prototipo y la observación de los fenómenos previamente determinados y cumplir con los objetivos planteados en esta investigación. Siguiendo este procedimiento permitirá obtener de esta investigación la oportunidad de observar, analizar, estudiar, entender dichos fenómenos y obtener los resultados y conclusiones respectivas.

Los materiales seleccionados deberán poseer características versátiles y de fácil uso al momento de la construcción y de las modificaciones necesarias para representar todas las pruebas previstas y que deberán hacerse en el modelo para cumplir con los objetivos planteados, y de esta manera brindar un período de vida óptimo y durabilidad al prototipo para las condiciones de diseño y solicitaciones a la que va a estar sometido el modelo y prototipo.

Se debe tomar especial cuidado en que los materiales deben ser fácilmente moldeables, versátiles y que permitan una facilidad de montaje y de armado, sin dejar de lado el aspecto estético y más que todo que no obstruya la visualización de los fenómenos.

A continuación se presenta una lista de los materiales que fueron más utilizados en la construcción del presente modelo hidráulico y que son de utilización universal:

- Perfiles Metálicos: Utilizados para la configuración de las estructuras que soportarán el modelo.
- Madera contrachapada: Utilizado para el soporte del modelo y de las bombas del modelo físico.
- Accesorios PVC: Utilizados para el sistema de recirculación del agua.
- Contenedor de Polipropileno: Utilizados para almacenar el agua suficiente para los tipos de ensayo.
- Bomba de Succión: Permite la recirculación del agua durante los ensayos en el modelo.
- Botonera: Utilizado para el encendido y apagado de las bombas de succión.
- Láminas de acrílico; utilizados para la conformación del canal del modelo físico.
- Silicón transparente: Utilizado para hermetizar el modelo para evitar fugas y garantizar su funcionamiento.

3.4.1 Acrílico

Una vez que se consideró y se estudió sobre los materiales que se pueden utilizar, se llegó a la decisión que el acrílico es un material que si bien es un plástico tiene característica de resistir por mucho tiempo la intemperie sin cambiar sus propiedades, gracias a que tiene resistencia a los rayos ultravioleta.

Además de ser un material que permite su manejo fácilmente, tiene la particularidad que no presenta peligro de funcionamiento porque no es frágil y no se astilla con facilidad, de esta manera se evita lesiones o heridas al momento del manejo.

Además este material acrílico es resistente a los golpes, garantizando que la vida útil del modelo sea mayor: Otra de las características destacables del acrílico es la transparencia que supera a la del vidrio, razón por la cual se escogió utilizar acrílico y no así el vidrio.

Desde el punto de vista ecológico, el acrílico es un material que hay como reciclarlo íntegramente.

El el siguiente cuadro se detallan las principales propiedades del acrílico y son las siguientes:

Propiedades	**Unidad**	**Magnitud**
Dureza		HCN-96
Absorción del Agua	%	0.35
Gravedad Específica		1.19
Esfuerzo de Flexión: Esfuerzo a la Flexión Módulo Flexural	 kg/cm^2 kg/cm^2	 1.052 31.264
Esfuerzo de Impacto	kg/cm^2	1.1
Esfuerzo de Corte	kg/cm^2	600-650
Calor Específico	Cal/g˚C	0.35
Temperatura de Distorsión al Calor (4.6 kg/cm)	˚C	100
Coeficiente de Conductividad de Calor	$Cal/s*cm^2$	4.5×10^{-4}
Coeficiente de expansión linear	Cm/cm ˚C	6.5×10^{-5}

Temperatura última de continua operación	˚C	60-90
Flamabilidad	Mm/min	33
Superficie resistente a 28 ˚C	Ohm	>1016
Volumen resistente	Ohm cm	>1015
Rango de termoformibilidad	˚C	140-180
Esfuerzo Dialéctrico	Kv/Mm	20
Rugosidad relativa		0.0015

3.5. Secuencia fotográfica explicativa en construcción del modelo

3.5.1 Construcción de la mesa de soporte del modelo físico y de la bomba de succión.

El modelo hidráulico está montado sobre una estructura mixta compuesta por metal y madera; se escogió utilizar un perfil metálico de 2.5 mm de espesor para dar firmeza y durabilidad a la mesa. Además se utilizó planchas de madera de 1.30 m de ancho por 1.80 m de longitud y un espesor de 20 mm.

En la madera superior se hizo un hueco rectangular para que conecte el canal de salida de agua.



Mesa de soporte del canal curvo.



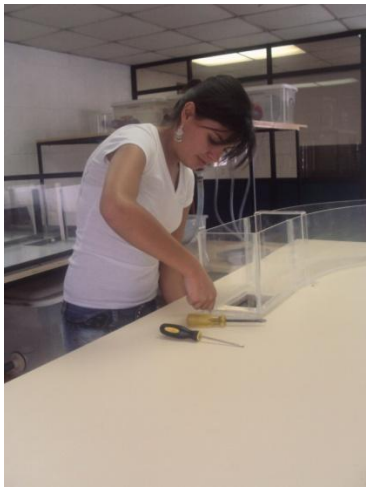
Mesa de soporte de la bomba de succión y contenedor de agua.

3.5.2 Colocación del canal curvo sobre la mesa de soporte.

Como se indicó antes, se utilizó el acrílico para construir el canal. El canal es de 15 cm de ancho y sus paredes 20 cm de alto. Para sostenerlo se utilizó tornillos en diferentes partes del canal los cuales permiten que tenga estabilidad.



Canal curvo de acrílico.





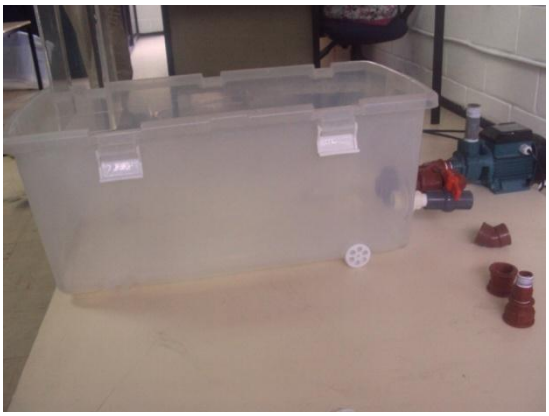


Canal de salida del agua.

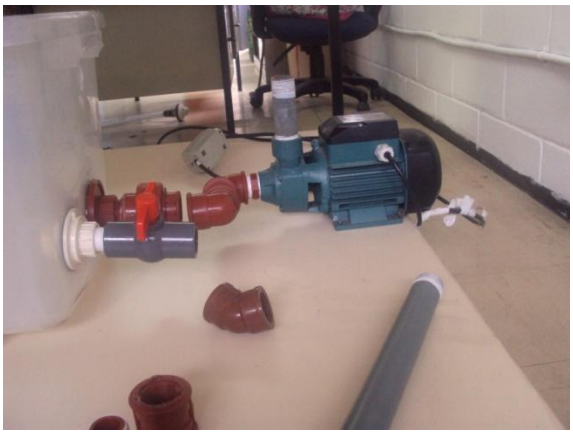
3.5.3 Instalación del sistema de recirculación del agua

Debido a que el modelo debe ser abastecido de agua continuamente para realizar las prácticas, se decidió conformar un sistema de recirculación que cumplirá con este objetivo.

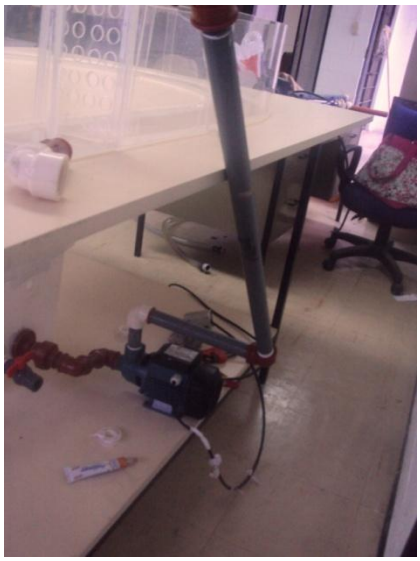
Mediante los accesorios de PVC se unió el contenedor de polipropileno a la bomba de succión. Después se implementó la tubería q va a llevar el agua hacia el canal. Esta tubería al igual que los accesorios es de 1 pulgada. La bomba de succión es de 0.50 HP y de marca Paolo.

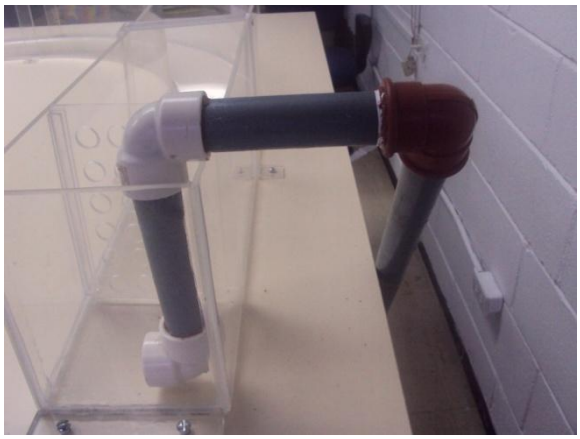


Contenedor de agua



Bomba de succión conectada al contenedor de agua







Tubería de PVC y accesorios, que llevan el agua hacia el canal.

3.6. Secuencia fotográfica en donde se observa la calibración del modelo

Calibración es el procedimiento de comparación entre lo que indica un instrumento y lo que debiera indicar de acuerdo a un patrón de referencia con valor conocido. Para esto, se debe escoger el patrón adecuado, es decir tener un patrón de referencia que

corresponde al que se conserva en un lugar determinado y en el que se fundamentan todas las medidas de dicho lugar[7].

Para calibrar el modelo se utilizó la velocidad como parámetro. Como se sabe, la velocidad del flujo es variable dentro del canal. Para lo cual se utilizó un Tubo Pitot y así conocer la velocidad de flujo en un determinado punto.

Como ya se dijo antes, que se trata de una disertación didáctica, entonces con esta calibración se quiere demostrar que el canal en curva trabaja como si fuera un meandro de un río, en el cual la velocidad es mayor al exterior de la curva.

3.6.1 Tubo Pitot

Dentro del canal la velocidad de flujo es variable por lo que se utilizó un Tubo Pitot para la medición. El Tubo Pitot es tal vez una de las formas más antiguas para medir la presión diferencial y además conocer la velocidad de circulación de fluido en un canal abierto. Este tubo consiste en un tubo de vidrio o una jeringa hipodérmica con un doblez de 90˚.

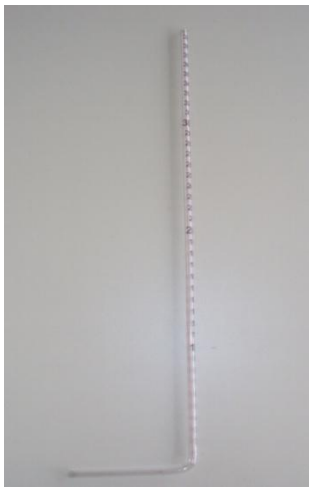


Figura 3.3 Tubo Pitot utilizado para la disertación

[7] International Vocabulary of Metrology , BIPM, 1993

La abertura del tubo se coloca corriente arriba, de modo que el líquido fluye en la abertura hasta que la presión del tubo aumente lo suficiente como para resistir el impacto de la velocidad contra él. La velocidad del fluido en la entrada del tubo se hace nula, al ser un punto de estancamiento, convirtiendo su energía cinemática en energía de presión, lo que da lugar al aumento de presión dentro del Tubo Pitot.

Como la determinación de la velocidad en cierto número de puntos de una sección transversal permite evaluar la descarga la medición de la velocidad es una fase importante para medir el flujo. La velocidad se determina midiendo el tiempo que requiere una partícula determinada para viajar una distancia conocida.

En frente de la abertura, el flujo está en reposo la línea de corriente que pasa a través del punto 1 conduce al punto 2, que es el punto de estancamiento donde el fluido está en reposo, en la cual se divide y circula alrededor del tubo. La presión en 2 se determina a partir de la columna del líquido en el tubo.

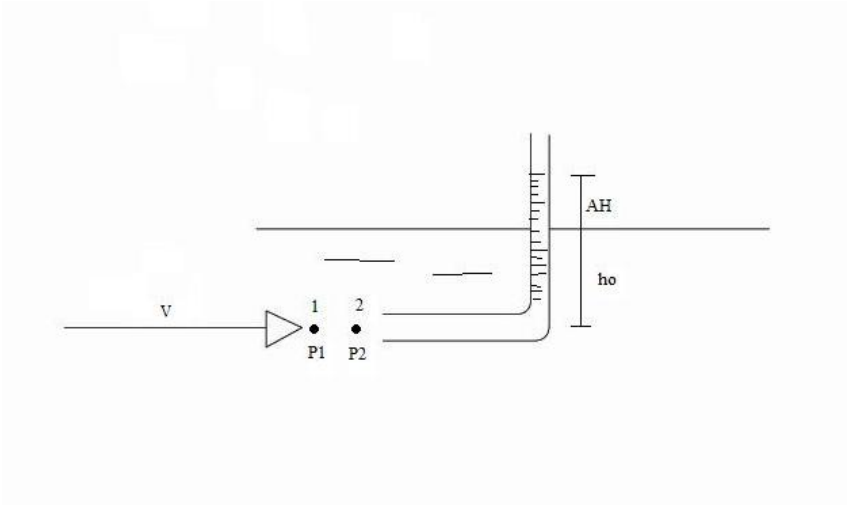


Figura 3.4 Tubo Pitot

Al aplicar la ecuación de Bernoulli entre los puntos 1 y 2 se tiene

$$\frac{V^2}{2G} + \frac{P_1}{\gamma} = \frac{P_2}{\gamma} = ho + \Delta h$$

Dado que ambos puntos tienen la misma elevación como $\frac{P_1}{\gamma} = ho$ la ecuación se reduce a:

$$\frac{V^2}{2g} = \Delta h$$

O bien

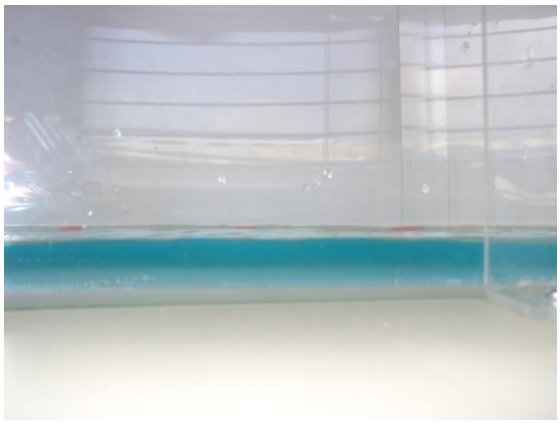
$$V = \sqrt{2g \times \Delta h}$$

El Tubo Pitot mide la presión de estancamiento conocida también como presión total, la presión total está compuesta por dos partes. La presión estática h_o y la presión dinámica Δh expresada en función de la longitud de columna del fluido en movimiento. La presión dinámica se relaciona con la cara de la mediante la ecuación:

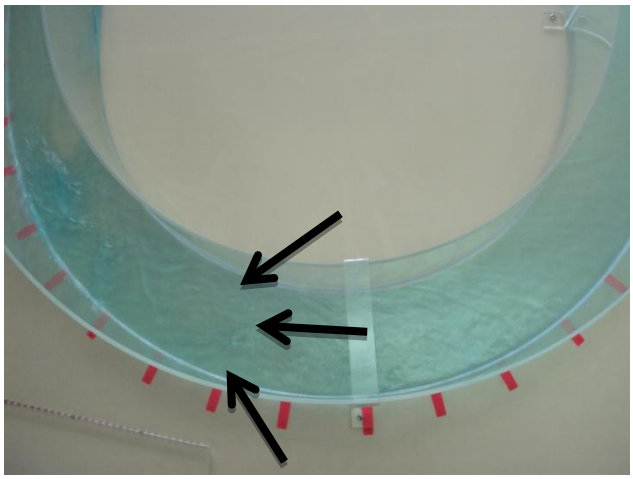
$$\frac{V^2}{2g} = \Delta h$$

3.6.2 Toma de datos

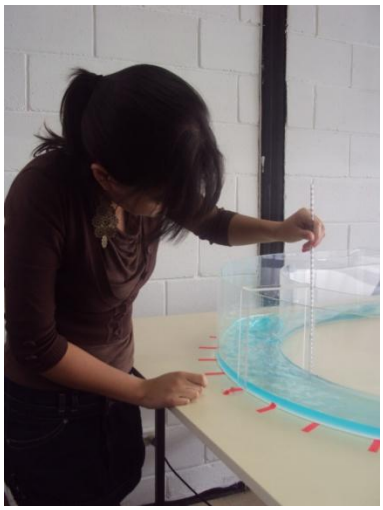
A continuación, las fotos ilustran como se tomó los datos en los diferentes grados de la curva:



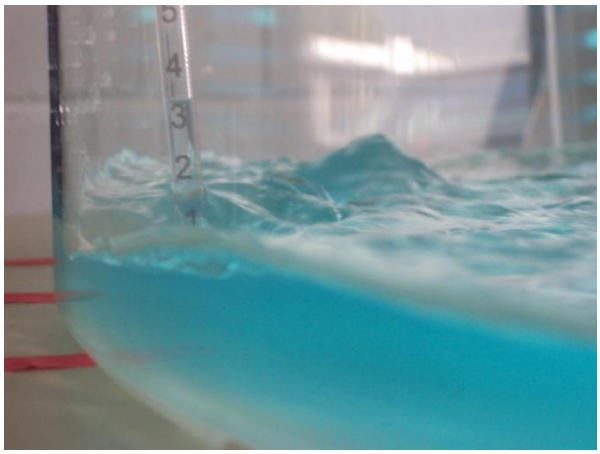
Nivel del agua en el canal.



Canal en curva, en donde se tomaron las alturas de velocidad en interior, centro y exterior de la curva, tal como indican las flechas.



Toma de las alturas de velocidad mediante el Tubo Pitot.



Ejemplo de las altura de velocidad.

3.6.3 Resultados

En el siguiente cuadro están las alturas de velocidad tomadas con el Tubo Pitot en los diferentes grados de la curva tanto en el interior, en el centro y el exterior de la curva.

ALTURAS DE VELOCIDAD (cm)			
Grados	Interior	Centro	Exterior
0˚	2	1.5	2.5
20˚	1.8	1.8	2.5
40 ˚	1.8	1.8	2.8
60 ˚	1.5	2	3
80 ˚	1.5	2	3.5
90 ˚	1.3	1.8	4
100 ˚	1.6	2	3.3
120 ˚	1.8	2	2.8
140 ˚	1.8	2	2.8
160 ˚	1.8	1.8	2.5
180 ˚	2	1.8	2.5

Utilizando la ecuación $V = \sqrt{2g \times \Delta h}$, se obtiene la velocidad en cada uno de los puntos, y los resultados son los siguientes:

VELOCIDAD (m/s)			
Grados	Interior	Centro	Exterior
0˚	0,626	0,542	0,700
20˚	0,594	0,594	0,700

40 ˚	0,594	0,594	0,741
60 ˚	0,542	0,626	0,767
80 ˚	0,542	0,626	0,828
90 ˚	0,505	0,594	0,885
100 ˚	0,560	0,626	0,804
120 ˚	0,594	0,626	0,741
140 ˚	0,594	0,626	0,741
160 ˚	0,594	0,594	0,700
180 ˚	0,626	0,594	0,700

Con los resultados obtenidos se comprueba que el canal funciona como un meandro ya que las velocidades más altas son las que se midieron en la parte exterior y cuando la curva es más pronunciada.

4. Capítulo 4 Prácticas de laboratorio

4.1. Introducción general

Una vez plasmada la representación del cauce natural que se desea representar y estudiar mediante la construcción del modelo hidráulico de un canal en curva y realizadas todas las actividades y ensayos, para obtener la calibración del mismo se procede a la experimentación.

En los siguientes párrafos se realizará una descripción en detalle de la construcción de los espigones que serán utilizados en la simulación de su funcionamiento en el tramo del río representado, complementado con la representación final del modelo completo para proceder con la realización de cada una de las prácticas propuestas en los siguientes numerales.

Mediante el análisis de los resultados obtenidos en cada una de las prácticas se obtendrán las conclusiones más importantes de la realización de este estudio y modelación, así como también se emitirán recomendaciones que puedan ser aplicadas en casos semejantes.

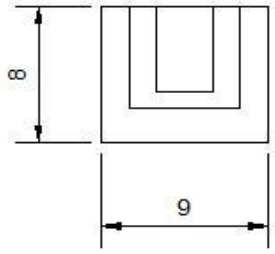
4.2. Selección del material para la construcción de los espigones.

Los espigones utilizados en los ensayos son espigones impermeables y tienen las siguientes características físicas y geométricas:

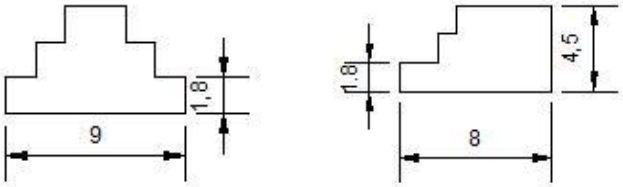
- El material utilizado para la construcción de los espigones y que representa de mejor manera las condiciones presentes en el prototipo es la madera.
- Aplicando el criterio obtenido de la experiencia en otras obras de similares características, de que en la determinación de la geometría de los espigones,

éstos no pueden tener una longitud mayor a 1/3 del ancho del canal las medidas obtenidas en el modelo son las siguientes:

- Planta del espigón:



- Corte longitudinal y transversal del espigón.



Las dimensiones están dadas en centímetros.

Con el objetivo de obtener una representación lo más fidedigna del prototipo en el modelo y tratando de que los espigones se mantengan en la posición deseada se colocaron barras de acrílico, las cuales se adhieren al canal para garantizar que los espigones se mantengan firmes.

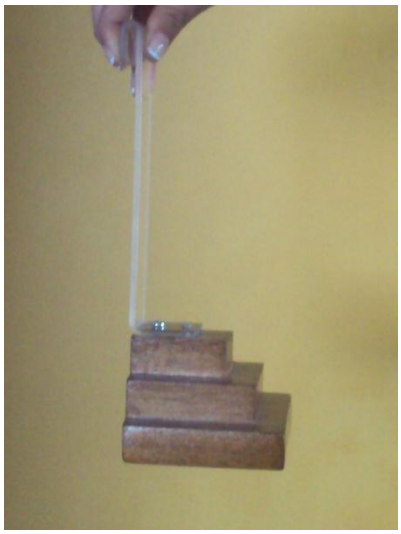




Figura 4.1 Modelo de Espigón que se va a utilizar en las prácticas

4.3. Elaboración del modelo general para toma de datos

Realizadas todas estas actividades previas de construcción del modelo y espigones, y de haber realizado ensayos tendientes a la calibración del mismo, se procedió a la toma de datos, para lo cual, primero se utilizó un flujo continuo de agua manteniendo un calado de 2 cm, que permita obtener datos de referentes a la variación de la velocidad del agua en la curva sin presencia de los espigones.

Posteriormente, se procedió con la realización de mediciones del calado y velocidad del flujo con la presencia de espigones en el cauce del canal. Para esto la separación de los espigones fue variable en el espacio, con el objetivo de determinar la influencia de éstos sobre el calado y la velocidad del agua en el canal.

Para esto, a la curva del canal se la dividió cada 10˚, de 0˚ hasta 180˚ comenzando desde el comienzo de la curva del canal hasta donde está termina.



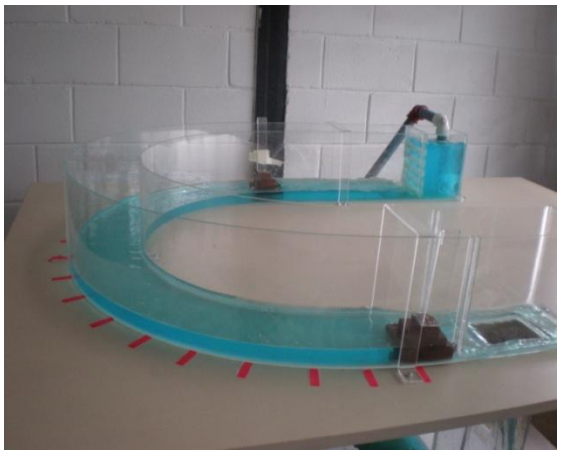
Figura 4.2 División del canal en curva

Los datos obtenidos de estos ensayos son presentados a continuación tabulados para cada una de las experimentaciones, en donde se analiza cuántos espigones se utilizó, la separación de los mismos, y los datos del modelo obtenidos.

4.4 Práctica # 1

4.3.1. Espigones expuestos en la entrada y salida de la curva.

Espigones ubicados en 0˚ y 180˚ como se muestra en la figura.



4.4.2 Toma de datos

Las velocidades a lo largo del tramo del prototipo representado en el modelo se las midió utilizando el Tubo Pitot para lo cual debieron registrarse las alturas de velocidad del agua en puntos con una ubicación cada 20˚, obteniéndose las siguientes lecturas :

Grados	Altura de velocidad	Velocidad: $V = \sqrt{2g \times \Delta h}$,
0˚	4	8,854
20˚	3	7,668
40 ˚	2,8	7,408
60 ˚	2,8	7,408
80 ˚	2,6	7,139
90 ˚	2,4	6,859
100 ˚	2,5	7,000
120 ˚	2,6	7,139
140 ˚	2,6	7,139
160 ˚	2,6	7,139
180 ˚	2,8	7,408

4.4.3 Análisis de los resultados

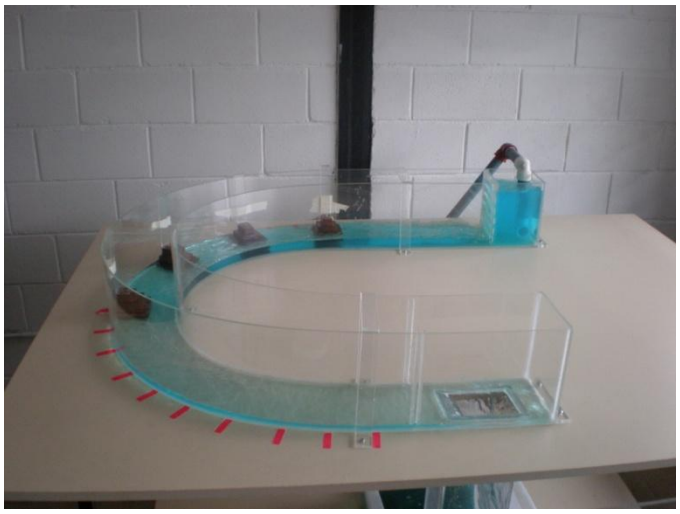
La tabulación de los datos obtenidos permite observar que colocar espigones al inicio o a la salida de una curva de un cauce natural en curva no contribuye a la disminución de

la velocidad en la parte exterior de la curva, lo que permite deducir que el problema de la erosión en este lugar se mantiene y sigue latente.

4.5 Práctica # 2

4.5.2 Espigones ubicados cada 30˚.

Para la realización de estos ensayos se efectuaron algunas modificaciones en la ubicación de los espigones pues éstos fueron ubicados en un espacio igual a un ángulo de 30˚, desde la entrada de la curva, como se puede apreciar en en la foto siguiente.



4.5.3 Toma de datos

Grados	Altura de velocidad	Velocidad: $V = \sqrt{2g \times \Delta h}$,
0˚	4	8,854
20˚	3	7,668

40 ˚	2,8	7,408
60 ˚	3	7,668
80 ˚	2,5	7,000
90 ˚	3	7,668
100 ˚	1,8	5,940
120 ˚	1,8	5,940
140 ˚	1,8	5,940
160 ˚	1,7	5,772
180 ˚	1,6	5,600

4.5.4 Análisis de los resultados

Analizando la información y los resultados obtenidos de estas nuevas series de pruebas con la nueva ubicación de los espigones uno cada 30 ˚ y los anteriores, en una curva en un cauce natural se puede afirmar que los espigones colocados de esta manera contribuyen efectivamente a la disminución de la velocidad en la parte exterior, permitiendo de esta manera controlar las velocidades y de esta manera controlar la erosión de esta parte del cauce.

4.6 Práctica # 3

4.6.2 *Espigones ubicados cada 45˚.*

Estas pruebas se las realizaron luego de haber modificado la ubicación de los espigones aumentando el espaciamiento de cada uno de ellos a 45˚, desde la entrada hasta la terminación de la misma, como se muestra en la siguiente foto .



4.6.3 Toma de datos

Grados	Altura de velocidad	Velocidad: $V = \sqrt{2g \times \Delta h}$,
0˚	4	8,854
20˚	3,2	7,920
40 ˚	3,5	8,283
60 ˚	3	7,668
80 ˚	2,9	7,539
90 ˚	3	7,668
100 ˚	2,8	7,408
120 ˚	2,5	7,000
140 ˚	3	7,668
160 ˚	1,8	5,940
180 ˚	1,6	5,600

4.6.4 Análisis de los resultados

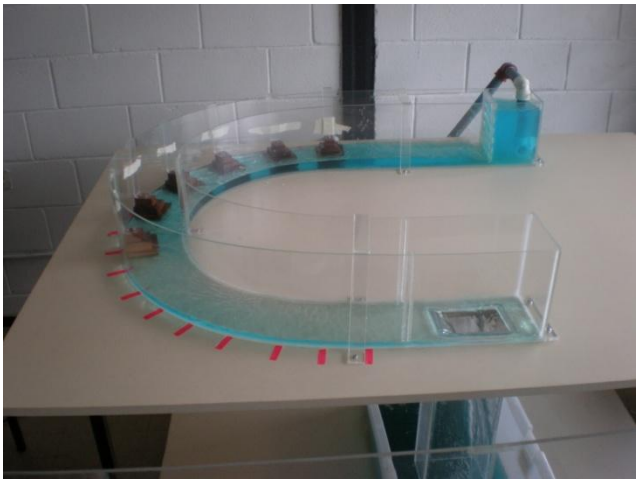
Con los datos obtenidos de los ensayos anteriores y los obtenidos en este nuevo arreglo para la simulación y ensayos, se puede observar que el haber colocado los espigones a

una distancia cada uno de ellos de 45 ˚ en la curva de un cauce natural no se obtienen los resultados deseados y su funcionamiento no es tan efectivo como el que se pudo observar en los ensayos de la pruebas anteriores, debido a que el distanciamiento de los espigones no produce efectos favorables para el control del flujo y velocidad; es decir que esta disposición general de los espigones no sería recomendable para el control del flujo en curvas de cauces de ríos, por los reducidos efectos favorables de control de las alturas de flujo y velocidades del agua .

4.7 Práctica # 4

4.7.1 Espigones ubicados cada 20˚.

Con los resultados obtenidos de las pruebas anteriores y en vista de los resultados favorables, se analizó y determinó la necesidad de realizar pruebas con espigones ubicados longitudinalmente a una distancia equivalente de 20˚, desde la entrada de la curva, como se puede observar en la foto siguiente.



4.7.2 Toma de datos

Grados	Altura de velocidad	Velocidad: $V = \sqrt{2g \times \Delta h}$,
0˚	4	8,854
20˚	3	7,668
40 ˚	2,8	7,408
60 ˚	2,5	7,000
80 ˚	2,2	6,567
90 ˚	2,2	6,567
100 ˚	1,8	5,940
120 ˚	1,5	5,422
140 ˚	1,5	5,422
160 ˚	1,3	5,048
180 ˚	1,2	4,850

4.7.3 Análisis de los resultados

Analizando esta nueva información obtenida de esta nueva serie de ensayos y relacionándolos con los ya obtenidos anteriormente se puede afirmar que colocar espigones con un espacio longitudinal equivalente a una variación angular de 20 ˚ en una curva de un cauce natural, contribuye efectivamente a controlar la altura de flujo y correspondientemente a la disminución de la velocidad en la parte exterior de la curva y en la salida de la misma, como lo muestran los datos medidos y los resultados obtenidos, los cuales contribuyen al control de la erosión en la curva.

4.8 Práctica # 5

4.8.1 Espigones expuestos en la entrada y salida de la curva ubicados cada 60˚.

Para tener una gama de ensayos y pruebas que permitan obtener datos y resultados para contrastar con los ya obtenidos, se realizaron pruebas y ensayos colocando los espigones ubicados con un espaciamiento longitudinal equivalente a una variación angular cada 60˚, desde la entrada de la curva hasta su salida, como se puede observar en la siguiente foto.



4.8.2 Toma de datos

Grados	Altura de velocidad	Velocidad: $V = \sqrt{2g \times \Delta h}$,
0˚	4	8,854
20˚	3	7,668
40 ˚	3	7,668
60 ˚	3,2	7,920
80 ˚	2,5	7,000
90 ˚	2,5	7,000

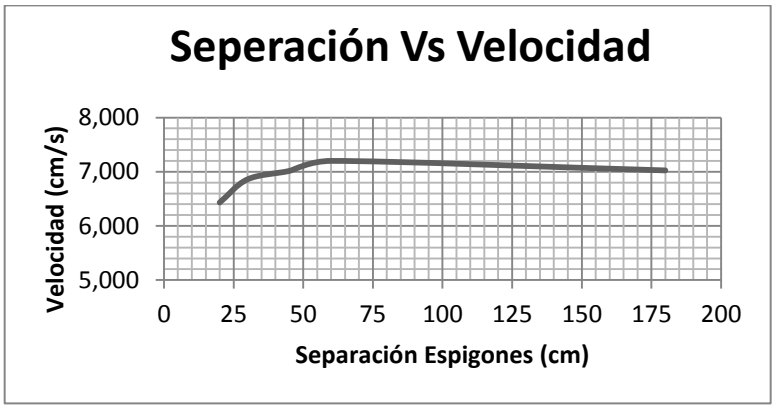
100 ˚	2,5	7,000
120 ˚	2	6,261
140 ˚	2	6,261
160 ˚	1,8	5,940
180 ˚	1,6	5,600

4.8.3 Análisis de los resultados

Los resultados de esta prueba contrastados con los ya obtenidos con las pruebas anteriores permiten deducir que colocar espigones con un espaciamiento longitudinal equivalente a una variación angular cada 60 ˚ en una curva de un cauce natural , no permite obtener los fines perseguidos de controlar la profundidad de flujo, velocidad y erosión de la curva y no ayuda a su buen funcionamiento, como se puede observar en los resultados tabulados, por lo cual esta disposición tampoco sería recomendable que se utilice en el control de estas variables de flujo en aplicaciones en prototipos o proyectos.

4.9 Conclusiones de las prácticas.

Con los resultados de los ensayos y pruebas realizados para observar el comportamiento del flujo con la utilización de espigones a diferentes espaciamientos y con la toma de datos de tiempo obtenidos en cada una de las separaciones ensayadas se procedió a calcular la velocidad media, lo que permitió determinar una relación entre la velocidad de flujo y la separación longitudinal de los espigones como se representa en el siguiente gráfico.



Analizando el gráfico obtenido se puede deducir que cuando se incrementa el espaciamiento longitudinal o separación de los espigones, la velocidad del flujo aumenta hasta un cierto punto de inflexión para luego disminuir. En el caso analizado bajo las condiciones descritas anteriormente, la velocidad del flujo aumenta hasta una separación longitudinal de los espigones equivalentes a una variación angular de 45 grados. Teniendo en cuenta que uno de los objetivos de los implantación de los espigones en una curva de un cauce de un río es que éstos permitan modificar el cauce del río y por lo tanto sus características de flujo mediante un auto ajuste del mismo, tratando de alcanzar que los espigones logren el máximo aumento de la velocidad de flujo.

Recordando las recomendaciones realizadas fruto de anteriores diseños y construcción de espigones en curvas de un cauce de un río y con los resultados y conclusiones obtenidos de esta investigación, y con el propósito de emitir recomendaciones prácticas a ser aplicadas en el diseño y construcción de los espigones en curvas del cauce natural de un río, se recomienda establecer una separación entre espigones de cuatro veces la longitud de trabajo del espigón. También ha sido posible determinar que esta separación debería ser menor en los tramos del cauce del río más susceptibles a ser afectados por la acción de la corriente de agua, como sucede en las orillas exteriores a los cauces en curvas.

Esta recomendación concuerda con aquellas que se obtuvieron de la revisión teórica bibliográfica del diseño de los espigones realizada al inicio de esta investigación, por lo

que los resultados obtenidos permiten ratificar los criterios obtenidos por varios investigadores para el diseño y construcción de espigones en curvas de ríos. .

5 Capítulo 5 Conclusiones y Recomendaciones

5.2 Conclusiones

- Los espigones son diques transversales a los flujos normales de agua en canales o cauces naturales, que tienen como objetivo controlar la inestabilidad fluvial y manejar el río, para de esta manera controlar y prevenir de los cambios fluviales de las márgenes de un río.

- El análisis y diseño de los espigones es muy difícil realizar en un modelo analítico de oficina, ya que es necesario estudiar y comprender fenómenos físicos complejos que tienen lugar en el funcionamiento de los mismos, por lo que la utilización de modelos físicos reducidos es una solución para estudiar y determinar el comportamiento de un prototipo, ante la dificultad de realizar el análisis de oficina o utilizando modelos matemáticos. El estudio y análisis en modelos físicos permite obtener ventajas constructivas, de ejecución, económicas y genera una mayor confianza y tranquilidad a todos los actores que están involucrados en una obra.

- El modelo construido permitió reproducir las condiciones de funcionamiento de curvas en cauces naturales y estudiar el comportamiento de los diferentes fenómenos en tramos en donde las curvas tienen un ángulo de 180 ˚, a pesar de las limitaciones presentadas en el espacio necesario para la construcción del modelo y a que las disponibilidades presupuestarias fueron limitadas. Se debe reconocer que muchos aspectos de los sistemas complejos hidráulicos no pudiron ser modelados satisfactoriamente y requieren de amplia y profunda experiencia para su representación. Sin embargo, y a pesar de todo, el uso de los modelos físicos sigue siendo la mejor herramienta para obtener criterios de diseño hidráulico.

- El costo elevado de los materiales para la construcción del modelo, fueron una limitante para construir un modelo más grande en donde se puedan tomar datos más exactos, pero el canal funcionó como un meandro y se evidenció la función de los espigones en un canal en curva.

- Los espigones fueron construidos para representar la geometría y rugosidad del prototipo, con el material y tamaño correctos para poner en evidencia los fenómenos que ocurren cuando estos se colocan en canales, logrando simular su funcionamiento y obteniendo los resultados necesarios para emitir las presentes conclusiones y recomendaciones del uso de espigones en el modelo, obteniendo en conjunto un funcionamiento correcto.

- El estudio de los efectos que se producen por colocar los espigones dispuestos en diferentes ubicaciones: cada 180˚, cada 60˚ y cada 45˚ en un canal en curva, permitió observar que en estos casos no contribuyen a la disminución de la velocidad en la parte exterior de la curva, manteniendo el problema de la erosión, la cual no va a disminuir si los espigones se construyen en estas ubicaciones, lo cual a pesar de esta dificultad, ayuda a que el cauce del canal presente un auto ajuste, ya que la velocidad aunque no disminuye se vuelve constante a lo largo del canal.

- De los casos analizados en la presente investigación, para las condiciones de funcionamiento del prototipo simuladas en el modelo, colocar espigones cada 20˚ y 30˚ un cauce natural en curva, contribuye efectivamente a la disminución de la velocidad en la parte exterior y en la saliday efectivamente contribuye al control de la erosión, por lo que si el objetivo principal es el de controlar la erosión, se recomienda que la distancia entre espigones sea menor.

5.2 Recomendaciones

- La modificación de las condiciones de flujo en el cauce de un río mediante el diseño y construcción de espigones, obliga a la necesidad de planificar y realizar un monitoreo continuo de las condiciones de funcionamiento, que permita supervisar el comportamiento del cauce y posteriormente planificar las acciones que permitan controlar sus efectos cuando se estime que puede ocasionar algún problema.

- La utilización de modelos para estudiar el comportamiento y los efectos de obras hidráulicas es de gran beneficio técnico y económico, por lo que cuando se tienen obras de gran tamaño o con una gran repercusión social y económica es importante planificar la realización de modelos físicos, pues de esta manera se logrará predecir de manera más cierta y efectiva cuál será el comportamiento de una determinada obra en un cierto medio. Esta decisión permitirá obtener ventajas técnicas que se traducirán en ventajas económicas.

- La dificultad de poder resolver problemas utilizando métodos teóricos o computacionales que no permiten observar el verdadero funcionamiento de una obra hidráulica es la justificación del uso en los modelos hidráulicos físicos a escala. La única prueba o garantía del éxito de la modelación hidráulica en modelos físicos a escala lo proporciona la profundidad que se puede realizar del análisis del comportamiento de la estructura, optimizando en su verdadera dimensión la naturaleza y condiciones del prototipo.

6 Bibliografía

- Asesoría de los profesores de la Facultad de Ingeniería Civil de la PUCE
- Troskolanski, Adam T. Theorie Pratique des Mesures Hydrauliques Editorial Dunod París 1962.
- Vergara Sánchez, Miguel Ángel. Técnicas de Modelación en Hidráulica Editorial Alfaomega-IPN.1993.
- Holman, Jack P. Métodos Experimentales para Ingenieros Editorial Mc Graw Hill. 1990.
- Bonilla Gris, Robie y Salinas Quinard, Luis. Diseño Hidráulico de Cárcamos de Bombeo. Centro de Actualización, Profesional de Ingeniería Civil, ESIA-Zacatenco, 1984.
- Ingeniería de Ríos, Juan Pedro Martin Vide, edición UPC,2007
- Ranald V. Giles, Mecánica de los Fluidos e Hidraúlica, Tercera Edición, 1994.
- Información obtenida del Internet.