



UNIVERSIDAD DON VASCO A.C.

Incorporación no. 8727 – 15

a la Universidad Nacional Autónoma de México.

Escuela de Ingeniería Civil

REVISIÓN ESTRUCTURAL Y PROPUESTA DE MANTENIMIENTO DEL CANAL DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA “EL CÓBANO” KM 8+870.55 AL 9+914.55, LOMBARDÍA, MICHOACÁN.

Tesis

que para obtener el título de

Ingeniero civil

Presenta:

Jessica Alejandra Cabrera Ramírez

Asesor: I.C. Anastacio Blanco Simiano

Uruapan, Michoacán, a 02 de abril del 2019.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos.

A Dios, por el bello don de la vida, porque cada día me bendice con la oportunidad de gozar la compañía de las personas que amo y que sé que me aman, por darme cada día una oportunidad nueva de amar a mis padres, y a mis padres por mostrarme el amor de Dios.

A mi padre, Juan Luis Cabrera Orozco, por ser el ingeniero de mis sueños y mi mayor ejemplo a seguir, por impulsarme cada día a superarme, por siempre desear y anhelar lo mejor para mi vida, gracias por cada consejo y por cada una de sus palabras que me guiaron durante mi vida.

A mi madre, Ana María Ramírez Hernández, por ser el motor de mi vida, por estar dispuesta a acompañarme cada noche larga y cansada de estudio, porque su compañía y sus cafés eran la bendición más grande. Gracias por amarme sin medida. Gracias por creer en mí y nunca dejarme sola.

A mis hermanos, Juan Luis y Santiago Cabrera Ramírez, por ser el motivo de mis alegrías, mis cómplices de travesuras y sobre todo por darle la luz a mi vida, por mostrarme lo bonito de la vida, por estar para mí cuando los necesito y por el apoyo y cariño que me dan.

A Luis Alfonso González González, por su apoyo incondicional en mi vida, por ser el ingrediente perfecto para poder alcanzar esta dichosa y muy merecida victoria en la vida, por poder disfrutar el privilegio de su compañía y su amor, por siempre preocuparse por mi bienestar y sobre todo por siempre querer lo mejor para mí.

A mi asesor, el ingeniero Anastasio Blanco Simiano, agradezco por el apoyo brindado en la elaboración de esta tesis, por ayudarme y guiarme, por estar presente para resolver cualquier duda, pero sobre todo por ser un gran director, por preocuparse por sus alumnos, por las pláticas en el corredor y las palabras de apoyo que llegué a escuchar de él hacia mis planes futuros, gracias por ser un gran profesor, por su preparación y dedicación en cada una de sus clases.

ÍNDICE.

Introducción.

Antecedentes.	1
Planteamiento del problema.	2
Objetivo.	3
Pregunta de investigación.. . . .	4
Justificación.	4
Marco de referencia.	5

Capítulo 1.- Hidráulica de canales

1.1. Concepto de hidráulica.	6
1.2. Concepto de canal.	6
1.3. Geometría de canales.	7
1.4. Canales abiertos.	9
1.5. Tipos de flujo.	12
1.6. Ecuaciones fundamentales.	15
1.7. Ondas en canales.	23
1.8. Número de Froude.	26
1.9. Regímenes de flujo.	27
1.10. Salto hidráulico.	29
1.11. Pérdidas por fricción.	34

Capítulo 2.- Diseño hidráulico de canales

2.1.	Concepto de diseño.	41
2.2.	Consideraciones de diseño.	41
2.2.1.	Velocidades mínima y máxima permisibles.	43
2.2.2.	Talud.	48
2.2.3.	Coeficiente de rugosidad.	50
2.2.4.	Pendiente, bordo libre, ancho de berma y espesor revestido.	53
2.3.	Diseño de canales.	57
2.3.1.	Revestidos..	57
2.3.2.	No revestidos.	63
2.4.	Canales.	65
2.4.1.	Inspección.	65
2.4.2.	Mantenimiento.	68
2.4.2.1.	Mantenimiento preventivo.	70
2.4.2.2.	Mantenimiento correctivo.	73

Capítulo 3.- Resumen de micro y macrolocalización

3.1.	Generalidades.	77
3.1.1.	Objetivos.	77
3.1.2.	Alcance del proyecto.	78
3.2.	Resumen ejecutivo..	78
3.3.	Entorno geográfico..	79
3.3.1.	Micro y macrolocalización.	79
3.3.2.	Geología Regional y de la Zona en Estudio.	83

3.3.3.	Hidrología Regional y de la Zona en Estudio.	83
3.3.4.	Uso de Suelo Regional y de la Zona en Estudio.	84
3.4.	Informe Fotográfico.	84
3.4.1.	Problemática.	87
3.4.2.	Estado Físico Actual.	87
3.5.	Alternativas de solución.	88
3.5.1.	Planteamiento de alternativas.	88
3.6.	Procesos de análisis.	88

Capítulo 4.- Metodología

4.1.	Método empleado.	89
4.1.1.	Método matemático.	90
4.2.	Enfoque de la investigación.	90
4.2.1.	Alcance de la investigación.	92
4.3.	Diseño de la investigación.	93
4.4.	Instrumentos de recopilación de datos.	95
4.5.	Descripción del proceso de investigación.	96

Capítulo 5.- Cálculos, análisis e interpretación de resultados

5.1.	Inspección.	97
5.2.	Evidencia.	99
5.3.	Aforo.	124
5.4.	Cálculo de la velocidad superficial.	125
5.5.	Mantenimiento.	128

5.6. Programa de obra.	130
Conclusión.. . . .	134
Bibliografía.. . . .	137
Anexos.	

INTRODUCCIÓN

Antecedentes.

La palabra revisión proviene de la palabra *revisio* en latín, es la acción de revisar. Este verbo alude a someter algo a examen o a observar con cuidado y atención. La revisión conlleva la exploración y el análisis detallado que se lleva a cabo sobre una determinada cuestión o cosa.

La palabra propuesta proviene del origen etimológico de la palabra puesta viene del término latino *proposita*. Que significa puesta adelante. Una propuesta es una invitación u oferta que alguien dirige a otro o a otros, persiguiendo algún fin; puede ser concretar un negocio, una idea, una relación personal, un proyecto laboral o educacional, una actividad lúdica, etcétera.

En la biblioteca de la Universidad Don Vasco A.C. se encuentra sólo una tesis que refiere al tema del mantenimiento de canales, se titula “Mantenimiento de canales de conducción para generación de energía eléctrica” y fue realizada por el ingeniero Roberto Silva Chacón, en el año 2007. Esta tesis está propuesta para el canal de la C.H. El Cóbano.

“El conocimiento empírico del funcionamiento de los canales se remonta a varios milenios. En la antigua Mesopotamia se usaban canales de riego mientras que en la Roma Imperial se abastecían de agua a través de canales construidos sobre inmensos acueductos. Los habitantes del antiguo Perú construyeron una serie de canales, de los cuales algunos de ellos continúan funcionando en la actualidad. Un ejemplo de ello son los canales de Cumbemayo, pertenecientes a la ciudad de

Cajamarca, ubicada en la vertiente oriental de la Cordillera de los Andes, en la sierra norte del país y son el centro hidráulico más importante de los Andes. El conocimiento y estudio sistemático de los canales se remonta al siglo XVIII, con Chézy, Bazin y otros.” (Valiente; 2016: 403)

De acuerdo con Valiente (2016), los egipcios fueron los primeros en utilizar canales para fertilizar sus campos con las aguas del río Nilo. Para el año 330 a.C. existía un canal que unía al río Tigris y al río Euleom, el cual le sirvió a Alejandro Magno en sus numerosas conquistas. El canal Corinto es una vía artificial que une al golfo de Corinto y al mar Egeo que data desde al menos el siglo VII a.C.

Planteamiento del problema.

En base a estudios realizados respecto a inspección y evaluación, en 2003, se ha encontrado que el canal de conducción que alimenta a la C.H. El Cóbano y que corresponde al tramo contenido entre la presa derribadora de Jicalán y el puente sifón Barranca Honda, se encontró que se ha perdido gran parte del recubrimiento tanto en la plantilla como en taludes en una longitud considerable, ocasionando filtraciones que ponen en riesgo la estructura del terraplén pudiendo ocasionar la falla del canal; además en su interior se encuentra azolve y maleza acuática que obstruyen el flujo del agua disminuyendo la capacidad de conducción del canal; por otra parte y no menos importante se tiene vegetación en ambas márgenes, la cual daña con sus raíces los muros.

¿Por qué es relevante hacer una revisión de un canal de conducción de agua para la generación de energía eléctrica?

En base a esto se ha llegado a la conclusión de que se necesita realizar una revisión actualizada para así determinar el tipo de mantenimiento para poder prolongar la vida útil del canal, además así se previene el riesgo de fallas de mayor magnitud en la estructura que en caso de producirse esto obligaría a El Cóbano mantenimiento de emergencia que generaría aún más costos ya que se tendría que para la planta generadora durante un tiempo indefinido y la falta de agua a las comunidades que aprovechan sus aguas.

Objetivos.

Objetivo general.

Revisar un tramo del canal de conducción que alimenta a la Central Hidroeléctrica “El Cóbano” para conocer si está en óptimas condiciones para su correcto funcionamiento, así como proponer un mantenimiento para éste.

Objetivos específicos.

- 1) Detectar las áreas con mayor deterioro, así como medir el nivel de daño generado en esas zonas.
- 2) Indicar la importancia que tiene la inspección y evaluación de las obras de conducción.
- 3) Verificar si las condiciones en las que se encuentra el canal son las adecuadas para la velocidad del caudal que corre por él.
- 4) Verificar si las condiciones en las que se encuentra el canal son las adecuadas para el gasto que corre por él.

- 5) Proponer un mantenimiento preventivo o correctivo que sea efectivo para la mejora de las secciones que se encuentren afectadas, según sea el caso.
- 6) Indicar la importancia de la realización de mantenimientos y actividades de conservación.

Pregunta de investigación.

¿Qué pasaría si no se realizara un mantenimiento del canal de la Central Hidroeléctrica El Cóbano?

Al no realizarse actividades de mantenimiento en las obras de conducción éstas empiezan a deteriorarse, ya sea por el constante flujo de agua, por la maleza acuática que se encuentra en la plantilla del mismo o por la vegetación en ambos márgenes, disminuyendo tanto la producción de la energía eléctrica y como el rendimiento original para el cual ese canal fue diseñado el canal, además exponiendo la estructura a sufrir mayores daños.

Sin embargo, cuando en las estructuras se realizan con mayor frecuencia mantenimientos y actividades de conservación, la incertidumbre de que ocurra una falla disminuye y así el canal tiende a mantener las características físicas aproximadas a las del proyecto y del diseño original funcionando así en excelentes condiciones.

Justificación.

Este trabajo surge de la necesidad de hacer una revisión de la condición en la que se encuentra el tramo elegido de las obras de conducción que alimentan a la

Central hidroeléctrica “El Cóbano”, ya que por el paso de los años y debido a la antigüedad del mismo, la obra necesita ser reevaluada para tener datos concisos.

Así como manifestar la importancia que tiene realizar un correcto mantenimiento, ya sea correctivo o preventivo, de las ciertas áreas del sistema de conducción que se distinga afectadas durante su revisión, ya que esto trae resultados desfavorables en la producción de energía eléctrica, ya sea por pérdidas de agua, velocidad y por la pérdida económica que genera una falla dentro del canal en cualquier día del año.

Marco de referencia.

El canal está localizado en el municipio de Gabriel Zamora, Michoacán, específicamente en la localidad de Chaparendo; comienza en la presa de Jicalán, el tramo de este proyecto es del km 8+870.55 al 9+914.55, se tiene acceso al canal por la carretera Carapan – Playa Azul, hacia localidad de Lombardía.

Este canal está situado en la localidad de La Gallina a 7 km de la carretera, es una canal rectangular, que sirve para conducir el agua hacia la Central hidroeléctrica “El Cóbano”, que está geográficamente localizada entre las coordenadas 19° 11' longitud norte y 101° 56' latitud oeste.

La central está comunicada por la carretera No.37 Uruapan-Playa Azul, para llegar a ella es imprescindible bifurcar a la altura del poblado “Gabriel Zamora” hacia la izquierda por medio de la glorieta y después de transitar 7 km., se llega a al campamento de la central y a 1 km. del campamento se encuentra la central.

CAPÍTULO 1

HIDRÁULICA DE CANALES

En el presente capítulo se mencionan los términos más importantes a considerar al momento de diseñar un canal, como son el concepto de canal e hidráulica, cuál es la clasificación de acuerdo a su forma geométrica, qué son los canales abiertos, tipos de flujo, así como las ecuaciones fundamentales para la revisión del canal, ondas en canales, el número de Froude, regímenes de flujo, el salto hidráulico y las pérdidas por fricción.

1.1. Concepto de hidráulica.

“Cuando las leyes y principios de la hidrométrica se aplican al estudio del flujo de agua en estructuras que interesan directamente al ingeniero civil, surge entonces la disciplina conocida como hidrométrica técnica o hidráulica.” (Sotelo; 1997:17)

1.2. Concepto de canal.

“De manera elemental, podría definirse un canal como una estructura que conduce un líquido por efecto exclusivo de la acción de la gravedad. Obsérvese que esta definición nada tiene que ver con la forma geométrica de la estructura.” (Gardea; 1994: 1)

“El término canal lo usamos aquí para indicar no solamente todas las corrientes abiertas naturales y artificiales que presentan una superficie libre sobre la cual actúa la presión atmosférica, sino también los conductos cerrados que fluyen parcialmente llenos.” (Trejo; 1975: 5)

Desde el punto de vista de la hidráulica, un canal puede definirse como aquella estructura capaz de conducir de un punto a otro un flujo en específico en cuyas secciones transversales o tubos de conducción.

1.3. Geometría de canales.

De acuerdo con Chow (1994), un canal prismático es aquel es aquel que está construido con una sección transversal invariable y una pendiente de fondo también constante, de otra manera éste sería un canal no prismático.

En este capítulo el término sección de canal es referido a la sección transversal de un canal en forma perpendicular al fondo o a la línea de inclinación media de su plantilla. La sección vertical de canal, es la sección vertical que pasa a través del punto más bajo de la sección de canal.

Según Sotelo (2002), las secciones de los canales naturales suelen ser muy irregulares (no prismáticos), y generalmente varían desde aproximadamente una parábola hasta aproximadamente un trapecio, esta sección varía continuamente de un sitio a otro. Por otro lado, los canales artificiales son diseñados con secciones geométricas regulares (prismáticos).

Villón (2007) realiza esta clasificación:

- Secciones cerradas:
 - Sección circular: comúnmente son utilizados para alcantarillas y estructuras hidráulicas importantes.
 - Sección de herradura: comúnmente son utilizados para alcantarillas y estructuras hidráulicas importantes.

- Secciones abiertas:
 - Sección trapezoidal: usados siempre en canales revestidos y en canales de tierra.
 - Sección rectangular: utilizado para acueductos de madera, canales revestidos y canales excavados en roca.
 - Sección triangular: usado para las cunetas revestidas al borde de las carreteras, así como en canales de tierra pequeños, por su facilidad de trazo, un ejemplo de esto son los surcos.
 - Sección parabólica: algunas veces se emplea en canales revestidos y muchas veces se pueden encontrar en canales naturales ya que es la forma que toman aproximadamente y en algunos canales viejos de tierra.

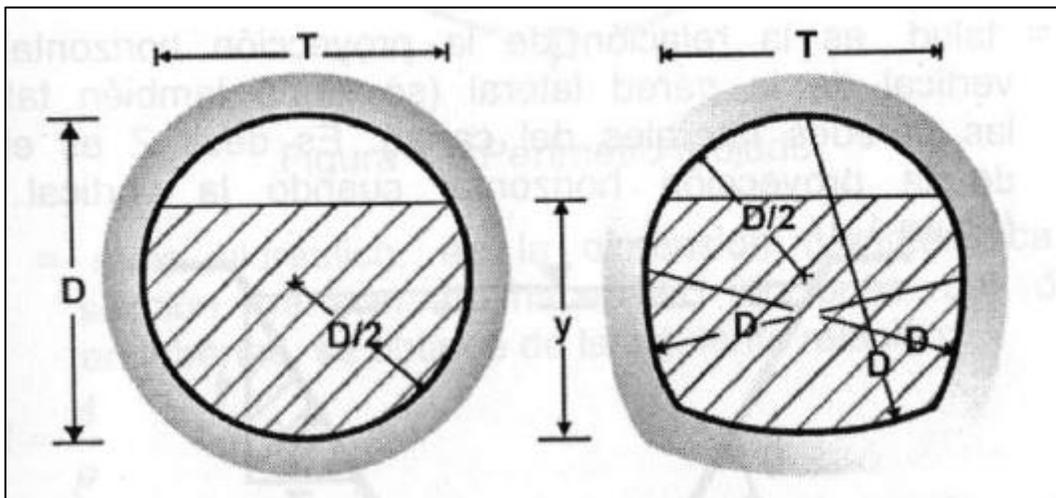


Figura 1.1 Secciones transversales cerradas.

Fuente: Villón; 2007; 17.

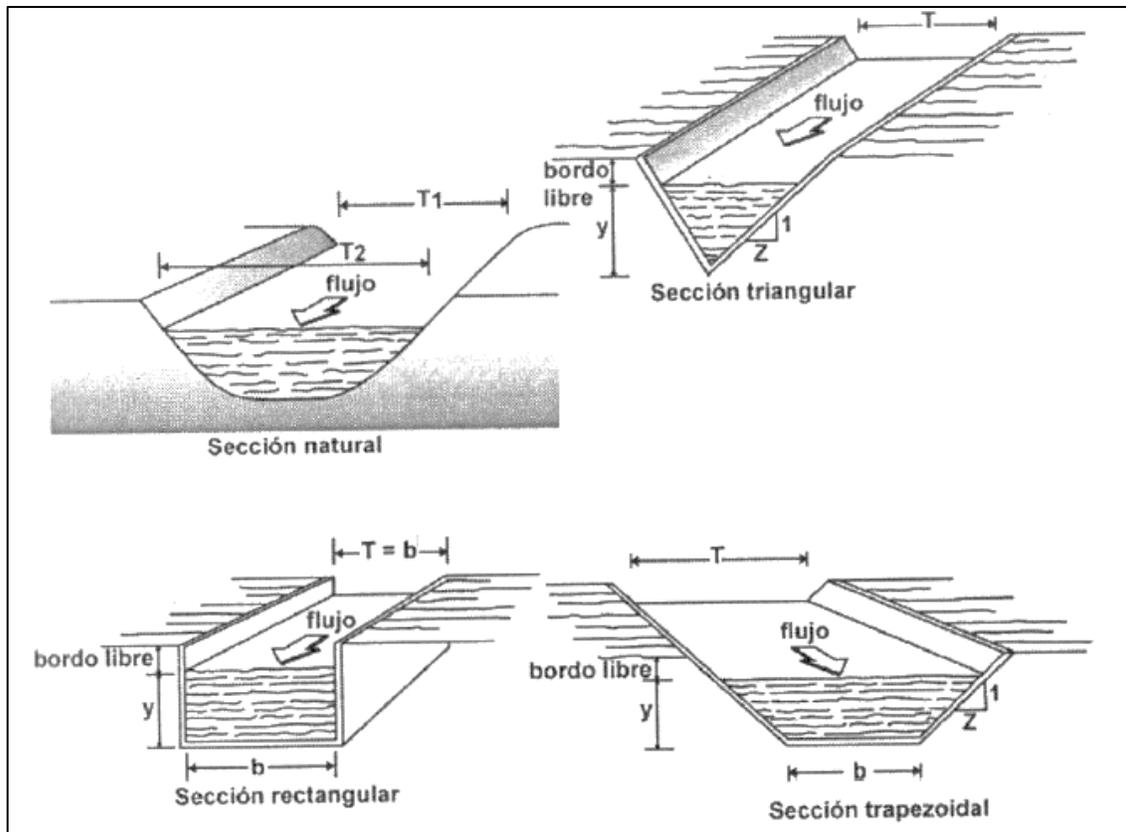


Figura 1.1 Secciones transversales abiertas.

Fuente: Villón; 2007; 17.

1.4. Canales abiertos.

“Un canal abierto es un conducto en el cual el agua fluye con una superficie libre. De acuerdo con su origen un canal puede ser natural o artificial.” (Chow; 1994: 19)

En canales abiertos el flujo tiene una superficie libre gracias a esto está solamente sometido a la presión atmosférica sin embargo en canales cerrados o tuberías, el flujo no cuenta con una superficie por esto es que solamente éste se encuentra sujeto a una presión hidráulica. El contar con una superficie libre ocasiona

que generalmente sea más complicado el análisis del flujo en un canal abierto que en uno cerrado, todo esto en concordancia con (<http://ponce.sdsu.edu/canales/>;2015).

De acuerdo con Chow (1994), los canales naturales son desarrollados por procesos naturales tales como todas aquellas circulaciones de agua innatas de la Tierra y generalmente las propiedades que poseen son bastante irregulares, como mención de esto su tamaño, que puede variar desde pequeños arroyuelos, arroyos, ríos pequeños y grandes, y estuarios de mareas. Son consideradas también como canales naturales aquellas corrientes de agua que llevan agua con una superficie libre.

Los canales artificiales, por su parte, son aquellos que el esfuerzo humano ha construido, tales como: canales de navegación, canales y canaletas de irrigación, cunetas de drenaje, vertederos, canales de desborde, canaletas de madre, cunetas a lo largo de carreteras, canales de centrales hidroeléctricas, que es el objeto de estudio de este trabajo, entre muchos más, así como canales modelados en laboratorio para con propósitos experimentales. Las propiedades hidráulicas que poseen éstos son regulares ya que son diseñadas para ejecutar requisitos definidos o controlados hasta un nivel deseado.

“El canal artificial por lo general es un canal largo con pendiente suave construidos sobre el suelo, que puede ser o no revestido con piedras, concreto, cemento, madera o materiales bituminosos.” (Chow; 1994: 20)

Sección	Área A	Perímetro mojado P	Radio hidráulico R	Ancho superficial T	Profundidad hidráulica D	Factor de sección Z
Rectángulo	By	$b + 2y$	$\frac{by}{b + 2y}$	B	Y	$by^{1.5}$
Trapezio	$(b + zy)y$	$b + 2y\sqrt{1 + z^2}$	$\frac{(b + zy)y}{b + 2y\sqrt{1 + z^2}}$	$b + 2zy$	$\frac{(b + zy)y}{b + 2y}$	$\frac{[(b + zy)y]^{1.5}}{\sqrt{b + 2zy}}$
Triángulo	zy^2	$2y\sqrt{1 + z^2}$	$\frac{zy}{2\sqrt{1 + z^2}}$	$2zy$	$\frac{1}{2}y$	$\frac{\sqrt{2}}{2}zy^{2.5}$
Círculo	$\frac{1}{8}(\theta - \sin \theta)d_0^2$	$\frac{1}{2}\theta d_0$	$\frac{1}{4}\left(1 - \frac{\sin \theta}{\theta}\right)d_0$	$\left(\frac{\sin \theta}{2}\right)d_0$ or $2\sqrt{y(d_0 - y)}$	$\frac{1}{8}\left(\frac{\theta - \sin \theta}{\sin \frac{\theta}{2}}\right)d_0$	$\frac{\sqrt{2}(\theta - \sin \theta)^{1.5}}{32\left(\sin \frac{\theta}{2}\right)^{0.5}}d_0^{2.5}$
Parábola	$\frac{2}{3}Ty$	$T + \frac{8y^2}{3T} *$	$\frac{2T^2y}{2T^2 + 8y^2}$	$\frac{3A}{2y}$	$\frac{2}{3}y$	$\frac{2}{9}\sqrt{6}Ty^{1.5}$

* Aproximación satisfactoria para el intervalo $0 < 4y/T$. Cuando $x > 1$, utilizar la expresión exacta $P = (T/2) * \dots$

... * $\left[(1 + x^2)^{0.5} + \frac{1}{x} \ln \left(x + (1 + x^2)^{1.5} \right) \right]$

Fuente: Ven. T. C. (1995).

Tabla 1.1 Elementos geométricos de las secciones de un canal.

Fuente: Chow; 1994; 21.

De acuerdo con Simon (1983), en canales abiertos la velocidad del flujo es consecuencia de la gravedad por esto es que el canal debe tener pendiente hacia abajo, también puede variar la sección transversal de una canal a lo largo del recorrido del flujo, otra característica de este es que el perímetro de la sección transversal está formado por dos partes una denominada superficie libre que esta es la superficie de agua que se encuentra expuesta al aire y la otra denominada perímetro mojado, que es el agua que se encuentra en contacto directo con las paredes del canal. La presión atmosférica en la superficie libre siempre es nula.

1.5. Tipos de flujo.

De acuerdo con Chow (1994), existen diversos tipos de flujo, los explicados en este trabajo serán de acuerdo a la variación de profundidad del flujo con respecto del tiempo y espacio.

Si en un canal abierto la profundidad del flujo no varía o permanece constante durante un tiempo determinado el flujo es permanente, pero si la profundidad del flujo varía con respecto del tiempo entonces el flujo no es permanente, un claro ejemplo de esta situación son las crecientes y oleadas, donde el nivel de flujo varía de manera instantánea cuando las olas pasan y el tiempo se vuelve un elemento vital para el diseño de estructuras de control.

El flujo permanente no uniforme es cuando una parte del agua sale o entra a lo largo del curso del flujo, también es llamado flujo espacialmente variado o discontinuo.

El flujo en canales abiertos es uniforme siempre y cuando la profundidad de flujo sea la misma en cada sección estudiada; y es permanente si la profundidad se mantiene en el mismo nivel a lo largo del canal y no permanente si la profundidad varía con respecto del tiempo.

Según Chow (1994), el flujo uniforme permanente, aquí la profundidad de flujo no cambia durante el intervalo de tiempo especificado y el flujo uniforme no permanente necesitaría que la superficie del agua variara de un tiempo a otro, pero se mantuviera en el fondo del canal, esto es prácticamente imposible.

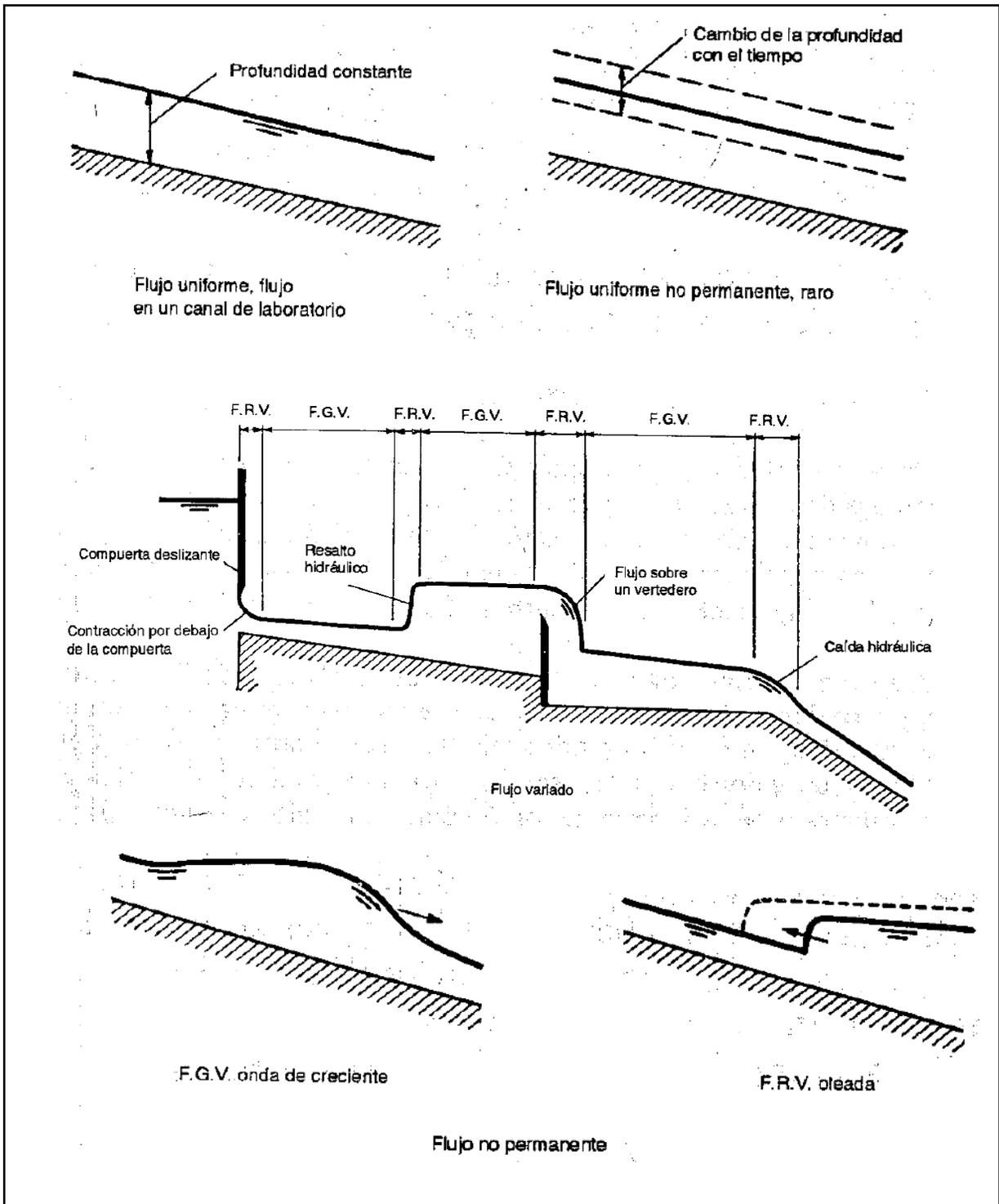


Figura 1.2 Diferentes tipos de flujo en canales abiertos.

Fuente: Chow; 1994: 7.

El flujo se considera variado cuando la profundidad del flujo permuta a lo largo del canal y éste a su vez puede clasificarse en dos permanente y no permanente. Además, puede clasificarse en rápidamente variado o gradualmente variado, y éste se considera así si la profundidad del agua se modifica de manera repentina en distancia relativamente cortas; si no sería considerada gradualmente variable. Un flujo rápidamente variado también se entiende como fenómeno local.

- A. Flujo permanente
 - a) Flujo uniforme
 - b) Flujo variado
 - i. Flujo gradualmente variado
 - ii. Flujo rápidamente variado
- B. Flujo no permanente
 - a) Flujo uniforme no permanente
 - b) Flujo no permanente
 - i. Flujo gradualmente variado no permanente
 - ii. Flujo rápidamente variado no permanente

De acuerdo con Gardea (1994), existen otros dos tipos de flujos más, el laminar y el turbulento, para esto es fundamental la determinación del número de Reynolds (Re), cuando el número de Reynolds es pequeño se presenta el flujo laminar este se caracteriza por las partículas que se encuentran en movimiento fluyen de forma paralela siendo así sus velocidades sensiblemente diferentes entre sí.

Al aumentar la velocidad del fluido, se aumentará por consiguiente el número de Reynolds, se presenta un momento en el que el efecto causado por la viscosidad desaparece y esto genera que la cohesión entre las partículas que se encuentran en movimiento se rompa y éstas se desplacen en forma sumamente irregular o caótica, causando así un flujo turbulento.

La turbulencia de un flujo es ocasionada por la rugosidad de las paredes del conducto. Esto es que en un conducto sea cerrado o abierto, el fluido se comporta de manera turbulenta en las paredes del conducto y laminar en la vena del éste.

1.6. Ecuaciones fundamentales.

Las ecuaciones fundamentales que son necesarias para llevar la investigación presente son las que se desarrollan en este subtema, tales como la ecuación de la conservación de la energía, ecuación de Bernoulli y conservación de la cantidad de movimiento.

- Conservación de la masa.

De acuerdo con Villón (2007), el volumen de fluido o caudal que circula por una sección en una unidad de tiempo, o bien, caudal, está definido por la ecuación:

$$Q = V * A \longrightarrow \boxed{\text{Ecuación 1.1}}$$

Donde:

Q = Caudal, se mide en m^3/s .

V = Velocidad media de la sección normal al flujo, m/s .

A = Área transversal, m^2 .

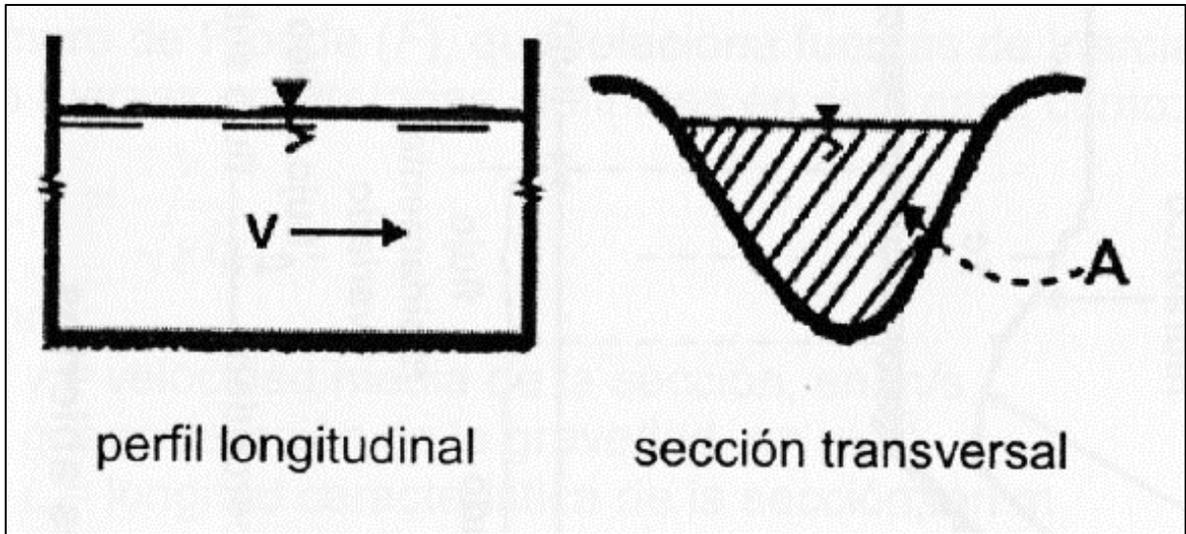


Figura 1.3 Perfil longitudinal y sección transversal de un canal.

Fuente: Villón; 2007: 50.

En un tramo de un canal en el que no existen entradas o salidas permanentes, el gasto medido debe ser el mismo en cualquier punto que se realice la evaluación. Esta es una ley de mucha importancia para la hidráulica que es conocida como principio de continuidad. Esta ecuación aplicada a las secciones 1, 2, 3, ..., n, se puede interpretar como:

$$V_1A_1 = V_2A_2 = V_3A_3 = \dots = V_nA_n \longrightarrow \text{Ecuación 1.2}$$

Nota: los subíndices designan las secciones del canal.

- Conservación de la energía.

En conformidad con Rodríguez (2008), la energía total de una porción de fluido que viaja a una aceleración constante de una línea de corriente se define como la suma de las energías de posición, más la de presión y más la de velocidad, esto es igual a

Energía total = Energía de posición + Energía de presión + Energía de velocidad

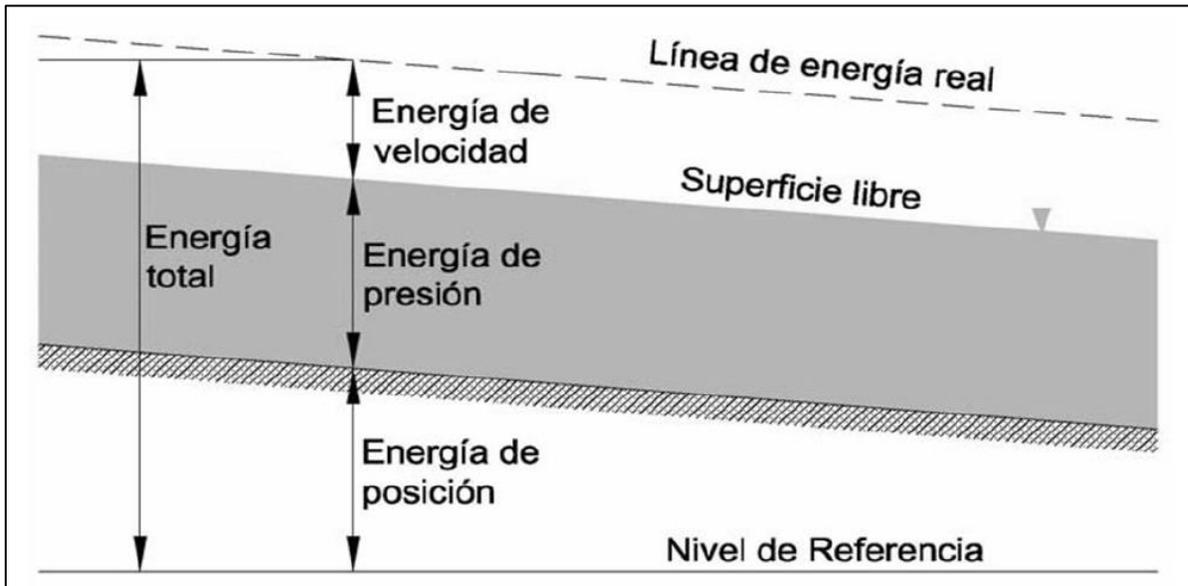


Figura 1.4 Energía total en una sección de un canal.

Fuente: Rodríguez; 2008: 120.

La ecuación unidimensional que cuantifica esta proporción es conocida como la ecuación de la energía y se expresa de esta manera:

$$H = Z_A + \frac{P_A}{\gamma} + \frac{V_A^2}{2g} = Z_A + d_A \cos \theta + \frac{V_A^2}{2g} \longrightarrow \text{Ecuación 1.3}$$

Donde:

Subíndice A = Punto sobre la línea de corriente de un flujo en el canal abierto.

Z_A = Elevación del punto A sobre un plano de referencia, m.

P_A = Presión en el punto A, kg/m².

γ = Peso específico del agua, kg/m³.

d_A = Tirante de sección del flujo, m.

θ : Ángulo de la pendiente del canal, °.

V_A = Velocidad en el punto A, m/s.

Para valores pequeños de θ la ecuación anterior es igual a:

$$H = Z_A + \gamma + \frac{V_A^2}{2g} \longrightarrow \boxed{\text{Ecuación 1.4}}$$

Donde:

γ = tirante del flujo.

V = velocidad media.

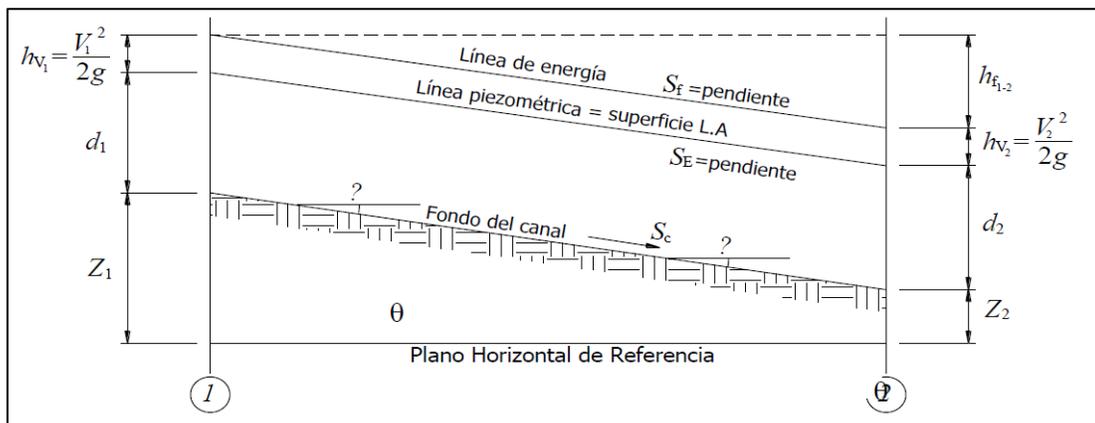


Figura 1.5 Sección longitudinal de un canal, mostrando la línea de la energía.

Fuente: Rodríguez; 2008: 122.

- Ecuación de Bernoulli.

De acuerdo con Levi (1996), la ecuación de Bernoulli que se definirá aquí, es para el caso de corrientes libres, éstas son aquellas que son arrastradas por su propio peso. A medida que el agua baja, su velocidad varía. Para poder deducir la ecuación de Bernoulli se determinará teóricamente la relación entre la caída de nivel y la velocidad de un canal. Para esto se debe considerar un tramo canal cuya sección longitudinal sea HKMN, siendo HK la superficie libre y MN el fondo del cauce. Suponiendo que el escurrimiento se realice en condiciones tales que los efectos de fricción con las paredes y el aire puedan despreciarse.

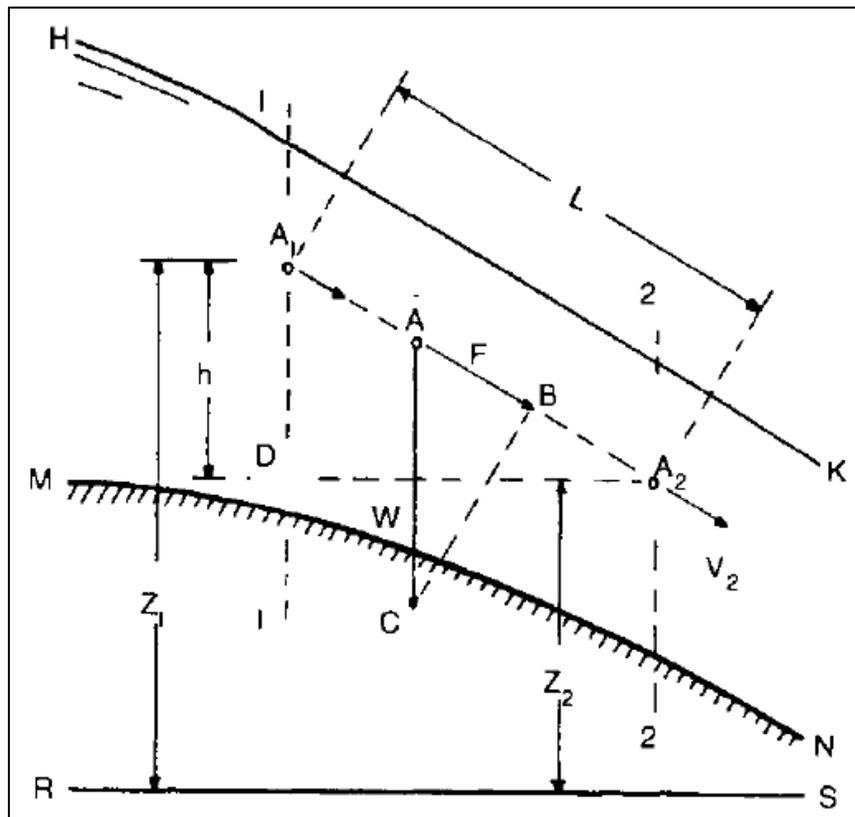


Figura 1.6 Esquema para determinar la ecuación de Bernoulli.

Fuente: Levi; 1996: 72.

Analizando la partícula A en su avance. Al momento de cruzar la sección 1 la hallamos en la posición A_1 , con la velocidad V_1 ; en la sección 2, ha pasado a la sección A_2 con la velocidad V_2 . Siendo h el desnivel y L la distancia existente entre A_1 y A_2 . Lo que provoca que la partícula se mueva es la fuerza F , que es componente de su peso W en la dirección de la trayectoria A_1A_2 . Siendo los triángulos semejantes, ABC y A_1DA_2 , se obtiene que:

$$\frac{AB}{AC} = \frac{A_1D}{A_1A_2} \quad \text{o sea,} \quad \frac{F}{W} = \frac{h}{L}$$

Ya que el peso es igual al producto de la masa m por la aceleración de la gravedad g (que corresponde a $g = 0.81 \text{ m/s}^2$, se puede escribir $W = mg$, en la proporción anterior y se obtiene:

$$\frac{F}{m} = g \frac{h}{L} \quad \longrightarrow \quad \boxed{\text{Ecuación 1.5}}$$

La Ley de Newton ($F = ma$) expresa que (F/m) no es otra cosa sino la aceleración a , que la fuerza F comunica a la partícula. Entonces, la aceleración es lo que la velocidad varía en un tiempo t , de manera que, si la partícula A al pasar de la sección 1 a la 2 tarda un tiempo t , se obtiene:

$$\frac{F}{m} = \frac{V_2 - V_1}{t} \quad \longrightarrow \quad \boxed{\text{Ecuación 1.6}}$$

Conviene desaparecer t de esta última expresión. Para esto se considera que la velocidad media en el trayecto de 1 a 2, es igual al espacio L recorrido dividido entre el tiempo empleado en transitarlo:

$$\frac{V_2 - V_1}{t} = \frac{L}{t}$$

Dividiendo ambos miembros entre L/t resulta:

$$\frac{t}{L} * \frac{V_1 + V_2}{t} = 1$$

Multiplicando el segundo miembro de la ecuación 1.6 por esta última cantidad, que equivale 1, no se altera; por lo que la ecuación se puede escribir así:

$$\frac{F}{m} = \frac{V_2 - V_1}{t} * \frac{t}{L} * \frac{V_1 + V_2}{2} = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2L}$$

Reemplazando a F/m su valor dada por la ecuación 1.6 se obtiene:

$$g \frac{h}{L} = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2L} \quad \text{o sea:} \quad h = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} \longrightarrow \boxed{\text{Ecuación 1.7}}$$

Si ahora a partir de un plano horizontal cualquiera (RS), se miden los niveles Z_1 , y Z_2 de A_1 y A_2 , se tiene que $h = z_1 - z_2$ y reemplazado en la ecuación 1.7 se transforma en:

$$z_1 - z_2 = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g}$$

Esto es:

$$z_1 + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{V_2^2}{2g} \longrightarrow \boxed{\text{Ecuación 1.8}}$$

De acuerdo con Levi (1996), de aquí se desprende que el binomio $z + V^2/2g$ conserva el mismo valor al pasar del punto A_1 al punto A_2 de la trayectoria. La

ecuación 1.8 se conoce como ecuación de Bernoulli para corrientes libres. En el caso de que el movimiento inicie de un estado de quietud se puede escribir $V_1 = 0$, $V_2 = V$ y la última ecuación queda de la siguiente manera:

$$h = \frac{V^2}{2g} \text{ si se invierte, queda: } V = \sqrt{2gh}$$

Expresión que se denomina fórmula de Torricelli.

- Conservación de la cantidad de movimiento.

En concordancia con Villón (2007), en una sección de un canal, en el que pasa por él un caudal Q con una velocidad V , la cantidad de movimiento se expresa como:

—————→ Ecuación 1.9

$$\text{cantidad de movimiento} = \beta \delta Q v$$

Donde:

β = Coeficiente de la cantidad de movimiento o coeficiente de Boussinesq que permite el uso de la velocidad media. Su valor se determina usando la ecuación:

$$\beta = \frac{\int v_h^2 dA}{v^2 A} \text{ —————→ Ecuación 1.10}$$

Siendo:

v_h = Componente vertical de velocidad a una profundidad h .

dA = diferencial de área correspondiente a una velocidad v_h .

V = Velocidad media.

$$\sum F \text{ exteriores} = F_{P1} - F_{P2} + W \sin \alpha - F_f \longrightarrow \boxed{\text{Ecuación 1.11}}$$

Donde:

F_{P1} y F_{P2} = Fuerza de presión actuando en el centro de gravedad de las dos secciones.

W = Peso del fluido ($W \sin \alpha$, peso del fluido en el sentido del movimiento).

F_f = fuerza externa total de resistencia que se opone al movimiento.

La ecuación de la cantidad de movimiento o momentum, se representa así:

$$\delta Q(\beta_2 v_2 - \beta_1 v_1) = F_{P1} - F_{P2} + W \sin \alpha - F_f \longrightarrow \boxed{\text{Ecuación 1.12}}$$

Según Rodríguez (2008), si una partícula de masa “m” experimenta un cambio de velocidad dv , debido a un movimiento, en un tiempo dt , una fuerza “F” es la que ha provocado dicho fenómeno, ésta es la resultante de un sistema de fuerzas, que actúa sobre la partícula de masa.

El momentum es definido como el producto de la velocidad por la masa de un cuerpo.

1.7. Ondas en canales.

La celeridad es la velocidad con la que una onda avanza, no es lo mismo que la velocidad de la masa de agua sobre la cual la onda se desplaza, éstas suelen ser diferentes. De acuerdo con Levi (1996), si el paso de la corriente se detiene

bruscamente el paso de la corriente cerrando una compuerta transversal, en un canal, esto genera una onda que corre agua arriba, a la cual se le denomina onda solitaria porque viaja sola.

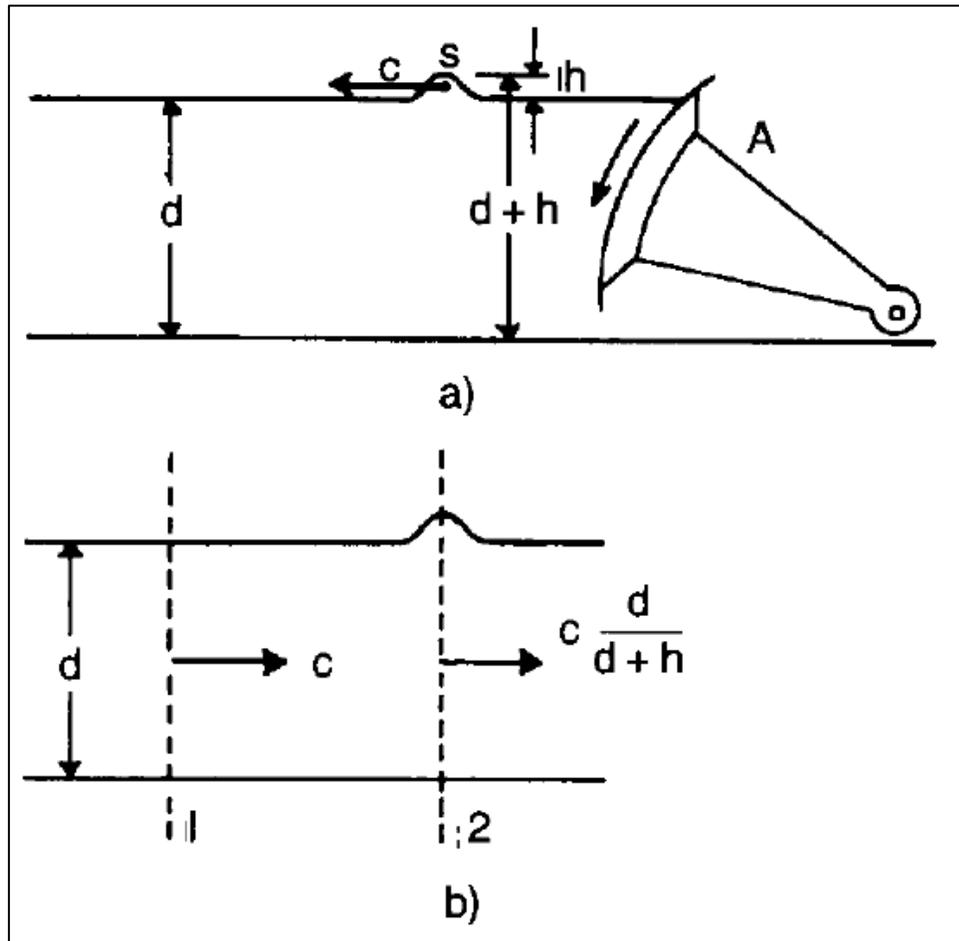


Figura 1.7 Canal con compuerta (a) y sin ella (b), para entender la celeridad.

Fuente: Levi; 1996: 84.

Considerando un canal rectangular (fig. 1.7.a) en el cual se tiene un tirante de agua d . Si se cierra la compuerta radial A nace una onda solitaria S que se desplaza con celeridad c . Si un humano se desplaza con la onda, ésta quedaría inmóvil frente

a sus ojos y al agua (detenida por el cierre de la compuerta), el humano la vería correr con una velocidad c en sentido contrario.

Ahora bien, donde el tirante es d (sección 1 de la fig. 1.7.b) el agua corre con velocidad ficticia $V_1 = c$, ¿con qué velocidad ficticia correrá V_2 en correspondencia a la onda de la sección 2? Aplicando la fórmula $V = Q/A$, teniendo en cuenta que el ancho del canal es b , el área mojada de la sección 1 será bd , el área mojada de la sección 2 será $b(d+h)$, entonces:

$$V_1 = \frac{Q}{bd}, \quad V_2 = \frac{Q}{b(d+h)}, \quad \frac{V_2}{V_1} = \frac{d}{d+h} \rightarrow \boxed{\text{Ecuación 1.13}}$$

de la cual, despejando y teniendo en cuenta que $V_1 = c$, obtenemos

$$V_2 = c \frac{d}{d+h}$$

Al emplear la ecuación de Bernoulli con $Z_1 = d$, $Z_2 = d + h$, y tomando para V_1 y V_2 las expresiones anteriores, se obtiene:

$$d + \frac{c^2}{2g} = (d+h) + \left[\frac{d}{d+h} \right]^2$$

si se factoriza $\frac{c^2}{2g}$ y se elimina d en los dos miembros, se obtiene:

$$\frac{c^2}{2g} = \frac{(d+h)^2}{2d+h}$$

por último, la ecuación que representa a la celeridad de la onda solitaria es:

$$c = \sqrt{2g \frac{(d+h)^2}{2d+h}} \rightarrow \boxed{\text{Ecuación 1.14}}$$

1.8. Número de Froude.

Este número es esencial en la hidráulica para la separación del tipo de régimen en la circulación del agua en lámina libre. Este importante número es gracias a los estudios realizados por William Froude para medir la resistencia de los barcos al avanzar entre las olas. Realizó experimentos con placas arrastradas por el agua. En el caso de los buques la magnitud geométrica de longitud es la eslora del buque, en lo que en la hidráulica de canales se considera el calado, todo esto en concordancia con García (2013).

De acuerdo con Levi (1996), la ecuación 1.14 es válida tanto para la onda solitaria, como también para otras ondas que pueden crear diferentes tipos de perturbación en la superficie del agua. Si la perturbación generada es pequeña, la honda también lo será y su altura h puede despreciarse (solamente para el cálculo de la celeridad). Así se consigue la fórmula de Lagrange para calcular ondas pequeñas.

—————→ Ecuación 1.15

$$c = \sqrt{gd}$$

Para realizar el estudio del régimen en canales es necesario e importante comparar la velocidad V de la corriente con la celeridad $c = \sqrt{gd}$ de las perturbaciones undosas mencionadas.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gd}}$$

A esta ecuación se le conoce como número de Froude. Proviene de la división de una velocidad entre otra, y es una cantidad unidimensional.

1.9. Regímenes de flujo.

De acuerdo con Chow (1994), en un canal abierto se pueden encontrar cuatro regímenes de flujo debido a la combinación de la viscosidad y de la gravedad, que son el subcrítico-laminar, supercrítico-laminar, supercrítico-turbulento y subcrítico-turbulento.

Según Levi (1996), si se sumerge un obstáculo, ya sea un lápiz, lapicero o palillo, en una corriente, se producen pequeñas ondas superficiales en la proximidad del obstáculo. Pueden surgir dos cuestiones distintas y éstas tomar dos aspectos diferentes, en el primer caso las ondas se propagan hacia aguas arriba, en contra al sentido de la corriente, esto debido a que la velocidad V de la corriente es menor que la celeridad c de las ondas ($V < c$, por lo tanto $Fr < 1$), en el segundo caso ésta las estira aguas abajo, ($V > c$, por lo que $Fr > 1$).

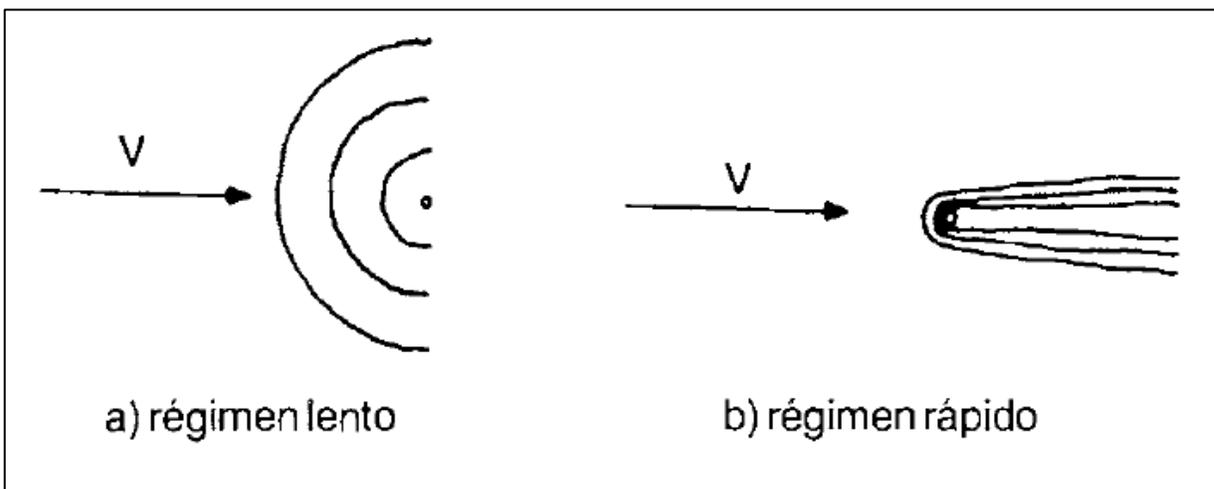


Figura 1.8 Tipos de régimen a superficie libre.

Fuente: Levi; 1996: 86.

El estado crítico es la frontera entre los 2 casos anteriores, esto se obtiene cuando $Fr=1$, entonces:

para $Fr<1$, el régimen subcrítico o lento

para $Fr>1$, el régimen supercrítico o rápido

a los cuales corresponden respectivamente las condiciones ilustradas en la figura 1.8, a y b, con esto existe la posibilidad de detectar una pequeña perturbación de la corriente.

En concordancia con Levi (1996), ya que la velocidad de la corriente crece al crecer la pendiente del mismo, la velocidad se vuelve el factor determinante para definir el régimen. Una pendiente grande suele asociarse con el supercrítico y una pendiente pequeña con el subcrítico. Es por eso que a veces puede decirse que un canal tiene la pendiente subcrítica o supercrítica.

“La presencia del vertedor establece en ambos casos un régimen subcrítico, con tirantes grandes, en la zona inmediatamente aguas arriba; un régimen supercrítico, con tirantes pequeños, aguas abajo, donde la corriente se desliza sobre el paramente del vertedor mismo. En correspondencia a la cresta del vertedor, donde el agua comienza a acelerarse, se localiza lo que se llama la sección de control, donde se produce el estado crítico. El tirante correspondiente se denomina tirante crítico.” (Levi; 1996; 87)

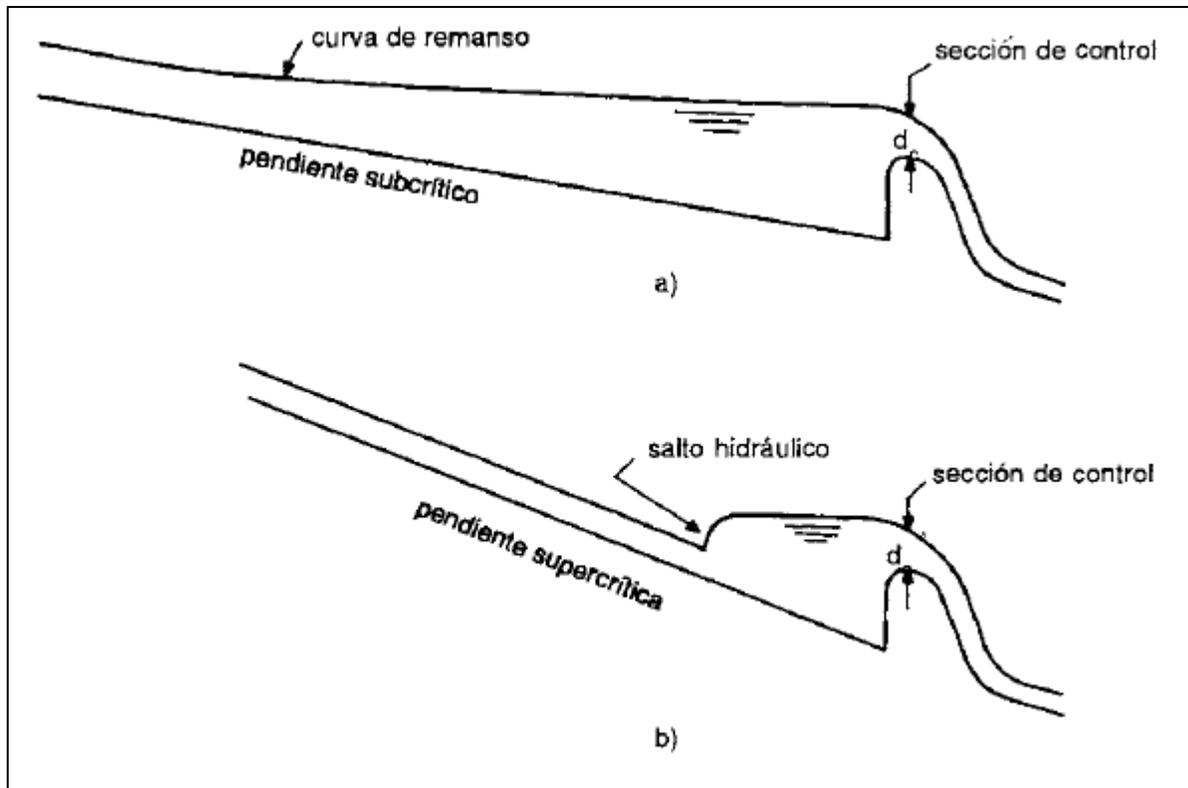


Figura 1.9 Manifestación de los tipos de régimen.

Fuente: Levi; 1996: 89.

1.10. Salto hidráulico.

“El salto Hidráulico se define como la elevación brusca de la superficie líquida, cuando el escurrimiento permanente pasa del régimen supercrítico al régimen subcrítico. Es un fenómeno local muy útil para disipar energía hidráulica. Este cambio brusco de régimen se caracteriza por una alteración rápida de la curvatura de las trayectorias del flujo, que produce vórtices (turbulencia) en el eje horizontal, lo que implica inclusive la aparición de velocidades en dirección opuesta al flujo que propician choques entre partículas en forma más o menos caótica, ocasionando una gran disipación de energía.” (Rodríguez; 2008: 255)

De acuerdo con Rodríguez (2008), si se considera una masa de agua como abfe que se desplaza en el salto (fig. 1.9). Dicha masa de agua pasará a la posición cdhg, en un intervalo de tiempo. Existe un aumento de la sección mojada entre la sección cd a la ef y como resultado, la velocidad se verá afectada disminuyendo, debido a que se trata de un movimiento constante. Es lo mismo que decir que ocurrió una disminución de la cantidad de movimiento en la masa de agua.

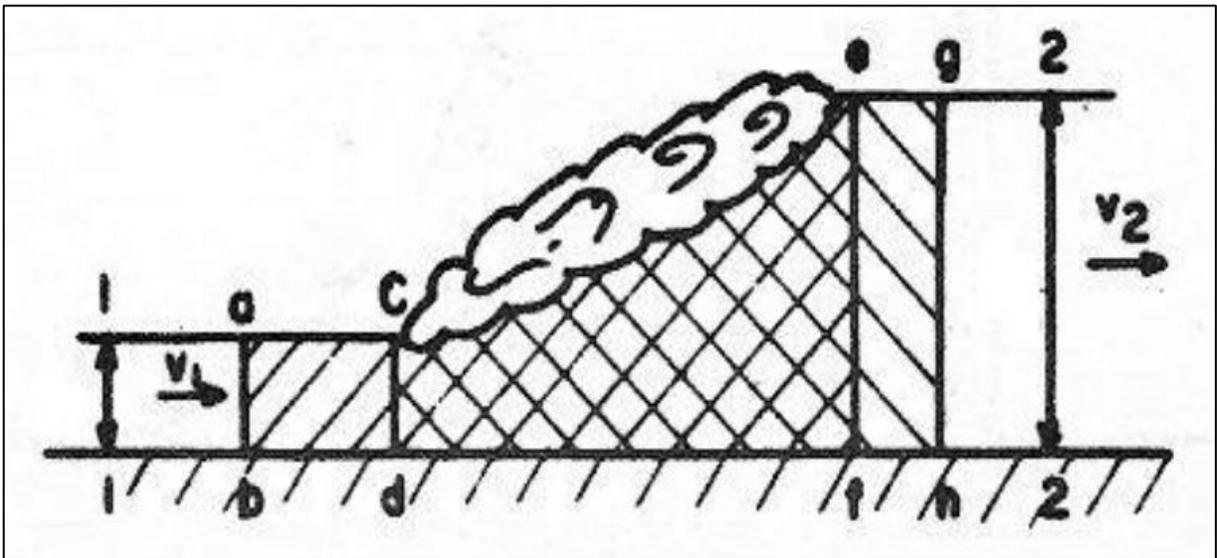


Figura 1.10 Teoría del salto hidráulico.

Fuente: Rodríguez; 2008: 255.

Para el proyectista, el salto hidráulico es un fenómeno deseable, por la gran pérdida de energía que se provoca durante el mismo salto, en algunas circunstancias es necesario disminuir de manera drástica la velocidad del escurrimiento en zonas en que no es necesario que sea grande el tirante, pero si conviene ahorrar en revestimiento al obtenerse velocidades no erosivas.

Un tanque amortiguador es una estructura reforzada, que usualmente se usa para proteger adecuadamente la zona donde se presenta el salto hidráulico, gracias

a la gran turbulencia que éste genera. En ocasiones se provoca el salto hidráulico al terminar una obra de excedencias, así como un cimacio o al final de un canal de descargar.

“Se le llama salto hidráulico al paso brusco del flujo del régimen supercrítico al subcrítico. El salto puede ocurrir debido a una reducción fuerte y súbita de la pendiente del canal, o bien a la presencia de un obstáculo que frena la corriente. Su presencia se reconoce por la elevación del tirante.” (Levi; 1996: 101)

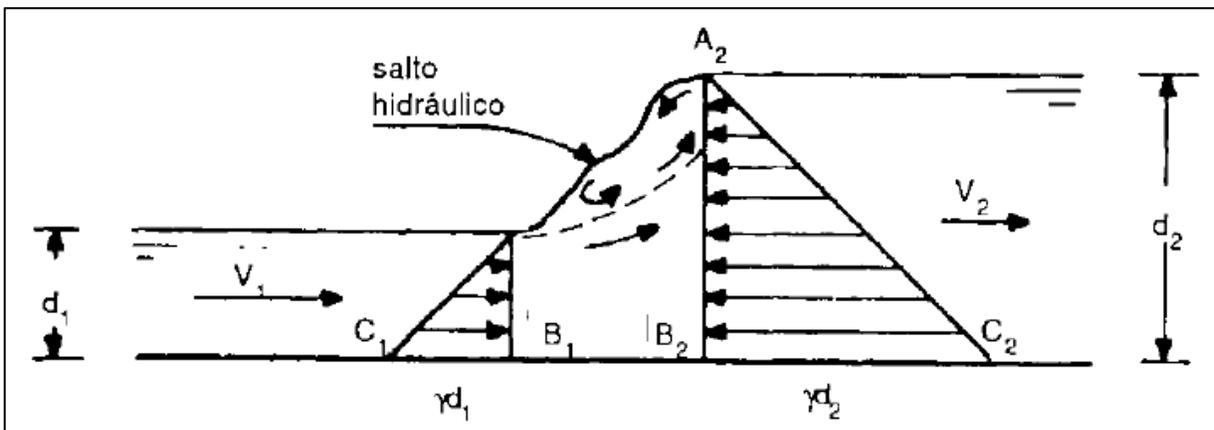


Figura 1.11 Salto hidráulico.

Fuente: Levi; 1996: 101.

Es importante prever cuanto va a subir el tirante después de que ocurre el salto hidráulico, para así definir la altura que hay que dar el revestimiento de las paredes del canal; el frenado asociado con el salto hidráulico posibilita las erosiones y más efectos perjudiciales de la corriente rápida.

Según Levi (1996), el salto hidráulico se puede presentar sobre la superficie libre de cualquier flujo homogéneo o en una interface de densidad de un flujo estratificado. En cualquiera de estos dos casos el salto se acompaña de turbulencia y disparación de energía. Y las aplicaciones en canales abiertos pueden ser muchas:

- Disipación de energía en flujos sobre diques, vertederos, presas y otras estructuras hidráulicas, y así evitar la socavación aguas debajo de las estructuras.
- Mantenimiento de altos niveles de aguas en canales aprovechados para la distribución de agua.
- Incremento en el gasto descargado por una compuerta deslizante al rechazar el retroceso del agua contra la compuerta, esto aumenta la carga efectiva y con ella la descarga.
- Reducir la elevada presión bajo las estructuras a través de la elevación del tirante del agua sobre la guarnición de defensa de la estructura.
- Evitar las erosiones y demás efectos perjudiciales de la corriente rápida.
- Mezclar de sustancias químicas utilizadas para la purificación o el tratamiento de agua.
- Definir el bordo libre del revestimiento de las paredes del canal.
- Airear flujos y desclorinado en el tratamiento de agua.
- Remoción de bolsas de aire en el flujo de canales abiertos en canales circulares.
- Identificación de condiciones especiales de flujo para así poder medir la razón efectividad-costo del flujo.

De acuerdo con Levi (1996), se considerará un canal rectangular de ancho b , en el cual el tirante supercrítico d se transforma en subcrítico conjugado d_2 (Fig. 1.11), pasando a través del salto hidráulico (ramo $A_1 B_1 A_2 B_2$). Utilizando el principio de cantidad de movimiento, si se calculan primero las fuerzas asociadas con el

fenómeno. Evidentemente son aquellas que resultan de la presión hidrostática, aplicadas en el sentido del escurrimiento. En la fig. 1.12 se representa por los prismas $A_1 B_1 C_1$ antes del salto y $A_2 B_2 C_2$ después.

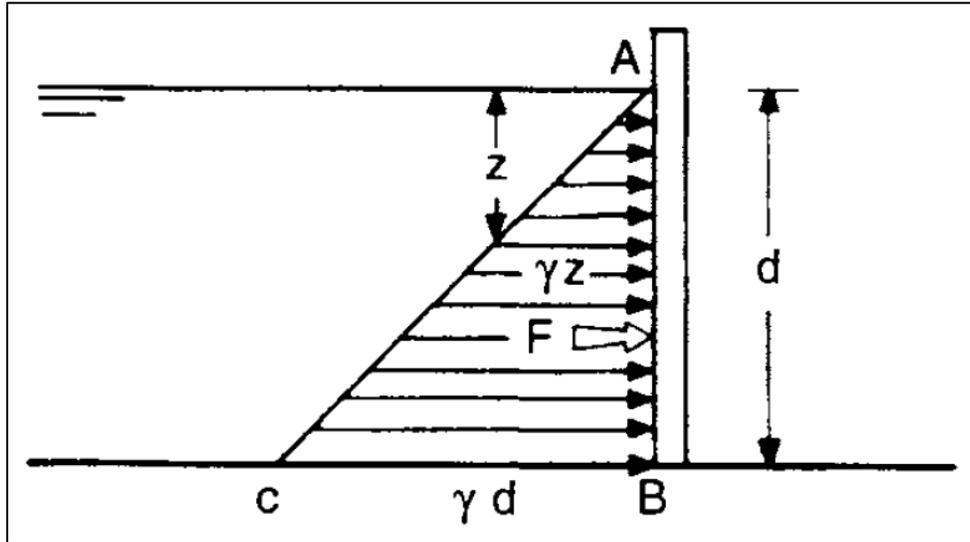


Figura 1.11 Empuje hidrostático.

Fuente: Levi; 1996: 59.

La fuerza resultante que actúa en el salto es la diferencia entre ellas:

$$F = \gamma \frac{d_1^2 b}{2} - \gamma \frac{d_2^2 b}{2} = \frac{\gamma b}{2} (d_1^2 - d_2^2)$$

Por otra parte, si $q = \frac{Q}{b}$ es el gasto unitario, la velocidad se puede expresar:

$$\rho QV = \frac{\gamma}{g} (qb) \frac{q}{d} = \frac{\gamma q^2 b}{g d}$$

Reemplazando estas expresiones en la ecuación (Bernoulli), se tiene:

$$\frac{\gamma b}{2g} (d_1^2 - d_2^2) = (\gamma q^2 b) \left(\frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_1} \right) \longrightarrow \text{Ecuación 1.16}$$

Pero como:

$$d_1^2 - d_2^2 = (d_1 + d_2)(d_1 - d_2) \quad y \quad \frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_1} = \frac{d_1 - d_2}{(d_1 - d_2)}$$

De manera que la ec. 1.16 se simplifica en

$$\frac{1}{2}(d_1 + d_2) = \frac{q^2}{gd_1d_2} \quad \text{o sea} \quad (d_1 + d_2)d_1d_2 = \frac{2q^2}{g}$$

Si en esta ecuación se reemplaza a q por V_1d_1 queda:

$$d_2^2 + d_1d_2 - \frac{2V_1^2d_1}{g} = 0 \longrightarrow \boxed{\text{Ecuación 1.17}}$$

Calcular el tirante subcrítico d_2 es el objetivo, a partir de las características del flujo supercrítico (d_1 y V_1), al despejar d_2 se la ec. 1.17 queda:

$$d_2 = \frac{d_1}{2} + \sqrt{\frac{d_1^2}{4} + \frac{2V_1^2d_1}{g}} = \frac{1}{2}(1 + 8F_1^2 - 1) \longrightarrow \boxed{\text{Ecuación 1.18}}$$

La raíz negativa antes del radical se excluye porque daría para el tirante un valor d_2 negativo, carente de sentido físico. La fórmula ec. 1.18 permite obtener el tirante subcrítico d_2 conociendo las características V_1 y d_1 del flujo supercrítico conjugado.

1.11. Pérdidas por fricción.

En los canales existen pérdidas de agua que se deben al roce del fluido con el cuerpo del canal, a esto se le conoce como pérdidas por fricción, cada material tiene un coeficiente de rugosidad distinto debido a sus partículas, que producen fricciones distintas, estas pérdidas se pueden determinar con las siguientes ecuaciones.

- Fórmula de Chézy.

“Si el agua bajase de acuerdo con la ley de caída de los graves, su movimiento sería acelerado. Esto no suele suceder en la práctica. En efecto, en

causes poco más o menos rectilíneos, de sección y pendiente constantes, se ve avanzar prácticamente con movimiento uniforme, o sea, con velocidad media y tirante constantes lo largo del cauce. La causa del movimiento uniforme es la resistencia que las paredes ofrecen al avance del agua, ya que ese régimen se alcanza cuando dicha resistencia iguala a la fuerza F que empuja la corriente” (Levi, 1996: 135)

Basándose en esta consideración, Chézy encontró en el año de 1769, una expresión de la velocidad media que, que aun sienta excesivamente simplificada, revolucionó la hidráulica. Para establecerla, se considera un tramo de canal (fig. 1.13), entre la sección 1 y 2, uniforme y recto en su geometría, en el cual el agua avanza con una velocidad media V_o .

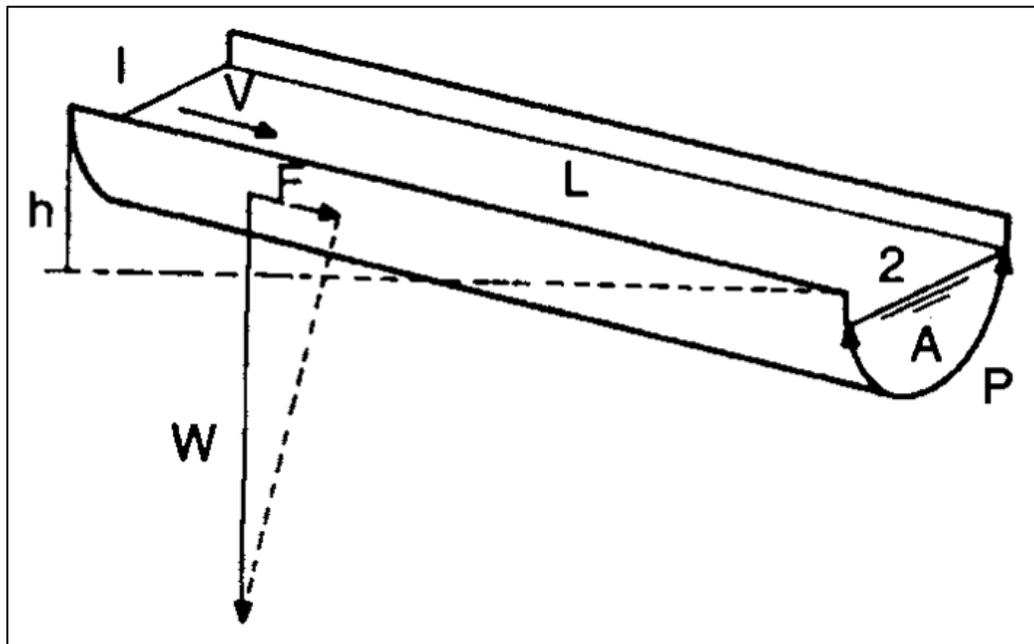


Figura 1.13 Deducción de la fórmula de Chézy.

Fuente: Levi; 1996: 135.

Si se considera una partícula de flujo, se puede observar que el triángulo rectángulo tiene por cateto la fuerza F y por hipotenusa el peso W del volumen V de fluido contenido en el tramo; por semejanza de triángulos se tiene:

$$\frac{F}{W} = \frac{h}{L}$$

Donde:

L = longitud del tramo considerado.

h = desnivel entre las secciones extremas.

De otra manera, si $S = h/L$, en la cual S es la pendiente de la superficie del agua (en la cual las condiciones señaladas es la misma del fondo del canal), entonces la ecuación anterior podría escribirse:

$$F = W * S \longrightarrow \boxed{\text{Ecuación 1.19}}$$

Sin embargo:

$$W = \gamma V = \gamma(A * L)$$

Donde:

A = Área mojada, es decir es el área de la sección transversal del agua contenida en el canal.

Si se reemplaza la ecuación 1.19, quedaría:

$$F = \gamma A L S \longrightarrow \boxed{\text{Ecuación 1.20}}$$

Suponiendo, de acuerdo con Chézy, que la resistencia D que el cauce opone a la corriente sea proporcional a la carga de velocidad (y, por consiguiente, al cuadrado de la velocidad V_o), y al área de la pared que está en contacto con el agua (es igual a $P*L$), entonces queda como:

$$D = KPLV^2$$

Donde:

P = perímetro mojado.

K = es un coeficiente que depende del material.

Si se igual esta ecuación de la resistencia a la fuerza (ec. 1.20), al simplificarla y despejar V , se obtiene:

$$V^2 = \frac{\gamma A}{K P} S$$

Si entonces se introduce el radio hidráulico $R = A/P$ y también $C = (\gamma/K)^{1/2}$, la expresión anterior queda expresada como:

$$V = C * R * S \longrightarrow \boxed{\text{Ecuación 1.21}}$$

La ecuación 1.3 es la fórmula de Chézy, expresa la velocidad media en función del radio hidráulico y de la pendiente, si el coeficiente C fuese una constante absoluta, esta ecuación sería muy sencilla. Pero Chézy descubrió rápidamente que C es constante solamente para un canal determinado, al variar el gasto; sin embargo, cambia de un canal a otro de manera compleja, que en la posteridad los investigadores lograron descifrar.

- Fórmula de Manning.

De acuerdo con Levi (1996), existía un defecto en la fórmula de Chézy, el cual radicaba en la escases de regla para determinar el valor del coeficiente C cuando el canal difería con respecto de aquello cuyo C había sido obtenido experimentalmente.

Darcy probablemente el primero en señalar una fórmula general que exprese la velocidad que debe tomar en cuenta la rugosidad del cauce. Por lo tanto, C debe quedar en función de la rugosidad. Tiempo más tarde, descubrió que C también variaba con el radio hidráulico R, y más precisamente con su raíz sexta, expresándose como:

$$C = \frac{\sqrt[6]{R}}{n}$$

Donde:

n = coeficiente de rugosidad conveniente.

Si se reemplaza la ec. 1.21, se obtiene:

$$V = \frac{\sqrt[6]{R}\sqrt{RS}}{n} = \frac{R^{1/6+1/2} * S^{1/2}}{n}$$

Simplificando la ecuación que la expresión conocida como fórmula de Manning:

$$V = \frac{R^{2/3} * S^{1/2}}{n} \quad \longrightarrow \quad \boxed{\text{Ecuación 1.22}}$$

La selección correcta del coeficiente de rugosidad n es imprescindible para que la fórmula dé resultados convenientes. El coeficiente n ha sido obtenido para

conductos elaborados o revestidos de diferentes materiales. Su valor aumenta con la rugosidad.

MATERIAL	n
Madera cepillada	0.012
Concreto liso	0.012
Metal liso	0.013
Concreto normal	0.014
Hierro galvanizado	0.015
Tabique	0.018
Mampostería	0.020
Metal corrugado	0.022
Tepetates duros y pizars	0.027
Tierra	0.030
Roca	0.033

Tabla 1.2 Valores de coeficiente de rugosidad.

Fuente: Levi; 1996: 141.

Esta tabla da los valores medio de n en distintos materiales, con la advertencia de que al usarlos debe verificar el calculista de que R se mida en metros y V en m/s; ya que si se eligen otras unidades el valor de n cambiaría. Cabe destacar que los valores podrían disminuir entre 0.001 a 0.002 si los materiales empleados son nuevos o de muy buena calidad, o podrían elevarse un poco si éstos están viejos y deteriorados.

La tabla a continuación muestra los valores de n recomendables para canales, artificiales o naturales, en distintas condiciones. Nótese que los valores propuestos

no toman en cuenta la presencia de lirios acuático, que agrega una considerable resistencia a la corriente, éste puede reducir la capacidad del canal.

TIPO DE CANAL	MÍNIMO	NORMAL	MÁXIMO
CANALES ARTIFICIALES			
a) <i>En tierra, rectos y uniformes</i>			
limpios	0.018	0.022	0.025
con grava	0.022	0.025	0.030
con hierba corta y poca maleza	0.022	0.027	0.033
b) <i>En tierra, sinuosos y perzosos</i>			
limpios	0.023	0.025	0.030
con hierba corta y poca maleza	0.025	0.030	0.033
con mucha maleza y plantas acuáticas	0.030	0.035	0.040
con guijarros en el fondo	0.030	0.040	0.050
c) <i>Desatendidos, con maleza y sin cortar</i>			
si la maleza alcanza el tirante	0.050	0.080	0.120
con vegetación sólo en los lados	0.040	0.050	0.080
CAUCES NATURALES			
a) <i>Menores, de llanura</i>			
limpios, rectos y regulares	0.025	0.030	0.033
lo mismo, con piedras y maleza	0.030	0.035	0.040
limpios, sinuosos, con pozas y			
bancos con arena	0.033	0.040	0.045
lo mismo, con piedras y maleza	0.035	0.045	0.050
perzosos, con maleza y pozas hondas	0.050	0.070	0.080
b) <i>Menores, de montaña</i>			
con grava, guijarros y poca piedra			
grande	0.030	0.040	0.050
con guijarros y mucha piedra grande	0.040	0.050	0.070
c) <i>Mayores</i>			
de sección regular, sin piedra grande	0.025	---	0.060
de sección irregular y quebrada	0.035	---	0.100

Tabla 1.3 Valores del coeficiente de rugosidad n.

Fuente: Levi; 1996: 142.

CAPÍTULO 2

DISEÑO HIDRÁULICO DE CANALES

Para el diseño de un canal es necesario considerar puntos clave para su correcta elaboración estructural, se mencionarán en este capítulo los más indispensables, como son las consideraciones de diseño que incluye a la velocidad mínima y máxima, talud, coeficiente de rugosidad, pendiente, bordo libre, ancho de berma y espesor revestido, y los canales revestidos y no revestidos.

2.1. Concepto de diseño.

“El diseño como tarea consiste en pensar (idear) y describir una estructura que aparece como una portadora de características deseadas (particularmente funciones); el diseño como proceso consiste en transformar información de las condiciones, necesidades y requisitos a la descripción de una estructura que las satisfaga.” (Trejo; 1975: 8)

2.2. Consideraciones de diseño.

De acuerdo con Sotelo (2002), en el diseño de un canal es usual que se inicie con el planteo del diseño, teniendo datos como el gasto que se debe conducir, la rugosidad de sus bordes y la pendiente disponible gracias a la topografía del terreno que se va a construir.

De acuerdo con Villón (2007), diseñar un canal implica darle valor numérico a unas especificaciones técnicas, que son:

$$Q = \text{caudal en m}^3/\text{s}.$$

V = velocidad media del agua en m/s.

S = pendiente en m/m.

n = coeficiente de rugosidad.

Z = talud.

b = ancho de solera en m.

y = tirante en m.

A = área hidráulica en m^2 .

B.L. = $H - y$ = bordo libre en m.

H = profundidad total desde la corona hasta al fondo del canal en m.

C = ancho de corona en m.

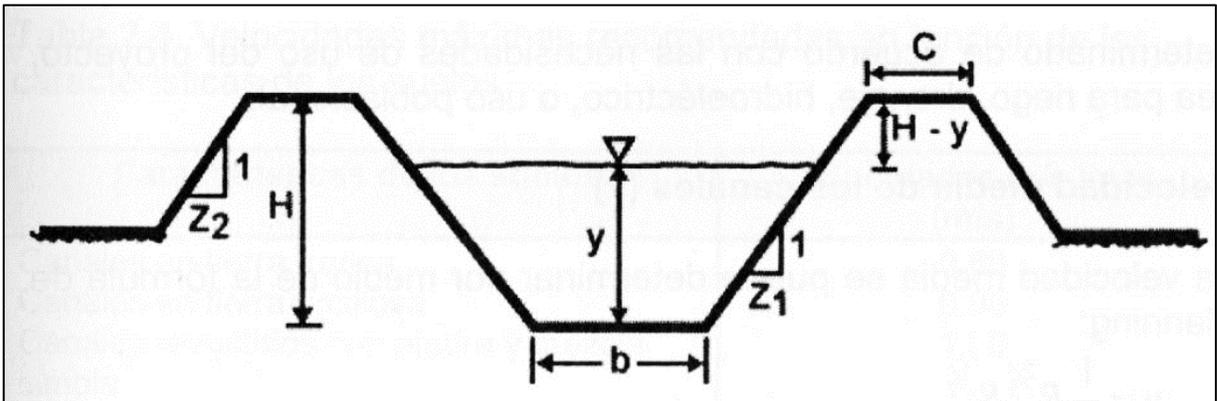


Figura 2.1 Elementos geométricos de un canal.

Fuente: Villón; 2007: 133.

2.2.1. Velocidades mínima y máxima permisibles.

Para el correcto diseño de un canal se deben tomar en consideración los valores límites de las velocidades por encima de las cuales la corriente causaría una erosión de la base y taludes, resultando así profundizar localmente el canal, dificultando su derivación, siendo esto por la disminución del nivel del agua y poner al descubierto los cimientos de pilas y demás estructuras. Tampoco la velocidad debe ser demasiado pequeña o reducida, para evitar el crecimiento de vegetación, que provoca enlame de la zona y el azolvamiento.

- Velocidad mínima permisible.

En concordancia con Sotelo (2002), para el diseño de canales, ya sean revestidos o no, que conducen agua con material fino en suspensión se debe considerar que, para el caudal mínimo de operación, la velocidad media del flujo para el caudal mínimo de operación sea mayor o igual a la necesaria para así poder evitar la sedimentación del material que transporta. Otro punto, es que, aunque el canal conduzca agua limpia, se puede propiciar el crecimiento de vegetación sobre las paredes y el fondo o sobre las juntas constructivas del recubrimiento si existe una velocidad inferior o pequeña a la necesaria. Así es como la velocidad mínima necesaria ayuda a evitar que todo esto ocurra.

La velocidad mínima permisible o velocidad no sedimentante es la menor velocidad que no permite el inicio de la sedimentación y no induce el crecimiento de plantas acuáticas y de musgo. Esta velocidad es muy incierta y su valor exacto no puede determinarse con facilidad, Para aguas que no tengan carga de limos o para

flujos previamente decantados este factor tiene una pequeña importancia excepto por su efecto en el crecimiento de plantas. En general puede adoptarse una velocidad media de 0.61 a 0.91 m/s cuando el porcentaje de limos presente en el canal es pequeño, y una velocidad media no inferior a 0.76 m/s prevendrá el crecimiento de vegetación que disminuirá seriamente la capacidad de transporte del canal, todo esto en concordancia con Rodríguez (2008).

De acuerdo con Sotelo (2002), para evitar el crecimiento de vegetación en una canal, se debe adoptar una velocidad mínima de flujo. Si se quiere limitar el desarrollo de vegetación, la velocidad mínima depende esencialmente de las características de la vegetación. Cuando la presencia de agua es permanente, puede crecer lirio y otras plantas acuáticas, que en ocasiones reducen notablemente la capacidad del canal. Algunas de las condiciones que favorecen al crecimiento de éstas son, que el agua sea tibia, clara, poco profunda y que el flujo avance lentamente. En cambio, cuando las corrientes son turbias y profundas, obstaculizan la penetración de los rayos del sol y así dificultan el desarrollo vegetal.

En canales pequeños el problema de la vegetación se agrava, si éstos tienen tirantes menos de 0.60 m y velocidades bajas, que en caso que no se limpien de manera oportuna pueden reducir su sección útil a una cuarta parte. En canales grandes, las malezas crecen generalmente solo en las orillas, sin embargo, un gran problema es que las hierbas enraizadas en los taludes son estiradas por la corriente.

Para evitar el enlame del canal cuando el agua lleva solo material fino, basta con mantener la velocidad del flujo arriba del valor mínimo, que depende del tamaño

y peso específico de las partículas, así como el tirante d , que favorece la suspensión.

El enlame puede ser considerable en corrientes lentas.

Cantidad de maleza	Velocidad
Abundante	$V \leq 0.5 \text{ m/s}$
Regular	$0.5 \text{ m/s} < V \leq 0.6 \text{ m/s}$
Escasa	$0.6 \text{ m/s} < V \leq 0.8 \text{ m/s}$
Nula	$V > 0.8 \text{ m/s}$

Tabla 2.1 Efecto de la velocidad del agua en el crecimiento de la maleza.

Fuente: H. French; 1998: 132.

Mediante compuertas laterales que descarguen a un canal de lavado, se puede hacer un lavado periódico del posible sedimento. Al abrir la compuerta se produce un descenso en el nivel del agua lo que a su vez provoca un incremento en la velocidad del flujo que corre por el canal, así se logra el transporte del sedimento hasta el umbral y de ahí al canal de lavado.

Material en suspensión	Velocidad mínima de sedimentación m/s
Arena fina	$0.5477 * d^{0.64}$
Arena gruesa	$0.5998 * d^{0.64}$
Limo arenosos	$0.6585 * d^{0.64}$
Limo y acarreos gruesos	$0.7107 * d^{0.64}$
$d = \text{Tirante del agua en el canal, (m)}$	

Tabla 2.2 Expresiones para la velocidad crítica de sedimentación.

Fuente: H. French; 1998:133.

- Velocidad máxima permisible.

De acuerdo con Sotelo (2002), la velocidad máxima debe limitarse para evitar el desgaste y la erosión continua del fondo paredes por la turbulencia, la abrasión y eventualmente la cavitación. Esto aplica para canales de fronteras fijas, con o sin recubrimiento de superficie dura, que conducen agua con materiales en suspensión o agua limpia.

Cuando el recubrimiento es inexistente o no es de superficie dura, el material del cuerpo del canal se ve expuesto a la erosión que causa el agua, para esto debe evitarse que el flujo lo arrastre y modifique la sección. Se le conoce como velocidad crítica a la velocidad media con la que se inicia el arrastre de sedimento, ésta depende del tamaño, peso del material y clase en el cuerpo del canal, también del tirante d .

La estimación de la velocidad máxima es incierta y variable, solo se puede estimar con base en la experiencia y el criterio. En la práctica se ha observado una relación entre el gasto, las propiedades mecánicas del canal, el tipo de material y la cantidad acarreada por el flujo y la estabilidad de la sección del canal.

Autor	Material	Velocidades permisibles	
		Mínima	Máxima
ASCE	Arcilla	0.45	0.75
	Arena	0.57	1.25
	Grava	1.25	2.00
Etcheverry	Conglomerado o grava cementada	2.00	2.50
	Esquistos o pizarras	2.00	2.50
	Roca sedimentaria suave	2.00	2.50
	Roca sedimentaria dura	3.00	4.50
Fortier y Scobey	Arena fina, no coloidal	-	0.76
	Franco arenoso, no coloidal	-	0.76
	Franco limoso, no coloidal	-	0.91
	Limos aluviales, no coloidales	-	1.07
	Tierra negra firme común	-	1.07
	Ceniza volcánica	-	1.07
	Arcilla dura, muy coloidal	-	1.52
	Limos aluviales, coloidales	-	1.52
	Pizarra y tepetate	-	1.83
	Grava fina	-	1.52
	Tierra negra graduada a piedritas cuando no es coloidal	-	1.52
	Limos graduados a piedritas cuando no es coloidal	-	1.68
	Grava gruesa, no coloidal	-	1.83
	Piedritas y ripio	-	1.68
Bureau o reclamation	Canales laterales	0.45	0.75
	Canales principales	0.60	1.35

Tabla 2.3 Velocidades permisibles en canales sin revestir.

Fuente: Sotelo; 1997.

En relación a la operación de las estructuras y la conducción en tramos nuestros del canal, en la tabla 2.4 se presentan algunas recomendaciones.

Tipo de revestimiento	Material	Condición	Velocidades permisibles (m/s)	
			Mínima	Máxima
Rígido	Concreto	Conjuntas suaves y superficie lisa	1	$2.5 \geq V \leq 0.8 V_C$
		Alojado en suelo de partículas finas y sin cohesión	1	1.5
		Alojado en terreno, sano	1	$2.5 \geq V \leq 0.8 V_C$
		Reforzado	$1.2 * V_C$	$2.5 \leq V \leq 10$
		Lanzado neumáticamente	1	$2.5 \geq V \leq 0.8 V_C$
	Canales pequeños y rectos	1	$2.5 \geq V \leq 0.8 V_C$	
	Mampostería de 3era clase	Alojados en cualquier terreno	1	$2.5 \geq V \leq 0.8 V_C$
Flexible	Concreto asfáltico o membranas	Alojados en cualquier terreno	1	$1 \leq V \leq 1.5$
	Arcillas compactadas		1	$0.6 \leq V \leq 1.25$

$V_C = \text{Velocidad crítica (m/s)}$

Tabla 2.4 Velocidades permisibles en canales revestidos.

Fuente: Sotelo; 1997.

Régimen	Velocidades en canales		
	Tierra	Concreto	Mampostería
Subcrítico en operación de tomas	Varía en función del tipo de material $V < 1.5$	$V \leq 1.5$	$V \leq 1.5$
Subcrítico para conducción en tramos muestro	$1.5 \geq V \leq 0.8 V_C$	$1.5 \geq V \leq 0.8 V_C$	$1.5 \geq V \leq 0.8 V_C$
Supercrítico	1.5	$5.0 \geq V \geq 1.2 V_C$	$5.0 \geq V \geq 1.2 V_C$

Tabla 2.5 Velocidades recomendadas para la operación de canales.

Fuente: Sotelo; 1997.

2.2.2. Talud.

“Es la relación de la proyección horizontal a la vertical de la pared lateral (se llama también talud de las paredes laterales de canal). Es decir “m” es el valor de la

proyección horizontal cuando la vertical es 1, aplicando relaciones trigonométricas. Es la cotangente del ángulo de reposo del material (θ) es decir $m = \frac{x}{d}$ y depende del tipo de material en que se construya el canal, a fin de evitar derrumbes”. (Villón, 2007; 5)

Los taludes de un canal dependen primeramente de las propiedades mecánicas y físicas del suelo donde se excava el canal. Desde un punto de vista práctico los taludes deben ser lo más pronunciados posibles para minimizar el volumen de obra de excavación.

Otros factores también importantes que se deben considerar para determinar el talud adecuado son el método de construcción, condición de pérdidas por infiltración, cambios climáticos, el tamaño del canal, etc., Esto en concordancia con Rodríguez, (2008).

Según Villón (2007), un ejemplo puede ser, cuando se tiene un canal de talud 1.5:1, significa que la proyección horizontal de la pared es 1.5 veces más grande que la proyección vertical que es de 1, por lo que entonces el talud $m=1.5$, esto resulta de dividir la proyección horizontal entre la vertical.

Material	Talud	Valor de θ
Roca ligeramente alterada	0.25:1	75° 58'
Mampostería	0.4:1 y 0.75:1	68° 12'
Roca sana y tepetate duro	1:1	45°
Concreto	1:1 ó 1.25:1	45° y 38° 40'
Tierra arcillosa, arenisca, tepetate blando	1.5:1	33°
Material poco estable, arena, tierra arenisca.	2:1	26°

Tabla 2.6 Taludes apropiados para distintos materiales en el diseño de canales.

Fuente: Rodríguez; 2008: 71.

Material	Talud	Valor del talud (m)	Valor de θ
Roca sana no alterada	0: 0.25	$m=0/0.25= 0$	90°
Roca estratificada ligeramente alterada	0.25:0.5	$m=.25/0.5=0.50$	63° 43'
Rocas alteradas, tepetate duro	1:1	$m=1/1= 1$	45°
Arcilla densa o tierra con revestimiento de concreto	0.5:1	$m=.5/1= 0.50$	63° 43'
Suelo limoso-arenoso con grava gruesa	1:1.5	$m=1/1.5= 0.67$	56° 58'
Arenisca blanda	1.5:2.0	$m=1.5/2= 0.75$	53° 13'
Limo arcilloso	0.75:1.0	$m=.75/1= 0.75$	53° 13'
Limo arenoso	1.5:2.0	$m=1.5/2= 0.75$	53° 13'
Material poco estable, arena y tierra arenosa	2:1	$m=2/1= 2$	26°56'
Mampostería	0.4:1	$m=0.4/1= 0.40$	68° 19'
Concreto	1:1	$m=1/1= 1$	45°
	1.25:1	$m=1.25/1=1.25$	38° 65'
Tierra algo arcillosa, tepetate blando	1.5:1	$m=1.5/1= 1.5$	33° 69'

Tabla 2.7 Taludes recomendados en canales construidos en varias clases de materiales.

Fuente: Rodríguez; 2008: 71.

2.2.3. Coeficiente de rugosidad.

Según Sotelo (2002), el coeficiente de rugosidad n , por lo general se le considera generalmente dependiente solo de la rugosidad en las paredes y el fondo del canal. Pero, n es propiamente un factor de fricción, que depende de la geometría de la sección y de las características hidráulicas del flujo.

De acuerdo con Villón (2007), para canales de tierra los valores del coeficiente de rugosidad están comprendidos entre 0.025 y 0.030, y para canales con revestimiento de concreto se usan valores comprendidos entre 0.013 y 0.015.

Superficie	Condiciones de las paredes			
	Perfectas	Buenas	Medianas	Malas
Tubería hierro forjado negro comercial	0.012	0.013	0.014	0.015
Tubería hierro forjado galvanizado comercial	0.013	0.014	0.015	0.017
Tubería de latón o vidrio	0.009	0.010	0.011	0.013
Tubería acero remachado en espiral	0.013	0.015*	0.017*	
Tubería de barro vitrificado	0.010	0.013*	0.015	0.017
Tubos comunes de barro para drenaje	0.011	0.012*	0.014*	0.017
Tabique vidriado	0.011	0.012	0.013	0.015
Tabique con mortero de cemento; albañales de tabique	0.012	0.013	0.015*	0.017
Superficies de cemento pulido	0.010	0.011	0.012	0.013
Superficies aplanadas con mortero de cemento	0.011	0.012	0.013*	0.015
Tuberías de concreto	0.012	0.013	0.015*	0.016
Tuberías de duela	0.010	0.011	0.012	0.013
<i>Acueductos de tablón:</i>				
Labrado	0.010	0.012*	0.013	0.014
Sin labrar	0.011	0.013*	0.014	0.015
Con astillas	0.012	0.015*	0.016	
Canales revestidos con concreto	0.012	0.014*	0.016*	0.018
Superficie de mampostería con cemento	0.017	0.020	0.025	0.030
Superficie de mampostería en seco	0.025	0.030	0.033	0.035
Acueducto semicirculares metálicos, lisos	0.011	0.012	0.013	0.015

Acueducto semicirculares metálicos corrugados	0.0225	0.025	0.0275	0.030
<i>Canales y zanjas:</i>				
En tierra, alineados y uniformes	0.017	0.020	0.0225	0.025*
En roca, lisos y uniformes	0.025	0.030	0.033*	0.035
En roca, con salientes y sinuosos	0.035	0.040	0.045	
Sinuosos y de escurrimiento lento	0.0225	0.025*	0.0275	0.030
Degradados en tierra	0.025	0.0275*	0.030	0.033
Con lecho pedregoso y bordos de tierra enhierbados	0.025	0.030	0.035*	0.040
Plantilla de tierra, taludes ásperos	0.028	0.030*	0.033*	0.035
<i>Corrientes naturales:</i>				
(1) Limpios, bordos rectos, llenos, sin hendeduras ni charcos profundos.	0.025	0.0275	0.030	0.033
(2) Igual al (1) pero con algo de hierba y piedra.	0.030	0.033	0.035	0.040
(3) Sinuoso, algunos charcos y escollos, limpio	0.033	0.035	0.040	0.045
(4) Igual al (3), de poco tirante, con pendiente y sección menos eficiente.	0.040	0.045	0.050	0.055
(5) Igual al (3), algo de hierba y piedras.	0.035	0.040	0.045	0.050
(6) Igual al (4), secciones pedregosas.	0.045	0.050	0.055	0.060
(7) Ríos con tramos lentos, cauce enhierbado o con charcos profundos.	0.050	0.060	0.070	0.080
(8) Playas muy enyerbadas.	0.075	0.100	0.125	0.150
(*) Valores de uso común en proyectos				

Tabla 2.8 Valores de n dados por Horton.

Fuente: Villón; 2007; 72 y 73.

2.2.4. Pendiente, bordo libre, ancho de berma y espesor revestido.

- Pendiente.

Según Rodríguez (2008), la pendiente longitudinal de un canal está determinada por la topografía y la altura de energía requerida para el flujo. Otro factor importante del que depende la pendiente, es el propósito del canal, un ejemplo de esto son los canales para distribución de agua, los de irrigación, abastecimientos de agua, minería hidráulica y otros proyectos hidráulicos que requieren un alto nivel en el punto de entrega. En estos casos conviene una pendiente pequeña para así poder minimizar las pérdidas por elevación.

Para diseñar un canal óptimo, se deben tomar en cuenta una cantidad de factores, como son la topografía del lugar, el tipo de suelo que se tiene, el gasto que se desea conducir, los objetivos y propósitos para los que está proyectado el canal y los costos de construcción, así como que los volúmenes de corte y terraplén sean mínimos.

De acuerdo con Villón (2007), es muy práctico que durante los cálculos de diseño no se den valores de velocidad, sino más bien chequearlos, ya sea aplicando la fórmula de Manning o la ecuación de continuidad, para que así los valores resultados obtenidos están dentro del rango contenido.

Características de los suelos	Velocidades máximas (m/s)
Canales en tierra franca	0,60
Canales en tierra arcillosa	0,90
Canales revestidos con piedra y mezcla simple	1,00
Canales con mampostería de piedra y concreto	2,00
Canales revestidos con concreto	3,00
Canales en roca:	
pizarra	1,25
areniscas consolidadas	1,50
roca dura, granito, etc.	3 a 5

Tabla 2.9 Velocidades máximas recomendables en función de las características de los suelos.

Fuente: Villón; 2007; 135.

Tipo de suelo	Pendiente (S) (‰)
Suelos sueltos	0,5 – 1,0
Suelos francos	1,5 – 2,5
Suelos arcillosos	3,0 – 4,5

Tabla 2.10 Pendiente admisible en función del tipo de suelos.

Fuente: Villón; 2007; 135.

- Bordo libre.

“Es necesario prever un libre bordo por encima del nivel de la superficie del agua calculada, con el fin de considerar su variación por efecto del oleaje, estimación defectuosa de rugosidad, arrastre de aire, fallas de operación, ondas de traslación

generadas por maniobras bruscas de rechazo o demanda del gasto en canales de fuerza, por cierre o apertura de compuertas intermedias, o por maniobras defectuosas que puedan provocar el desbordamiento.” (Sotelo, 2002: 734)

Según Villón (2007), es necesario dejar un desnivel entre la superficie libre del agua para el tirante normal y la corona de los bordos, a fin de tener un margen de seguridad y así absorber los niveles extraordinarios, que pueden presentarse por encima del nivel de diseño.

$$B.L. = H - y$$

Para canales en tierra existe una opción, dejar un bordo libre igual a un tercio del tirante.

$$B.L. = \frac{y}{3}$$

De modo que, para canales revestidos, el bordo libre puede ser una quinta parte del tirante, como:

$$B.L. = \frac{y}{5}$$

De acuerdo con Villón (2007), hay también otros criterios prácticos para elegir el valor del bordo libre.

Caudal Q (m ³ /s)	Bordo libre (m)
Menores que 0,5	0,30
Mayores que 0,5	0,40

Tabla 2.11 Relación Bordo libre y Caudal.

Fuente: Villón; 2007; 139.

Ancho de solera (m)	Bordo libre (m)
Hasta 0,80	0,40
de 0,80 a 1,50	0,50
de 1,50 a 3,00	0,60
de 3,00 a 20,00	1,00

Tabla 2.12 Relación bordo libre – ancho de solera.

Fuente Villón, 2007; 139.

- Ancho de solera.

Según Villón (2007), es de gran utilidad el fijar un valor para el ancho de solera, plantilla o base, para así poder calcular fácilmente el tirante. En canales pequeños el ancho de solera está en función del ancho que tenga la pala de la maquinaria que se utilizará en la construcción del canal. Pero en general la siguiente tabla podría ser una forma práctica de calcularlo

Caudal Q (m ³ /s)	Ancho de solera b (m)
Menor de 0,100	0,30
Entre 0,100 y 0,200	0,50
Entre 0,200 y 0,400	0,75
Mayor de 0,400	1,00

Tabla 2.13 Ancho de solera en función del caudal.

Fuente: Villón; 2007; 137.

2.3. Diseño de canales.

En el presente tema se estudiarán los canales revestidos y no revestidos que incluyen canales no erosionables, canales erosionables y canales en pastos. Para los canales erosionables el estudio estará limitado especialmente a aquello que no se sedimentan pero que si se socavan.

2.3.1. Revestidos.

De acuerdo con Rodríguez (2008), la mayoría de los canales artificiales revestidos y construidos pueden soportar la erosión de manera conveniente y, a consecuencia de esto, se consideran no erosionables. Los canales artificiales no revestidos generalmente son erosionables, excepto aquellos excavados en cimentaciones firmes, como un lecho en roca. En el diseño de canales artificiales no erosionables, factores como la fuerza tractiva permisible y la velocidad permisible máxima no hacen parte del criterio que debe ser considerado. El diseñador sencillamente calcula las dimensiones del canal artificial mediante una ecuación de flujo uniforme y después decide acerca de las dimensiones finales con base en la eficiencia hidráulica o reglas empíricas de sección óptima, aspectos prácticos constructivos y economía. Los factores a considerar en el diseño son: la clase del material que conforma el cuerpo del canal, la cual determina el coeficiente de rugosidad; la velocidad mínima permisible, para evitar la deposición si el agua mueve limos o basuras; la pendiente del fondo del canal y las pendientes laterales; el borde libre; y la sección más eficiente, ya sea determinada hidráulica o empíricamente.

Los materiales no erosionables utilizados para formar el revestimiento de un canal o el cuerpo de un canal desarmable, incluyen concreto, mampostería, acero,

hierro fundido, madera, vidrio, plástico, etc. La selección de material depende sobre todo de la disponibilidad y el costo de este, el método de construcción y el propósito para el cual se utilizará el canal.

El propósito del revestimiento de un canal artificial, en la mayor parte de los casos, es prevenir la erosión, pero ocasionalmente puede ser de evitar las pérdidas de agua por infiltración. En canales artificiales revestidos, la velocidad máxima permisible, es decir, la velocidad máxima que no causará erosión, puede no considerarse siempre y cuando el agua no transporta arena, grava o piedras. Si van a existir velocidades muy altas sobre el revestimiento, sin embargo, debe recordarse que existe una tendencia en el agua que se mueve muy rápidamente de mover los bloques del revestimiento y empujarlos por fuera de su posición. Por consiguiente, el revestimiento debe diseñarse contra estas posibilidades.

- Propósitos de un recubrimiento.

Según Sotelo (2002), un recubrimiento tiene que ser impermeable, resistente a la erosión, también el costo de su construcción y su mantenimiento tiene que ser bajo y debe a la acción de agentes atmosféricos, flora y fauna. Los objetivos de recubrir un canal, son los siguientes:

- a) Permite la conducción del fluido, en este caso agua, a una velocidad mayor en un área de excavación profunda o difícil, y a un costo efectivo.
- b) Disminuye las fugas por filtración a través del cuerpo del canal, así bajando el costo que este fenómeno produce, evitando la necesidad de obras de drenaje.

- c) Reduce y homogeniza la rugosidad, provocando con ello que las dimensiones de la sección disminuyan y los volúmenes a excavar.
- d) Asegura la estabilidad de la sección y los taludes se protegen del intemperismo y de la erosión por agua de lluvia.
- e) Reduce la destrucción de los bordes, a causa de la fauna que exista cerca del canal.
- f) Evita el crecimiento de vegetación.
- g) Reduce costos de mantenimiento y operación, al año.
- Tipos de recubrimiento.

De acuerdo con Sotelo (2002), existen diversos materiales para realizar el recubrimiento de un canal. Hay unos que se llaman de superficie dura, éstos pueden ser a base de concreto simple, reforzado o lanzado, también de concreto asfáltico o de mampostería (piedra, ladrillo, bloques prefabricados, etc.). Cualquiera de estos materiales puede satisfacer los objetivos antes mencionados y ante la acción erosiva del agua, éstos también ofrecen una gran resistencia. Otros recubrimientos son a base de materiales granulares, tales como arcilla, tierra compactada o grava, su resistencia a la erosión es menor, pero superpuestos o no sobre una membrana impermeables, si disminuyen las pérdidas por infiltración del agua de manera considerable.

Los recubrimientos de concreto son llamados revestimientos y los que no tienen acero de refuerzo en él son utilizados cuando el canal es de operación continua. Éstos se colocan en taludes 1.5:1 o mayores, los espesores van de 6.5 a 10 cm según las características del canal. Se recomienda que la cantidad de

cemento sea mayor a 250 kgf/m^3 y que la relación agua-cemento sea menor a 0,6, para así lograr la impermeabilidad del revestimiento.

“Las juntas de contracción se construyen con espaciamentos entre 20 a 100 veces el espesor, mediante ranuras transversales de profundidad igual a la cuarta parte del espesor del revestimiento, las cuales por el calor de fraguado se agrietan y después se rellenan con material impermeabilizante y flexible.” (Sotelo, 2002; 744)

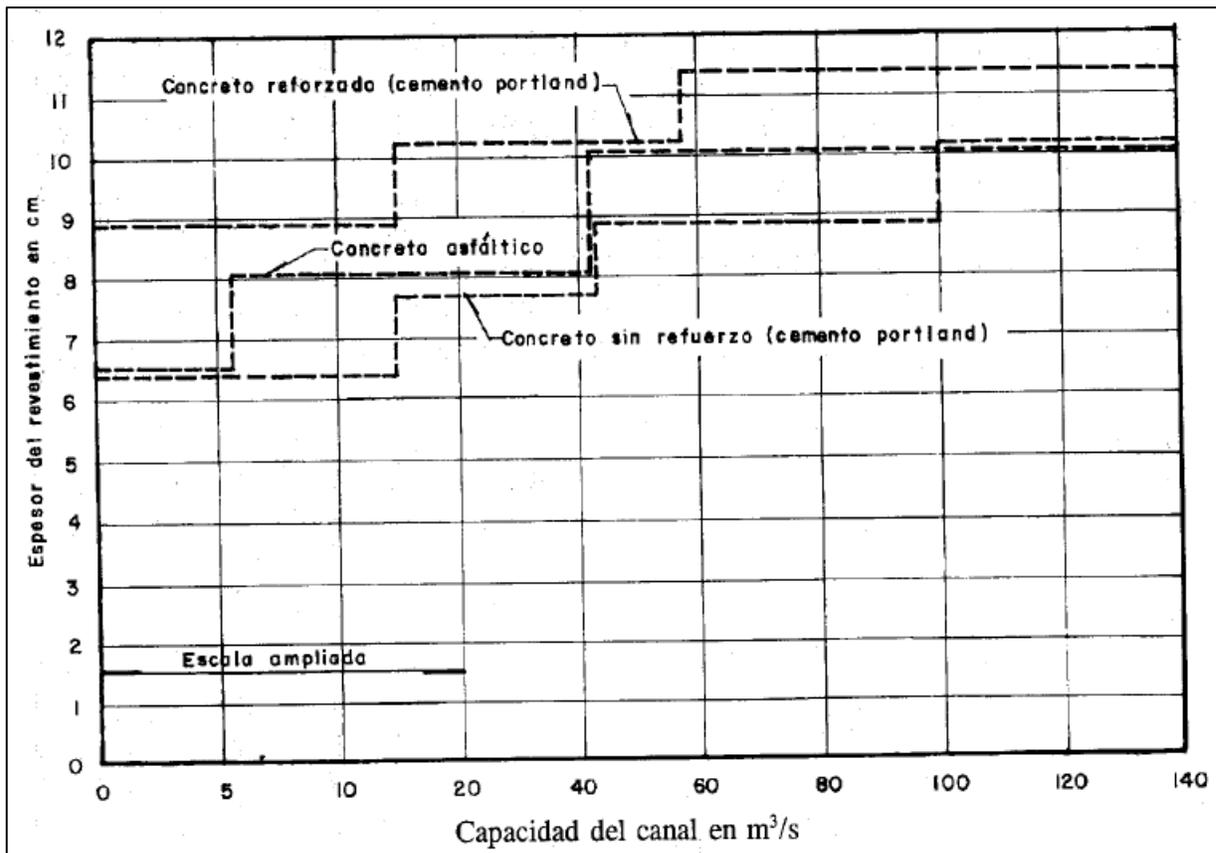


Tabla 2.14 Espesor de revestimientos de superficie dura en canales.

Fuente: Sotelo, 2002; 743.

Los revestimientos de concreto reforzados, son útiles cuando el canal en cuestión será construido en lugares con cambios de temperatura extremos y el gasto fluctúa frecuentemente. También sirve para evitar el agrietamiento del

concreto, ya que éste es más frecuente por los cambios de temperatura, así se evitan grietas y con ello las filtraciones. La tabla 2.14 muestra que el espesor del revestimiento varía de 9 a 12 cm. dependiendo del caudal. La sección del acero de refuerzo en dirección longitudinal varía del 0.1 al 0.4% y en una dirección transversal varía del 0.1 al 0.2%. el acero de refuerzo constituye una parte importante del costo final y en ocasiones éste se puede suprimir mediante las juntas de construcción.

De acuerdo con Sotelo (2002), para canales pequeños, existe la opción de revestirlo con mortero a base de una pistola de cemento, pero este procedimiento deja una superficie rugosa, que si se desea una terminación de primera clase entonces debe ser terminada a mano. Son propensos a fallas por presión hidrostática. En taludes firmes el espesor no es mayor de 5 cm. El cemento se mezcla con arena cernida a través de la malla 4, en proporción 1:3 a 1:4.

Los recubrimientos a base de concreto asfáltico son ventajosos por su flexibilidad y su resistencia a la erosión, éstos fallan principalmente por intemperismo. El concreto asfáltico es una mezcla de asfalto, cemento, grava y arena, se realiza a temperaturas de 160°C o más. Los espesores van de 6.5 a 10 cm. El asfalto se mezcla con arena o bien, con arena y grava en proporción de 6 a 11% en peso y después se le agrega material fino (70% menos que la abertura de la malla #200) en proporción de peso igual al asfalto.

El revestimiento a base de membrana enterrada es también con una capa de asfalto que va de los 6 a los 9 mm de espesor, es colocado en canales excavado en exceso de 30 a 50 cm y después para dar el terminado final de la sección se coloca una capa de tierra compactada.

Los recubrimientos a base de mampostería son funcionales cuantos estos materiales abundan y la mano de obra es económica. Los de piedra pueden construirse juntando con mortero o bien con un simple zampeado.

- Aplicación de un recubrimiento.

En concordancia con Sotelo (2002), los canales revestidos con concreto reducen las pérdidas por filtraciones (en metro cuadrado de superficie mojada) hasta de un vigésimo a igualdad de superficie mojada, sin embargo, como ésta también se ve disminuida, la pérdida es del orden de 1/33 de la de un canal no revestido.

Dos canales diseñados con el mismo gasto y pendiente, el primero está revestido y el segundo no está revestido, tomando en cuenta los subíndices 1 y 2 respectivamente, la igualación del factor de conducción de ambos, y calculando con la ecuación de Manning, se obtiene:

$$\frac{A_1 R_{h1}^{2/3}}{n_1} = \frac{A_2 R_{h2}^{2/3}}{n_2}$$

Teniendo en cuenta que $R_{h1} \cong R_{h2}$ (o el mismo tirante en canales muy anchos), se obtiene:

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

Siendo $n_1 = 0.015$ y $n_2 = 0.025$, se concluye que la implementación de un recubrimiento de concreto reduce el área hidráulica aproximadamente en un 40%.

“La justificación de un recubrimiento se debe basar en un estudio que abarque tanto el costo de excavaciones y rellenos, como el de los diferentes tipos de recubrimiento, incluyendo el costo de conservación y mantenimiento, a fin de concluir el beneficio del agua economizada al impedirse filtraciones. El resultado no siempre

es claro y definitivo y muchas veces no es posible tener conclusiones importantes a través de consideraciones sencillas.” (Sotelo, 2002; 745)

2.3.2. No revestidos.

Según Rodríguez (2008), en estos canales la velocidad debe estar limitada a una velocidad media que no ocasione la erosión de las paredes del canal. Esta velocidad suele ser incierta y variable, principalmente depende del tamaño, la clase de material de las paredes y tirante del flujo, se estima en base a experiencia y criterio. En cambio, la velocidad mínima es determinada por el material sólido que el agua transporta, de otra manera el material transportado produciría depósito en el lecho del canal. La velocidad mínima para evitar el azolvamiento es de 0.40 m/s. la velocidad máxima es aquella velocidad por encima de la cual se produce la erosión de las paredes. La velocidad máxima permisible es de 0.85 m/s.

Material	Velocidad en m/seg.
Arena fina, condiciones inestables	0.30
Suelo arenoso	0.75
Arena arcillosa	0.90
Suelo arcilloso-arenoso o arcilloso-limoso	1.10
Arcillas	1.00
Arenas	1.25
Gravas	2.00
Roca sedimentaria suave	2.50
Roca dura	3.00

Tabla 2.15 Velocidades admisibles para diversos materiales.

Fuente: Rodríguez; 2008; 91.

- Área adicional para azolve y crecimiento de hierbas.

Según Rodríguez (2008), para prever la reducción del área hidráulica de canal debido a los problemas de azolve y el crecimiento de maleza en canales no revestidos, se ha considerado el coeficiente de rugosidad original $n = 0.03$ de modo que se proporcione un incremento de 10% a 20% del área adicional.

- Inicio del arrastre de sedimentos.

De acuerdo con Sotelo (2002), en un canal de laboratorio con velocidad pequeña no se presenta movimiento en el material que está en el fondo, en cambio si la velocidad aumenta paulatinamente, la fuerza de arrastre también lo hace, hasta que dicha fuerza es suficientemente grande como para mover las partículas menos estables. Las partículas comienzan a balancearse en su sitio y algunas veces se separan iniciando un movimiento incipiente. Si la velocidad empieza a crecer progresivamente, mayor cantidad de partículas se desprenderán aisladamente en pequeñas zonas del fondo del canal hasta que el tamaño de la zona aumente, el número de partículas que se mueven cambian de posición y se desprenden en otro sitio, después la mayoría o todas las partículas inician su movimiento. El flujo arrastra las partículas removidas de su sitio sin desarrollar ondulaciones en él, donde, así se inicia el transporte incipiente de sedimentos.

Existen parámetros que ayudan a establecer la condición crítica con la que se inicia el arrastre, los cuales toman en cuenta las características del material y del flujo que produce el arrastre, dichos parámetros se califican en críticos y se les asigna el subíndice c. los más comunes con respecto a su uso son: la velocidad

media crítica V_c , la velocidad crítica en el fondo V_c y el esfuerzo tangencial crítico T_c . Corresponden a los valores máximos que el material es capaz de resistir antes de ser arrastrado por el flujo.

- Velocidad crítica de arrastre.

En concordancia con Sotelo (2002), para estimar la velocidad crítica de arrastre, mayormente es necesario disponer de la distribución geométrica y de la densidad del material en el canal, pero de igual modo es importante el tirante del flujo.

La velocidad son desplazamiento es aquella velocidad máxima media del flujo que las partículas pueden soportar sin ser arrastradas, otros nombres son: velocidad máxima permisible o no erosiva y se le designa como V_p .

2.4. Canales.

En este tema se toman temas como la inspección de canales y el mantenimiento de ellos, ya que es de vital importancia esta información para llevar a cabo la investigación, se basará la información principalmente en el Manual de Mantenimientos, Obras Civiles: Sistemas de conducción de la Comisión Federal de Electricidad.

2.4.1. Inspección.

En concordancia con C.F.E. (1993), el objetivo de realizar una inspección periódica de un canal es evaluar su capacidad estructural y su respectivo funcionamiento para asegurar el gasto requerido por la C.H. para la generación de

energía. Las inspecciones son exámenes visuales que detectan el estado actual en el que se encuentra la estructura del canal; de ésta se puede determinar la necesidad de hacer estudios más detallados o bien un manteniendo correctivo o preventivo y la prioridad en que deben revisare.

En el Manual de Mantenimientos de la C.F.E. (1993), existen 3 tipos distintos básicos de inspección: de rutina general, de rutina específica y especial. Éstos se pueden apreciar en la tabla 2.16, o bien se resumen a continuación en A, B o C.

A. Inspecciones de rutina general.

Éstas son exámenes visuales realizados de manera periódica, en todo el sistema de conducción. Éstas dan información acerca de la apariencia general y el funcionamiento de cada elemento del sistema de conducción y permiten identificar cualquier anomalía o la presencia del algún cambio en su comportamiento.

El área de ingeniería civil, atiende las condiciones peligrosas detectadas, para así tomar las medidas pertinentes y evitar los problemas que puedan ocurrir.

B. Inspecciones de rutina específica.

Ésta es una búsqueda detallada de evidencia de deterioro y las fallas que puedan mostrar una inseguridad en el comportamiento de la estructura o el funcionamiento de un componente. En los sistemas de conducción ésta se realiza en intervalos regulares de tiempo, definidos de acuerdo a la importancia, potencial de riesgo de las instalaciones y la antigüedad. Estas inspecciones se apoyan en la información de la última inspección, más en aquellas instalaciones donde se

presentan fallas recurrentes y de riesgo, ya seas para el personal o para la misma obra.

C. Inspecciones especiales.

Éstas se realizan después de un evento extraordinario, lo más pronto posible, ya sean sismos, huracanes inundaciones, incendios y cualquier otro siniestro, para evaluar la capacidad de servicio de un elemento o la aparición de patrones especiales de comportamiento no esperado, aun cuando no exista un daño aparente. Son importantes ya que con éstas se puede evaluar la magnitud de daños y la reparación de éstos, si es posible.

CONCEPTOS	INSPECCIONES		
	DE RUTINA GENERAL	DE RUTINA ESPECIFICA	ESPECIAL
1. Periodicidad	Rutinaria (mensual o bimestral de acuerdo a las necesidades)	Una para el presupuesto anual del mantenimiento y otra antes de la época de lluvias	Después de un evento extraordinario
2. Propósito	Observación permanente	Observación detallada de todas las instalaciones	Localizar daños y determinar reparaciones de emergencia
3. Personal de inspección y evaluación	Personal de operación y de mantenimiento; Residente del Depto. Civil, y el Superintendente de la central	Jefe del Departamento Civil o Superintendente de la central	Especialista. (internos y externos) y personal de la CFE necesario.
4. Equipo necesario	Bitácora, plomada, linterna casco, flexómetro, nivel de mano y otros que se consideren necesarios	Guías de inspección, planos o croquis (en planta y perfil) para localización de los componentes del sistema de conducción, martillo, plomada, cámara fotográfica, grietómetro, nivel de mano, flexómetro, cincel, binoculares, desarmadores, linterna, lentes, cuerdas y cinturón de seguridad	Equipo especial para hacer mediciones de campo, grabadora portátil, todos los accesorios de las inspecciones de rutina específica y una cuadrilla de trabajo (1 oficial y 2 peones)
5. Informe	Verbal y escrito, al Jefe del Departamento Civil o al Supte. de la central	Verbal y escrito, al Supte. de la central y al Supte. Reg. Civil to Civil Regional	Escrito dirigido al Supte. de la central y a la autoridad superior de la CFE
6. Formato	Según formato normalizado en cada área	Según los formatos usuales y guías propuestas en el Apéndice A.4	A juicio de los especialistas (se sugiere aplicar el formato del Apéndice A.5)

Tabla 2.16 Resumen de conceptos relativos a las inspecciones periódicas. Fuente:

Manual de Mantenimiento de Obras civiles: Sistemas de Conducción, C.F.E.; 1993:

De acuerdo con la C.F.E. (1993), en los canales revestidos usualmente se detectan problemas relacionados con las filtraciones y las fugas debidas al desgaste del revestimiento (acusados por el choque de las partículas de arrastre, por lo cuerpos flotantes o por caídos), también se encuentra grietas, losas levantadas o juntas falladas.

Se debe también vigilar los aspectos, tales como: el crecimiento de vegetación en el borde, en la corona y en las bermas, para evitar que éstos causen grietas; la estabilidad de los muros del canal, también es un aspecto importante a evaluar; los derramen por demasías, obstrucciones o grietas; daños y acumulación de piedras, ramas o basura, provocados por los derrumbes de las laderas.

2.4.2. Mantenimiento.

“Es el conjunto de actividades cuyos objetivos son preservar la integridad y el funcionamiento de las obras, equipos e instalaciones; optimizar (maximizar) su disponibilidad; minimizar los costos de operación; y asegurar la producción de electricidad. Esto se logra al llevar a cabo las acciones de conservación necesarias.”
(C.F.E., 1993, 1)

Cada obra de la ingeniería civil está diseñada para una función específica, así que cada una necesita de características diferentes, por lo que las necesidades son diferentes y la vida útil de la misma también.

Debido al flujo del agua éste se comienza a deteriorar, y con esto el gasto actual comienza a variar del gasto de diseño, generando así que el canal pierda la capacidad de flujo, y la C.H. se vuelva menos eficiente.

Existen 2 tipos de mantenimiento de acuerdo con la C.F.E. (1993), y se definen en los siguientes:

A. Mantenimiento preventivo.

Sus actividades básicas incluyen la inspección, así como el análisis de la información, el diagnóstico y los trabajos de prevención.

B. Mantenimiento correctivo.

Entre sus tareas fundamentales está la inspección específica, la reparación y el replazo, ya sea parcial o total, de la obra.

La C.F.E. (1993), da unas recomendaciones para un mantenimiento eficaz, son las siguientes:

1. Un mantenimiento bien hecho cuesta, pero un mantenimiento pobre cuesta más.
2. Los que se ve bien, puede llegar a estar bien, pero lo que se ve mal, siempre está mal.
3. El origen del problema no siempre es obvio.
4. Primero se debe estudiar los parámetros principales que afectan a la operación y a la producción.
5. Entender el problema es lo principal, para evitar riesgos es mejor escuchar y analizar.
6. Primero se resuelve el problema, después se investigan las causas de su origen.
7. Aplicar los recursos necesarios y suficientes.

8. Definir alcances de la solución final. Las soluciones temporales pueden ser adecuadas de acuerdo con los planes futuros o en caso de alguna emergencia.
9. Evitar problemas legales o perjuicios a propiedades ajenas.
10. Cuidado con vendedores, contratistas y proveedores fraudulentos.
11. Documentar fallas, decisiones, instrucciones, tanto dadas como definidas, los resultados y las recomendaciones.

Dentro de los objetivos del mantenimiento, está el preservar la seguridad, la confiabilidad y la disponibilidad de las obras, equipos e instalaciones; también el optimizar su operación y alargar la vida útil de éste; así como minimizar los costos de operación y por consiguiente evitar las pérdidas de dinero por la suspensión de servicio o falla.

2.4.2.1. Mantenimiento preventivo.

De acuerdo con C.F.E. (1996), para asegurar la generación de energía eléctrica es necesario mantener el gasto de agua que es conducido hacia la presa, la prevención contra daños y la conservación de los componentes de un sistema de conducción son factores de suma importancia para lograr esto.

El mantenimiento preventivo es un proceso el cual incluye dos pasos sumamente importantes: la inspección y evaluación de daños menores y de los daños potenciales y la prevención oportuna y conservación de las instalaciones.

El primer punto se trató en el tema 2.4.1, el segundo hace referencia a las recomendaciones preventivas necesarias para cada estructura dependiendo de sus características, las condiciones de exposición y el funcionamiento.

El mantenimiento de canales, ya sean abiertos o cerrados, depende de los materiales de construcción que fueron empleados en su construcción.

A. Canales abiertos sin revestir.

Los problemas aquí dependen del terreno donde están construidos, los más comunes son:

- Azolve: es producida por la erosión de los taludes y de la plantilla del canal, es debido al tipo de material arrastrado por el río, que llega al canal por la suspensión, este problema afecta el funcionamiento hidráulico, reduce la capacidad de conducción. Para su prevención es necesario determinar la causa específica que la provoca y tratarla, según su naturaleza.
- Erosión: causa la pérdida de estabilidad en el terreno de los taludes y de las bermas en ambos márgenes del canal. Para su prevención es necesario comparar la velocidad del cauce contra la máxima permisible, también vigilar de manera constante la erosión y la estabilidad del terreno de los taludes y bermas.
- Filtraciones: reducen el gasto, pero también pueden llegar a provocar inestabilidad en el terreno, causando así daños mayores. Se pueden controlar las filtraciones pequeñas con ayuda de material granular, donde sea necesarios, se eliminan a través de aplicación de sellos

impermeabilizantes de aceite quemado, breas, ceniza volátil, inyecciones de silicatos, cemento tipo 1 con puzolana. El suelo del a plantilla también debe compactarse mecánicamente.

- Crecimiento de vegetación en márgenes, bordo libre y bermas: Para evitar el ablandamiento del material y grietas, se debe cortar la vegetación desde la raíz, periódicamente.
- Socavación: producida gracias a las altas velocidades del fluido, principalmente en las transiciones. Se debe realizar un estudio del terreno para saber su resistencia a la erosión, el grado de intemperización, así como la permeabilidad.

Dependiendo la recurrencia y la magnitud de los problemas anteriormente mencionados, se tendrá que considerar la posibilidad de revestir el canal.

B. Canales abiertos revestidos.

El material de construcción en la sección de los canales puede ser: plantilla de suelo-cemento, zampeado o concreto; los taludes y muros pueden ser de zampeado, mampostería con concreto armado. Los problemas más frecuentes que se pueden encontrar son:

- Azolve: se acumula con mayor facilidad en tramos donde la velocidad del flujo es baja, esto facilita la sedimentación de la partícula.
- Erosión del revestimiento: es ocasionado por los “caídos” (cuerpos flotantes), por el arrastre de estas partículas en flujos de alta velocidad y por

los saltos hidráulicos en los cambios de pendiente, caídas, descargas o en estructuras disparadoras de energía.

- Filtraciones: debida a grietas en el revestimiento o por las juntas deterioradas.
- Crecimiento de lama: crece vegetación acuática, por la falta de limpieza de varios meses, de las paredes o la plantilla, que con el pasar del tiempo provoca grietas, por las raíces crecidas y por consecuencias de filtraciones.

El mantenimiento preventivo de los canales revestidos es fácil si se implementa un programa anual de las actividades de acuerdo a las inspecciones y observaciones del ingeniero, dichas actividades son:

- Con recubrimientos impermeabilizantes, sellar las superficies de concreto, aun si no existe causa o daño aparente.
- Resanar grietas, juntas deterioradas, despostillamientos, desprendimientos y la abrasión del concreto, para que no afecten el comportamiento de la estructura.
- Desazolvar el canal, ya sea mecánicamente o manualmente.
- Limpiar todo indicio de crecimiento de vegetación.

2.4.2.2. Mantenimiento correctivo.

De acuerdo con la C.F.E. (1993), las fallas o daños en un sistema de conducción son gracias a un proceso gradual de deterioro, por las condiciones de servicio o, son originadas los efectos repentinos de un trabajo extraordinarios, los

trabajos que son considerados como mantenimiento correctivo son la reparación, la rehabilitación y el remplazo, ya sea parcial o total.

Para considerar un mantenimiento correctivo efectivo, es necesario eliminar los problemas, sus causas y los efectos posteriores que posiblemente se puedan dar.

La mayoría de los trabajos correctivos en canales se realizan en la época previa a las lluvias, por eso deben estar programadas junto con las actividades de mantenimiento que requieren otras obras del sistema de conducción.

A. Canales abiertos sin revestir.

La erosión en el fondo, taludes, bermas y bordos ocasionan su deslave, generando así inestabilidad y filtraciones que a su vez generan pérdidas considerables de gasto. Algunas obras que pueden construirse para reparar tramos afectados son:

- Muros de contención, que pueden ser de mampostería o concreto reforzado. Deben desplantarse en terreno firme y soportan el empuje del relleno y/o la presión hidrostática.
- Terraplenes, para estabilizar los taludes dañados o deslavados, se coloca material impermeable.
- Revestimiento, ya sea de taludes o del fondo, esto en caso donde se esté provocando las pérdidas del fluido y la erosión.

B. Canales revestidos.

Las actividades correctivas, ya sean de reparación o reposición de revestimiento, pueden ser por diversos problemas, como son:

- Grietas en muros contenedores de mampostería, causadas por asentamiento y volteo causa de la presión hidrostática.
- Falta de sello por fracturas en el zampeado o en las losas de concreto y grietas en sus juntas. Causadas por el asentamiento y/o el abombamiento del revestimiento.

Las losas de concreto se reparan así:

1. Eliminando los fragmentos sueltos de la zona afectada.
2. Removiendo y retirando el material suelto de la zona.
3. Haciendo una excavación hasta encontrar terreno sano, en forma de cajón.
4. Rellenando con capas de 15 cm y compactando manualmente (bailarina) hasta llegar al nivel de desplante de la losa siguiente.
5. Colocando y traslapando el acero de refuerzo.
6. Fijando la cimbra y colando el concreto nuevo.

C. Azolve en canales.

Existen desarenadores a lo largo del canal que están dispuestos para desalojar del canal un porcentaje considerable de los sedimentos, pero aun así una buena parte de ellos continua su viaje por los canales, y ésta se ve incrementada por los deslaves de las laderas y taludes y la erosión. Para reducir la cantidad de azolve que llega a los tanques de regulación y que el sedimento dañe las turbinas, es necesario:

- Construir desarenadores con conductos de fondo.

- Dar un nivel más bajo a la plantilla del canal de llegada con respecto de la obra de toma y ampliar el desarenador.
- Construir desarenadores nuevos, en casos necesarios.
- Construir losas-tapa para evitar que los derrumbes o deslaves, suelten material dentro del canal.
- Sobrelevar los muros o taludes del canal, para así evitar derrames de agua y la erosión del terreno.

CAPÍTULO 3

RESUMEN DE MACRO Y MICROLOCALIZACIÓN

En el presente capítulo se contempla lo relacionado al sitio donde se ubica el proyecto, partiendo del entorno geográfico en el que se encuentra con el cual describe su localización, así como la extensión territorial, infraestructura, informe fotográfico, etc. Con el objetivo de facilitar al lector el poder ubicar el sitio donde se realizó la tesis.

3.1. Generalidades.

La inspección y evaluación de un canal de conducción de C.F.E. es de suma importancia, ya que éstos conducen el agua para la producción de energía eléctrica.

La inspección, evaluación y propuesta de mantenimiento se hará únicamente del km 8+870.55 al 9+914.55, que se puede apreciar en el anexo 1, es el tramo justo después de El Atuto.

El canal está construido de mampostería, y revestido de concreto reforzado, tiene una sección trapezoidal, y tiene una capacidad de 10 m³, que son conducidos a la C.H. “El Cóbano”, para la generación de parte de la energía eléctrica que se usa en el país.

3.1.1. Objetivos.

Revisar un tramo del canal de conducción que alimenta a la Central Hidroeléctrica “El Cóbano” para conocer si está en óptimas condiciones para su correcto funcionamiento. Así como proponer un mantenimiento para éste.

3.1.2. Alcance del proyecto.

En el presente trabajo se dan a conocer los resultados de la inspección visual del canal de la C. H. El Cóbano, así como la evaluación de las fallas, para así determinar el tipo de mantenimiento que se debe aplicar a las zonas deterioradas.

También se incluye un aforo del gasto para la realización de una comparativa con respecto del gasto de diseño del canal. Esto sirve para evaluar la efectividad de la conductividad. Ya que con las fallas que tiene se presentan pérdidas en la velocidad y el área del canal, y obviamente el gasto.

3.2. Resumen ejecutivo.

Para el presente trabajo la información fue proporcionado por la Comisión Federal de Electricidad la cual es el organismo normativo del país de producción de energía eléctrica, dicha información consta de planos, fotografías, manuales, etc. Y es la requerida para poder inspeccionar, evaluar las condiciones del tramo del canal, así como para la propuesta del mantenimiento.

Lo necesario para realizar este trabajo es primero la inspección visual del tramo seleccionado, no se necesitan estudios previos, ya que solo se revisaron los daños actuales del canal y de ahí se partió la evaluación el nivel de daño en las distintas afecciones del canal. Y así lograr la propuesta adecuada del mantenimiento para el canal. Así mismo se conoció el terreno donde está ubicado, así como sus alrededores.

Se realizó la visita al lugar de los trabajos para verificar el estado actual del canal, así como su inspección y evaluación. También para conocer el funcionamiento

del canal, así como el flujo del agua dentro de él, se sabe que ambas paredes y la plantilla están recubiertas para lograr la eficiencia del mismo,

En resumen, prácticamente son suficientes sólo los planos, el Manual de mantenimiento de obras civiles: sistemas de conducción de C.F.E., el aforo del gasto y programas necesarios para la elaboración de la tesis, por lo que otros elementos no se consideran en el presente trabajo.

3.3. Entorno geográfico.

En este subcapítulo se presenta la zona de ubicación del proyecto realizado, mencionándose de manera micro y macro, esto es, comienza de nivel país a nivel municipio y la zona exacta donde se encuentra la zona exacta de estudio.

3.3.1. Micro y macrolocalización.

Este trabajo fue elaborado en el país de México. El cual es llamado oficialmente como Estados Unidos Mexicanos, se encuentra en el continente americano en el hemisferio norte. Colinda al Norte con Estados Unidos de América, al Sur y oeste con el océano Pacífico, al Este con el Golfo de México y el mar Caribe, y al Sureste con Guatemala y Belice.

El idioma oficial de México es el español, pero también cuenta con 66 lenguas amerindias. Abarca una extensión territorial de 1,964,375 km², siendo así el 5to lugar en extensión territorial en el continente americano y el 3er lugar por su número de habitantes, con 127.5 millones de personas, según datos obtenidos en el 2016.

En la figura 3.1 se puede observar el mapa de la República Mexicana, donde se puede apreciar la distribución del país en 32 entidades federativas.



Fig. 3.1 Mapa de la República Mexicana.

Fuente: Didactalia.net; 2012.

El sitio de ubicación se encuentra en el estado de Michoacán, el cual representa un 2.99% de la superficie territorial del país. Su territorio se extiende a 59,864 km². Presenta diferentes elevaciones a lo largo de su territorio, siendo la altitud más alta 3,840 msnm.

Presenta colindancias al noroeste con los estados de Colima y Jalisco, al norte con los estados de Guanajuato y Querétaro, al este con México, al sureste con el

estado de Guerrero y al suroeste con el Océano Pacífico. Está conformado por 113 municipios y su capital es Morelia.

En la siguiente figura se puede apreciar el estado de Michoacán y los municipios que lo conforman con su división política.

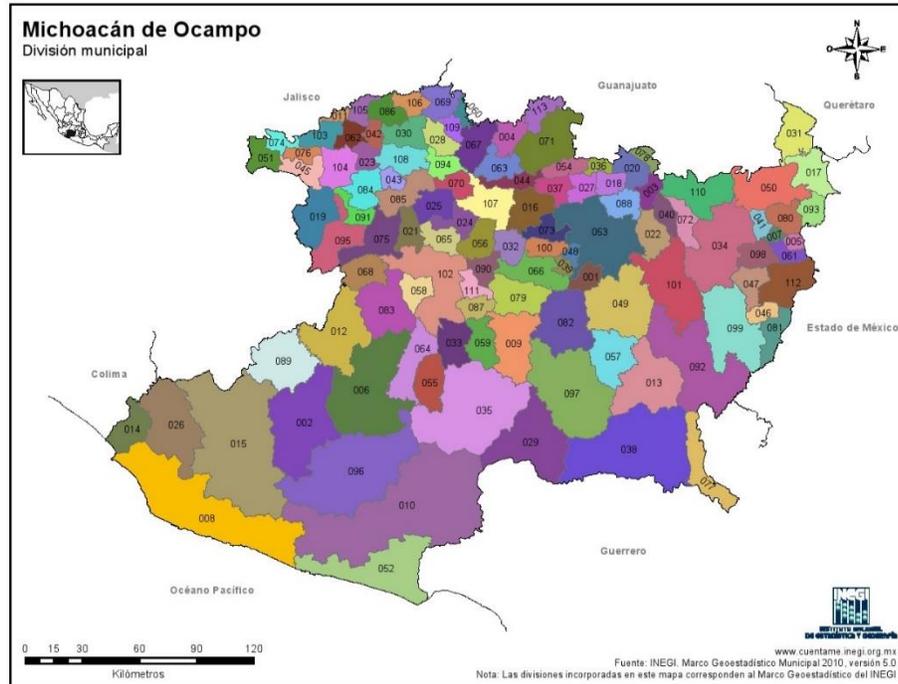


Figura 3.2 Mapa de Michoacán

Fuente: Mapasinteractivos.didactalia.net; 2010.

A nivel microlocalización, la zona del proyecto se encuentra en el municipio de Gabriel Zamora, colinda al Norte con los municipios de Uruapan y Nuevo Urecho, al Este con los municipios de Nuevo Urecho y La Huacana, al Sur con los municipios de La Huacana y Múgica y al Oeste con los municipios de Múgica, Parácuaro y Uruapan. Está ubicada entre los paralelos 19°01' y 19°17' de latitud al Norte, los

meridianos 101°54' y 102°06' de longitud Oeste, tiene una altitud de entre los 300 y 1,600 m.

Tiene una extensión territorial de 367,433 km², lo que representa un 0.72% del territorio total del Estado, tiene una población total de 21,294 habitantes. Cuenta con 17 localidades, entre ellos La Gallina, que es la localidad donde se encuentra el tramo del canal estudiado, la obra será ejecutada en el canal de conducción de la Central Hidroeléctrica El Cóbano, del cadenamamiento 1+000 al 2+000.

En la siguiente figura se aprecia la división política del municipio de Gabriel Zamora y sus colindancias.



Figura 3.3 Ubicación del municipio de Gabriel Zamora.

Fuente: Google.

3.3.2. Geología Regional y de la Zona en Estudio.

De acuerdo con el Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, el municipio de Gabriel Zamora presenta varios tipos de roca, los cuales son: roca ígnea intrusiva: granito-granodiorita un 16.60% y granito un 2.07%; roca extrusiva: basalto un 17.51%, dacita un 9.96%, brecha volcánica intermedia un 6.14%, andesita un 2.73%, basalto-brecha volcánica básica un 1.05%, toba básica un 0.69%, brecha volcánica básica un 0.64% y toba ácida-brecha volcánica ácida un 0.18%; sedimentaria: arenisca-conglomerado un 34.50%; suelo: aluvial un 5.46%. Existe una mina de cobre y un banco de material: relleno.

En la zona de estudio se puede observar a simple vista muchas rocas de varios tamaños, pero ninguna de tamaño grande siendo de color gris y el suelo a simple vista se percibe aparentemente que es un limo y presenta bastante material suelto en la parte superior del suelo.

3.3.3. Hidrología Regional y de la Zona en Estudio.

El municipio de Gabriel Zamora se encuentra en la región hidrográfica del Balsas en su 100%. Cuenta con una cuenca que es la de Tepalcatepec-Infiernillo. Las subcuencas que abarca son La Parota en un 74.11%, Cupatitzio en un 24.93% y El Marqués en un 0.96%. cuenta con dos tipos de corrientes de agua: Perenes: Cupatitzio, Platanillo, Acúmbaro, Rincón de León, Cojones, Tomendán, Curindales, Agua Fría, El Curindal, El Márquez, Casilda y La Pastoría; intermitentes: Jicalán Viejo, Andaguio, El Varillo, San Salvador, Los Panales, El Cóbano, El Huicumo, Las Trojitas, La Cirandilla y Salado.

3.3.4. Uso de Suelo Regional y de la Zona en Estudio.

De acuerdo con el Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, el tipo de suelo que predomina en el municipio de Gabriel Zamora, se divide en un 41.02% de Leptosol, un 29.51% de Vertisol, el 12.57% de Phaeozem, un 7.16% de Luvisol, un 5.28% de Cambisol, un 1.41% de Regosol y un 0.30% de Fluvisol.

El uso de suelo en el municipio está dedicado en un 41.78% a la agricultura y un 2.47% de zona urbana. Lo demás se destina a la vegetación, repartida en estos porcentajes: a la selva se le destina un 38.16%, al bosque un 13.39% y al pastizal un 3.92%.

3.4. Informe Fotográfico.

Se muestra un informe fotográfico en el que se puede apreciar las zonas con daños del canal, su estructura y los alrededores.

En esta fotografía se puede apreciar la cantidad de vegetación que crece en las paredes del canal debido a la falta de mantenimientos en los años anteriores, la falta de recubrimiento y debido a que la velocidad actual es menor a la velocidad de diseño.



Fotografía 3.1 Maleza en las paredes del canal.

Fuente: Propia.



Fotografía 3.2 Presencia de “cola de zorra”.

Fuente: C.F.E.



Fotografía 3.3 Socavación de las paredes.

Fuente: C.F.E.



Fotografía 3.4 Sedimentación.

Fuente: C.F.E.



Fotografía 3.5 Agrietamiento del revestimiento.

Fuente: Propia.

3.4.1. Problemática.

Dentro del tramo se encuentran problemas de azolve, socavación, vegetación en las paredes, desprendimiento del concreto, lo que deja a la vista la mampostería del canal. Estas fallas causan las pérdidas en el volumen de agua y la velocidad que lleva el canal, lo cual hace que el canal sea menos eficiente de lo que estaba considerado en su diseño original.

3.4.2. Estado Físico Actual.

Enseguida se presenta el estado en el que se encuentra el canal que se revisó, sus problemáticas latentes en el cuerpo de éste.

3.5. Alternativas de solución.

En este tema se abordan algunas soluciones para la propuesta del mantenimiento, así como la implementación de un revestimiento con una malla de acero. También la limpieza del fondo del canal para retirar el material sedimentado por medio de una retroexcavadora y la eliminación de la vegetación de las paredes.

3.5.1. Planteamiento de alternativas.

Debido a que los mantenimientos correctivos y preventivos en El Cóbano se realizan entre Julio y Octubre, al ser estos unos meses de gran impacto en el ámbito de lluvias, el suelo tiende a saturarse y al faltar la presencia del empuje de agua en el canal, las paredes, en ocasiones pasadas, se han fracturado, llega a su estado límite de servicio, desprendiéndose gran parte de ellas. Teniendo así que corregir taludes y colocar una nueva mampostería.

También se debe hacer un aforo para medir el gasto y así hacer la comparativa de la eficiencia actual con la esperada de diseño.

3.6. Procesos de análisis.

La revisión del canal se lleva a cabo, por medio del Manual de Mantenimiento de Obras Civiles. Sistemas de Conducción, de Comisión Federal de Electricidad, el cual contiene una serie de especificaciones para el óptimo estado de un canal de conducción. En un capítulo posterior se explicará este tema más a detalle.

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA

En este capítulo se aborda lo relacionado a la metodología de la investigación de la tesis, que refiere a los temas: el método empleado, el enfoque de la investigación, el diseño de la investigación, los instrumentos de recopilación de datos y también la descripción del proceso de investigación.

4.1. Método empleado.

“El método científico es un proceso para descubrir las condiciones en que se presentan sucesos específicos, caracterizado generalmente por ser tentativo, verificable, de razonamiento riguroso y observación empírica.” (Tamayo, 2003; 28)

De acuerdo con Tamayo (2003), el método científico simplemente es la lógica aplicada a las realidades o hechos observados, por tal razón cita a Pardinás (), que explica que para descubrir nuevos conocimientos es necesario seguir una serie de pasos y eso es el método científico, o bien para comprobar o desaprobar hipótesis que implican o predicen comportamientos de fenómenos ignorados hasta el momento.

Esta investigación aplica el método científico ya que para su elaboración se llevó a cabo un conjunto de procedimientos para poder plantear el problema y así poner a prueba la hipótesis.

En este método lo realmente importante y fundamental es definir el procedimiento para demostrar que un enunciado es así, ya que cada ciencia esboza

y necesita de un método especial, dependiendo de la naturaleza de los hechos estudiados, pero los pasos están ya regulados por el método científico. Este método también lleva a la eliminación del plano subjetivo en la interpretación de la realidad, logrando así permitir la objetividad en el proceso investigativo.

4.1.1. Método matemático.

En concordancia con Mendieta (2005), se refiere al método matemático como aquel en que se aplican procedimientos matemáticos para comparar cantidades y de tal manera obtener resultados derivados del procedimiento precedente, señalando la necesidad o importancia de éstos, todo esto debido a que la noción de la cantidad, es de las primeras nociones que el ser humano percibe, y este proceso ocurre sin que el individuo se de cuenta.

El método matemático tiene un campo de acción bastante amplio, ya sea en las investigaciones donde se utilizan matices diferenciales, cambios graduales, referencias de tiempo, el análisis de ciertos valores por otros, en esos casos se utiliza el método cualitativo.

En esta tesis es forzoso el método matemático, ya que sus características concuerdan con las categorías mencionadas anteriormente, debido a que se recurrirá a procesos de índole matemático para, comprobar, afirmar o negar, las hipótesis propuestas al comenzar este trabajo. Gracias a esto el método de elección será al matemático, ya que es el que más se ajusta con las necesidades del proyecto.

4.2. Enfoque de la investigación.

“La investigación es un conjunto de procesos sistemáticos, críticos y empíricos que se aplican al estudio de un fenómeno o problema.” (Hernández y cols, 2014; 4)

De acuerdo con Hernández y colaboradores (2014), a lo largo de la historia han surgido diferentes marcos interpretativos y diversas corrientes de pensamiento, que han ayudado a liberar los distintos caminos del pensamiento. Sin embargo, desde el siglo XX estas ideas se han fusionado y gracias a esto se puede encontrar dos enfoques principales que son: el enfoque cuantitativo y el enfoque cualitativo de la investigación.

En ambos enfoques intervienen varias características comunes, como lo son procesos meticulosos, sistemáticos y empíricos, gracias a esto la definición de investigación que el autor expresa se puede aplicar a ambos, por este motivo el autor cita a (Grinnell, 1997), que alude cinco estrategias similares y relacionadas entre sí:

- a. Ejecutan la observación y evaluación de fenómenos.
- b. De la observación y evaluación realizadas, se constituyen suposiciones o ideas.
- c. Se expone el grado en que las suposiciones o ideas son fundamentales.
- d. Se verifican las suposiciones o ideas con respecto de la base de las pruebas o del análisis
- e. Formulan nuevas observaciones y evaluaciones con el propósito de esclarecer, modificar y cimentar las suposiciones o ideas o incluso suscitar otras.

“El enfoque cuantitativo es secuencial y probatorio. Cada etapa precede a la siguiente y no podemos brincar o eludir pasos. El orden es riguroso, aunque desde luego, podemos redefinir alguna fase. Parte de una idea que va acotándose y, una vez delimitada, se derivan objetivos y preguntas de investigación, se revisa la literatura y se construye un marco o una perspectiva teórica.” (Hernández y cols., 2014; 4)

Por lo tanto, el enfoque de esta investigación será cuantitativo, ya que en esta tesis se realiza la revisión estructural de un canal y una propuesta para su mantenimiento, y se llevarán a cabo hipótesis, ideas, recopilación de datos, comprobaciones y correcciones de su funcionamiento, hasta llegar al resultado deseado por medio de un proceso cíclico de los factores anteriores.

4.2.1. Alcance de la investigación.

De acuerdo con Hernández y colaboradores (2014), el alcance del estudio está sujeto de la estrategia de investigación, de tal manera que, dependiendo del diseño, los procedimientos, entre otros factores importantes, el proceso será diferente, estableciendo si es un estudio con un alcance explorativo, descriptivo, correlacional o explicativo, aunque en la práctica una misma investigación puede tener características de más de unos de los cuatro alcances.

“Con los estudios descriptivos se busca especificar las propiedades, las características y los perfiles de personas, grupos, comunidades, procesos, objetos o cualquier otro fenómeno que se someta a un análisis. Es decir, únicamente pretenden medir o recoger información de manera independiente o conjunta sobre

los conceptos o las variables a las que se refieren, esto es, su objetivo no es indicar como se relacionan” (Hernández y colaboradores, 2014; 92)

En el alcance descriptivo, habitualmente el objetivo del investigador es describir situaciones, fenómenos o eventos, de manera minuciosa, es decir, como son y en qué manera se presentan. En estos estudios son investigados las propiedades, características, perfiles de terreno, etc., es decir, miden, examinan o recolectan datos sobre los componentes, aspectos o dimensiones del fenómeno que es investigado.

Para la ejecución de este tipo de proyectos es imprescindible el uso de la mayoría de las características que tiene este tipo de enfoque, por esa razón se utilizará el alcance descriptivo en esta tesis, también gracias a que se recoge información sobre el material usado, sus características procesos de análisis y diseño, entre muchos otros más que serán necesarios para desarrollar el proyecto.

4.3. Diseño de la investigación.

De acuerdo con Hernández y colaboradores (2014), ya que se tiene un planteamiento del problema, también se especificó el alcance de la investigación y que se han generado las hipótesis, es responsabilidad del investigador hallar la forma más rápida y directa para responder las preguntas de investigación y cumplir con los objetivos fijados, ese es el proceso de diseño.

Se puede explicar al diseño como como una estrategia o plan, creado con el propósito de recabar información imprescindible para la investigación, en el caso de un enfoque cuantitativo, los diseños son empleados para analizar qué tan ciertas o

correctas fueron las hipótesis generadas con anterioridad, la calidad de la investigación estará unido al grado de seguimiento del proceso de diseño como fue supuesto, se debe considerar la posible existencia de cambios de diseños, debido a las diversas circunstancias .

Según Hernández y colaboradores (2014), clasifica la investigación en dos: la investigación experimental y la no experimental, cita a Campbell y Stanley (1966) ya que ellos clasifican la investigación experimental en tres: preexperimentos, experimentos “puros” y cuasiexperimentos, por otra parte, la investigación no experimental puede subdividirse en dos diseños transversales y diseños longitudinales.

La investigación no experimental puede definirse como la investigación que es realizada sin manipular premeditadamente las variables. Se trata de estudios en los que no varían en forma intencional las variables independientes para ver su producto sobre otras variables. O sea, es observar fenómenos tal como se dan en su contexto natural, para analizarlos.

Esta tesis es de carácter no experimental, ya que no se realizará ninguna especie de experimento, solo se estudiarán variables tal y como se comportan de manera rápida.

En concordancia con lo dicho por Hernández y colaboradores (2014), los diseños experimentales se clasifican en transeccionales y longitudinales, para este caso específico se utilizará el transeccional.

“Los diseños de investigación transeccional o transversal recolectan datos en un solo momento, en un tiempo único. Su propósito es describir variables y analizar

su incidencia e interrelación en un momento dado.” (Hernández y colaboradores, 2014; 154)

Se reconocen ciertas características esenciales, en los diseños de investigación transeccional, que se mencionan a continuación:

- a. Estudiar la modalidad o nivel de una o distintas variables en un momento de tiempo dado.
- b. Evaluar una situación, fenómeno o evento, en un punto de tiempo.
- c. Obtener la relación existente entre una cantidad de variables en un momento.

4.4. Instrumentos de recopilación de datos.

Para el proceso de la recolección de datos y recolección de la investigación, se utilizaron los siguientes instrumentos o herramientas para la recopilación de datos, gracias a éstos se puede cumplir con el objetivo principal de este trabajo de investigación de tesis.

- **AutoCAD.**

Es un software de diseño asistido por computadora utilizado para dibujo 2D y modelado 3D, cuya labor consiste en servir como herramienta para elaborar planos arquitectónicos de las estructuras a realizar, así como también planos estructurales, de instalaciones eléctricas y plomería, entre muchas otras más funciones. Actualmente es desarrollado y comercializado por la empresa Autodesk; siendo este uno de los programas más usados por arquitectos, ingenieros, diseñadores industriales y otros, para esta situación se va a necesita del mismo, para así poder realizar todos los planos necesarios para él, se eligió por ser el más efectivo de su tipo.

- **Excel.**

Es una aplicación de hojas de cálculo que forma parte de Microsoft Office. Es una aplicación utilizada en tareas financieras y contables, con fórmulas, gráficos y un lenguaje de programación. Permite al usuario realizar diferentes procesos cuantitativos, mediante de su hoja de cálculo, en ella se puede automatizar la mayoría de los procesos relacionando una celda con otra, es utilizado para la determinación de algunos valores, partiendo de los obtenidos por algún otro programa de cálculo o modelación, o viceversa, utilizarlos en dichos programas, por tales motivos se usa éste en esta investigación, ya que es muy sencillo de comprender y posee gran amplitud de características y ventajas.

4.5. Descripción del proceso de investigación.

Primeramente, se realizó una investigación bibliográfica, o sea, partiendo del estudio de libros relacionados al tema investigado, para así poder dar fundamentos o comprobar lo dicho en la tesis, utilizando paráfrasis con cortesía o citas textuales para saber de qué autor se está haciendo referencia.

Después se realizó una serie de pasos lógicos, que permiten llevar a cabo los cálculos, en este caso la revisión de un canal de conducción de agua para generación eléctrica, siendo necesario el uso de algunas herramientas para poder facilitar el proceso de análisis, revisión de la estructura y diseño de un mantenimiento óptimo. El proceso de análisis y diseño, es un proceso cíclico, por lo cual se puede pasar del primero al segundo o viceversa, así varias veces, hasta obtener el resultado satisfactorio buscado.

Por último, se recurrió al uso de anexos para agregar planos, fotografías, cálculos, etc., para poder enriquecer más la investigación y desarrollar más detalladamente cierto proceso. Asimismo, se encuentra la bibliografía, utilizada con el fin de mostrar los libros estudiados o por si el lector observó alguna cita textual o paráfrasis con cortesía, epoda encontrar los datos complementos de dicho autor.

CAPÍTULO 5

CÁLCULOS, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se puede ver el procedimiento de la inspección, la evaluación y el mantenimiento propuesto del tramo del canal elegido, se presentan tablas con los resultados obtenidos e información proporcionada por la Comisión Federal de Electricidad.

5.1. Inspección.

De acuerdo con el Manual de Mantenimiento de Obras Civiles: Sistemas de Conducción (1993), la inspección correspondiente a este proyecto es una inspección de rutina específica, ya que se pretende encontrar los daños o deterioros del canal en zonas específicas. Debido a que, por la antigüedad del mismo canal, es candidato a fallas.

Para la realización de la revisión del canal, primero, se hizo una inspección física del tramo elegido, para esto se tuvo que viajar a la comunidad “La Gallina” que se encuentra en el municipio de Gabriel Zamora. En primer lugar, se recorrió caminando el canal, que el tramo comprendido es de aproximadamente 1 km, para poder observar las fallas o daños, se tomaron fotografías y se llenó el respectivo informe.

En el mismo Manual, se detalla cómo se debe hacer una inspección, y brinda una tabla que se debe llenar con respecto de lo que se observó en campo; esta tabla contiene filas, como son: muros laterales, revestimiento en taludes, bordos, plantilla,

talud superior e inferior y protección de laderas; y columnas, que son: daños o deterior, la causa probable de éstos, así como el posible mantenimiento correctivo y

la urgencia con la que se debe de tratar. Esto para determinar todas las posibles situaciones.

CENTRAL HIDRÁULICA: El Cóbano **INSPECCIÓN No:** 1 **FECHA:** 08-09-18

ELABORÓ: Jessica A. Cabrera Ramírez **HOJA:** 1 **DE:** 1

ELEMENTO Y POSIBLES DEFICIENCIAS A INSPECCIONAR	OBSERVACIONES			
	Daño o deterioro	Causa probable	Solución propuesta y prioridad	
1. Canal:				
a) Muros laterales:	Agrietamiento.	Movimientos sísmicos y posible asentamiento. Desgaste del recubrimiento.	Restauración de la zona dañada.	1
	Vegetación.	Semillas de los pastisales caen dentro. Velocidad por debajo de la mínima.	Limpieza.	1
	Filtraciones.	Agrietamiento.	Restauración de la zona.	1
b) Revestimiento en taludes	Agrietamiento.	Movimientos sísmicos y posible asentamiento. Desgaste del recubrimiento.	Restauración de la zona dañada.	1
	Filtraciones.	Agrietamiento.	Restauración de la zona dañada.	1
	Erosión.	Debido a la fuerza del agua.	Revestimiento.	2
	Vegetación.	Semillas de los pastisales caen dentro.	Limpieza.	1
	Socavación.	Desprendimiento de material.	Revestimiento.	1
c) Bordos:	-	-	-	-
d) Plantilla:	Azolve.	Decrecimiento de la velocidad de flujo.	Limpieza con retro.	1
	Vegetación.	Semillas de los pastisales caen dentro.	Limpieza.	1
	Erosiones.	La velocidad del flujo.	Revestimiento.	2
	Filtraciones internas y externas.	Grietas, socavaciones.	Restauración de la zona.	1
	Socavación.	Desprendimiento de material.	Revestimiento.	1
e) Talud superior	Brote de talud superior.	Reblandecimiento del suelo.	Estabilizando el material.	2
f) Talud inferior:				
g) Protección de laderas	-	-	-	-

* Prioridad, prioridad 1: Urgente; prioridad 2: reparación posterior.

Tabla 5.1 Formato CAN.

Fuente: Manual de Mtto.de Obras Civiles: Sistemas de Conducción; 1993: A.4-3.

Como se puede observar en la tabla, los daños que presenta la estructura provocando que la efectividad del canal no sea la que se espera. La mayoría de sus fallas, son de carácter 1, que es de urgencia.

5.2. Evidencia.

Para realizar este apartado, se necesitó de las fotografías tomadas durante la inspección visual, realizada en el 5.1.

Para las tablas se realizó una copia del formato de Identificación De Daños A.4-29 del Manual de Mantenimiento de Obras Civiles: sistemas de conducción. Se le realizaron algunas modificaciones, esto con el fin de apartarlo al trabajo que se realiza.

Las tablas contienen una pequeña descripción de lo que es el daño o falla del elemento del canal, así como una fotografía que lo demuestra y la ubicación en una imagen de la sección del canal.

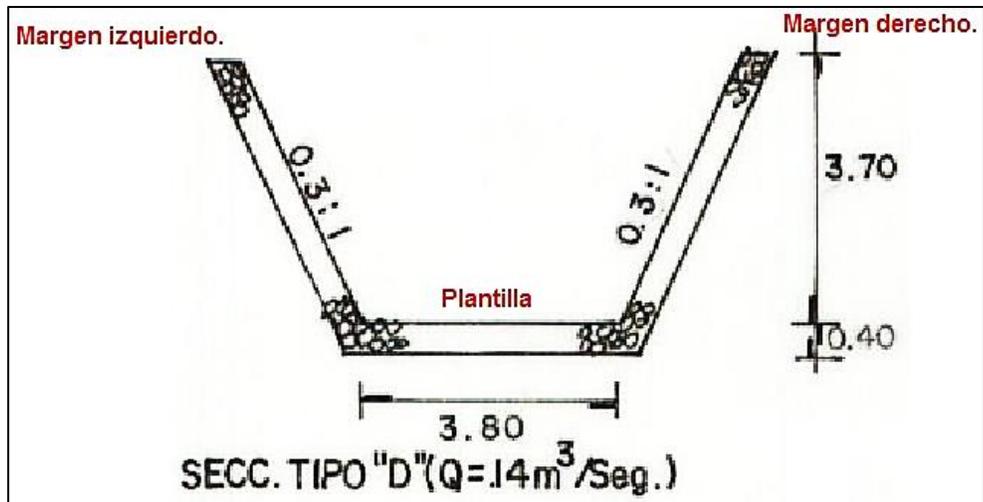


Figura 5.1 Indicación de las partes del canal, para las tablas 5.3 a la 5.25.

Fuente: Comisión Federal de Electricidad.

Concepto	Tipo de problema.
"001"	Agrietamiento.
"002"	Azolve.
"003"	Brote.
"004"	Desprendimiento.
"005"	Erosión.
"006"	Filtraciones.
"007"	Socavación.
"008"	Vegetación.

Tabla 5.2 Tipo de problema y su concepto.

Fuente: Propia.

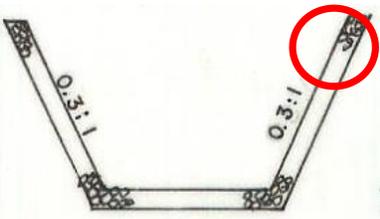
RECONOCIMIENTO E IDENTIFICACIÓN DE DAÑOS					
NOMBRE DE LA CENTRAL:		El Cóbano			
LOCALIZACIÓN:		Gabriel Zamora, Michoacán.			
CONCEPTO:	"004"	FORMATO:	1	FECHA:	13/09/2018
DESCRIPCIÓN DEL DAÑO:		Desprendimiento del recubrimiento en el bordo libre.			
IMAGEN DEL DAÑO			CROQUIS DE UBICACIÓN		
					

Tabla 5.3 Reconocimiento e identificación de daños.

Fuente: Propia.

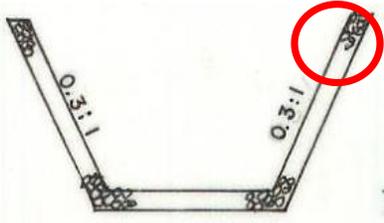
RECONOCIMIENTO E IDENTIFICACIÓN DE DAÑOS					
NOMBRE DE LA CENTRAL:		El Cóbano			
LOCALIZACIÓN:		Gabriel Zamora, Michoacán.			
CONCEPTO:	"004"	FORMATO:	1	FECHA:	13/09/2018
DESCRIPCIÓN DEL DAÑO:		Desprendimiento del recubrimiento en el bordo libre			
IMAGEN DEL DAÑO			CROQUIS DE UBICACIÓN		
					

Tabla 5.4 Reconocimiento e identificación de daños.

Fuente: Propia.

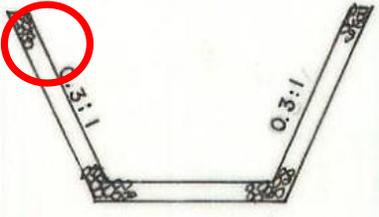
RECONOCIMIENTO E IDENTIFICACIÓN DE DAÑOS					
NOMBRE DE LA CENTRAL:		El Cóbano			
LOCALIZACIÓN:		Gabriel Zamora, Michoacán.			
CONCEPTO:	"008"	FORMATO:	1	FECHA:	13/09/2018
DESCRIPCIÓN DEL DAÑO:		Crecimiento de vegetación en las paredes el canal.			
CROQUIS DE LOCALIZACIÓN			CROQUIS DE UBICACIÓN		
					

Tabla 5.5 Reconocimiento e identificación de daños.

Fuente: Propia.

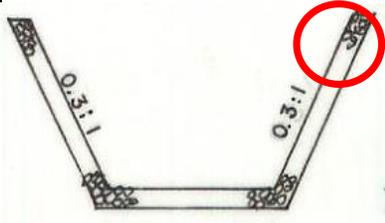
RECONOCIMIENTO E IDENTIFICACIÓN DE DAÑOS					
NOMBRE DE LA CENTRAL:		El Cóbano			
LOCALIZACIÓN:		Gabriel Zamora, Michoacán.			
CONCEPTO:	"007"	FORMATO:	1	FECHA:	13/09/2018
DESCRIPCIÓN DEL DAÑO:		Socavación en las paredes.			
CROQUIS DE LOCALIZACIÓN			CROQUIS DE UBICACIÓN		
					

Tabla 5.6 Reconocimiento e identificación de daños.

Fuente: Propia.

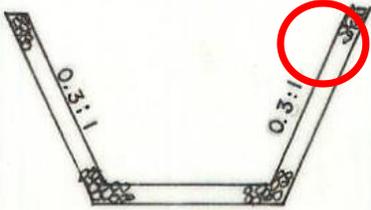
RECONOCIMIENTO E IDENTIFICACIÓN DE DAÑOS					
NOMBRE DE LA CENTRAL:		El Cóbano			
LOCALIZACIÓN:		Gabriel Zamora, Michoacán.			
CONCEPTO:	"007"	FORMATO:	1	FECHA:	13/09/2018
DESCRIPCIÓN DEL DAÑO:		Socavación en las paredes.			
CROQUIS DE LOCALIZACIÓN			CROQUIS DE UBICACIÓN		
					

Tabla 5.7 Reconocimiento e identificación de daños.

Fuente: Propia.

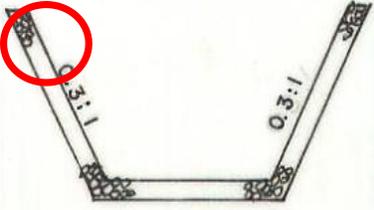
RECONOCIMIENTO E IDENTIFICACIÓN DE DAÑOS					
NOMBRE DE LA CENTRAL:		El Cóbano			
LOCALIZACIÓN:		Gabriel Zamora, Michoacán.			
CONCEPTO:	"004"	FORMATO:	1	FECHA:	13/09/2018
DESCRIPCIÓN DEL DAÑO:		Desprendimiento del recubrimiento en el bordo libre.			
CROQUIS DE LOCALIZACIÓN			CROQUIS DE UBICACIÓN		
					

Tabla 5.8 Reconocimiento e identificación de daños.

Fuente: Propia.

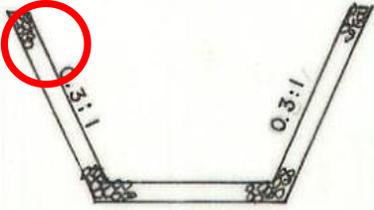
RECONOCIMIENTO E IDENTIFICACIÓN DE DAÑOS					
NOMBRE DE LA CENTRAL:		El Cóbano			
LOCALIZACIÓN:		Gabriel Zamora, Michoacán.			
CONCEPTO:	"004"	FORMATO:	1	FECHA:	13/09/2018
DESCRIPCIÓN DEL DAÑO:		Desprendimiento del recubrimiento en el bordo libre.			
CROQUIS DE LOCALIZACIÓN			CROQUIS DE UBICACIÓN		
					

Tabla 5.9 Reconocimiento e identificación de daños.

Fuente: Propia.

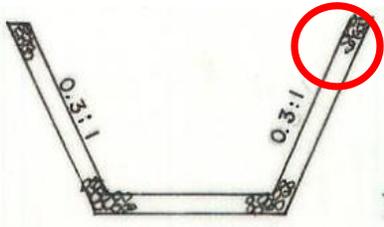
RECONOCIMIENTO E IDENTIFICACIÓN DE DAÑOS					
NOMBRE DE LA CENTRAL:		El Cóbano			
LOCALIZACIÓN:		Gabriel Zamora, Michoacán.			
CONCEPTO:	"008"	FORMATO:	1	FECHA:	13/09/2018
DESCRIPCIÓN DEL DAÑO:		Crecimiento de vegetación en las paredes el canal.			
CROQUIS DE LOCALIZACIÓN			CROQUIS DE UBICACIÓN		
					

Tabla 5.10 Reconocimiento e identificación de daños.

Fuente: Propia.

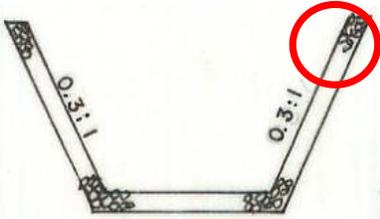
RECONOCIMIENTO E IDENTIFICACIÓN DE DAÑOS					
NOMBRE DE LA CENTRAL:		El Cóbano			
LOCALIZACIÓN:		Gabriel Zamora, Michoacán.			
CONCEPTO:	"008"	FORMATO:	1	FECHA:	13/09/2018
DESCRIPCIÓN DEL DAÑO:		Crecimiento de vegetación en las paredes el canal.			
CROQUIS DE LOCALIZACIÓN			CROQUIS DE UBICACIÓN		
					

Tabla 5.11 Reconocimiento e identificación de daños.

Fuente: Propia.

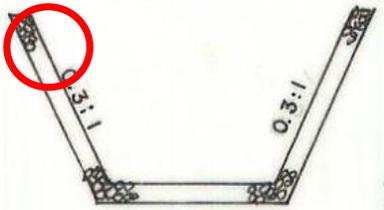
RECONOCIMIENTO E IDENTIFICACIÓN DE DAÑOS					
NOMBRE DE LA CENTRAL:		El Cóbano			
LOCALIZACIÓN:		Gabriel Zamora, Michoacán.			
CONCEPTO:	"004"	FORMATO:	1	FECHA:	13/09/2018
DESCRIPCIÓN DEL DAÑO:		Desprendimiento del recubrimiento en el bordo libre, quedando a la vista la mampostería.			
CROQUIS DE LOCALIZACIÓN			CROQUIS DE UBICACIÓN		
					

Tabla 5.12 Reconocimiento e identificación de daños.

Fuente: Propia.

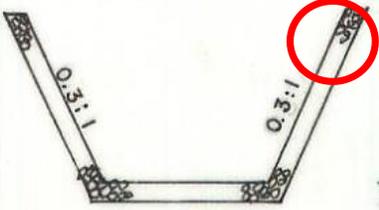
RECONOCIMIENTO E IDENTIFICACIÓN DE DAÑOS					
NOMBRE DE LA CENTRAL:		El Cóbano			
LOCALIZACIÓN:		Gabriel Zamora, Michoacán.			
CONCEPTO:	"001"	FORMATO:	1	FECHA:	13/09/2018
DESCRIPCIÓN DEL DAÑO:		Agrietamiento del revestimiento.			
CROQUIS DE LOCALIZACIÓN			CROQUIS DE UBICACIÓN		
					

Tabla 5.13 Reconocimiento e identificación de daños.

Fuente: Propia.

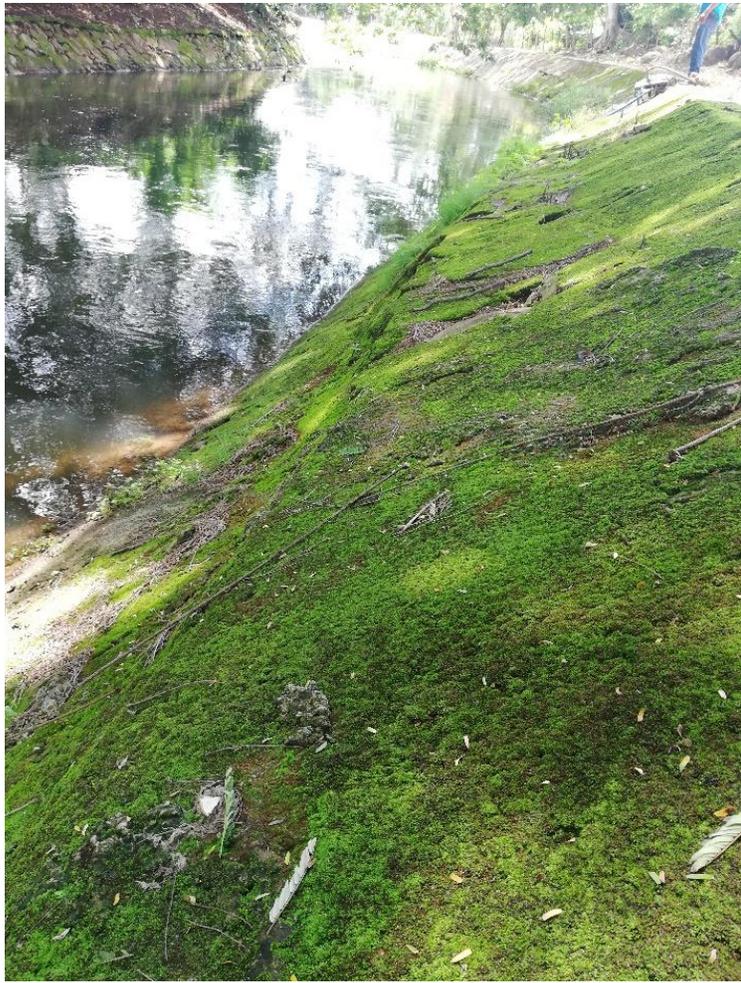
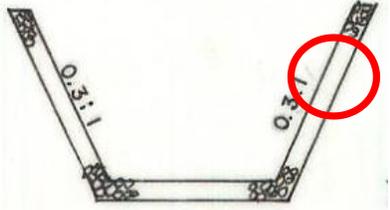
RECONOCIMIENTO E IDENTIFICACIÓN DE DAÑOS					
NOMBRE DE LA CENTRAL:		El Cóbano			
LOCALIZACIÓN:		Gabriel Zamora, Michoacán.			
CONCEPTO:	"003"	FORMATO:	1	FECHA:	13/09/2018
DESCRIPCIÓN DEL DAÑO:		Brote del muro en la margen derecha.			
CROQUIS DE LOCALIZACIÓN			CROQUIS DE UBICACIÓN		
					

Tabla 5.14 Reconocimiento e identificación de daños.

Fuente: Propia.

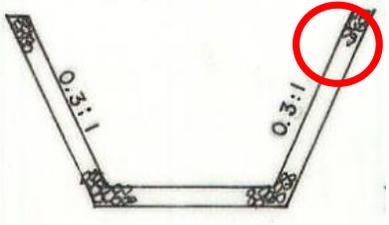
RECONOCIMIENTO E IDENTIFICACIÓN DE DAÑOS					
NOMBRE DE LA CENTRAL:		El Cóbano			
LOCALIZACIÓN:		Gabriel Zamora, Michoacán.			
CONCEPTO:	"003"	FORMATO:	1	FECHA:	13/09/2018
DESCRIPCIÓN DEL DAÑO:		Brote del muro en la margen derecha.			
CROQUIS DE LOCALIZACIÓN			CROQUIS DE UBICACIÓN		
					

Tabla 5.15 Reconocimiento e identificación de daños.

Fuente: Propia.

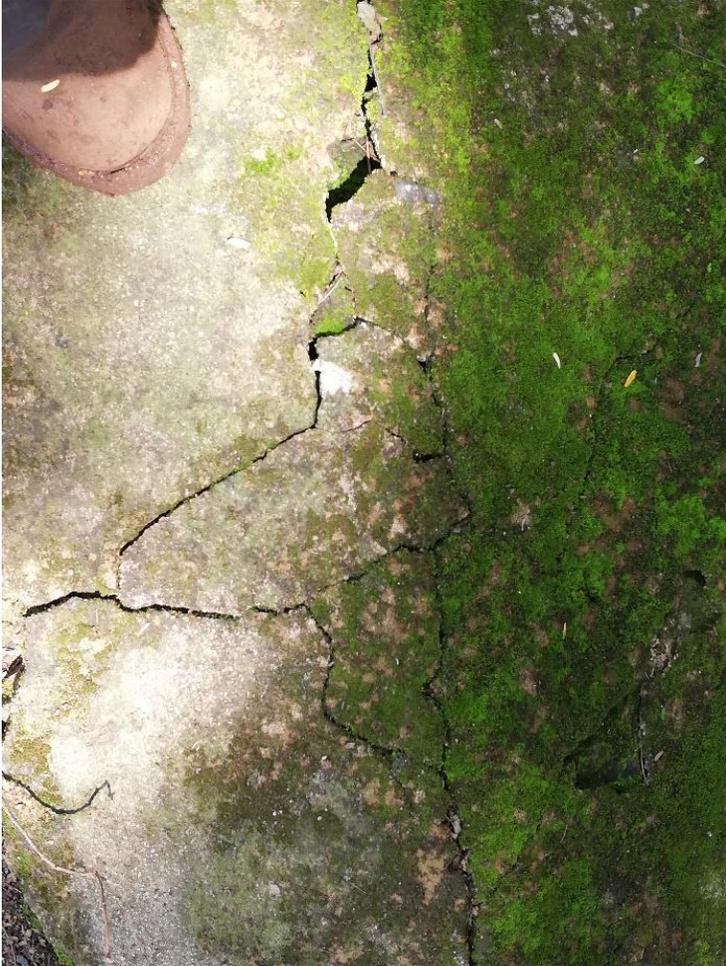
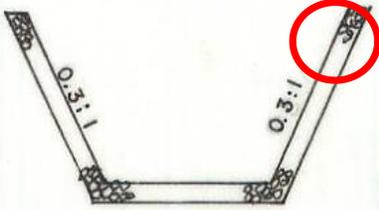
RECONOCIMIENTO E IDENTIFICACIÓN DE DAÑOS					
NOMBRE DE LA CENTRAL:		El Cóbano			
LOCALIZACIÓN:		Gabriel Zamora, Michoacán.			
CONCEPTO:	"001"	FORMATO:	1	FECHA:	13/09/2018
DESCRIPCIÓN DEL DAÑO:		Agrietamiento en el revestimiento.			
CROQUIS DE LOCALIZACIÓN			CROQUIS DE UBICACIÓN		
					

Tabla 5.16 Reconocimiento e identificación de daños.

Fuente: Propia.

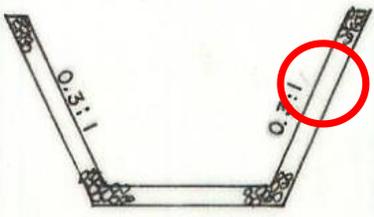
RECONOCIMIENTO E IDENTIFICACIÓN DE DAÑOS					
NOMBRE DE LA CENTRAL:		El Cóbano			
LOCALIZACIÓN:		Gabriel Zamora, Michoacán.			
CONCEPTO:	"003"	FORMATO:	1	FECHA:	13/09/2018
DESCRIPCIÓN DEL DAÑO:		Brote del muro en la margen derecha.			
CROQUIS DE LOCALIZACIÓN			CROQUIS DE UBICACIÓN		
					

Tabla 5.17 Reconocimiento e identificación de daños.

Fuente: Propia.

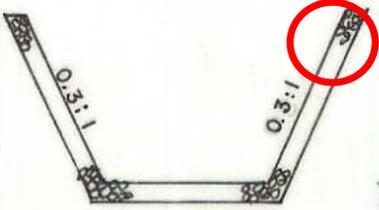
RECONOCIMIENTO E IDENTIFICACIÓN DE DAÑOS					
NOMBRE DE LA CENTRAL:		El Cóbano			
LOCALIZACIÓN:		Gabriel Zamora, Michoacán.			
CONCEPTO:	"007"	FORMATO:	1	FECHA:	13/09/2018
DESCRIPCIÓN DEL DAÑO:		Socavación en las paredes.			
CROQUIS DE LOCALIZACIÓN			CROQUIS DE UBICACIÓN		
					

Tabla 5.18 Reconocimiento e identificación de daños.

Fuente: Propia.

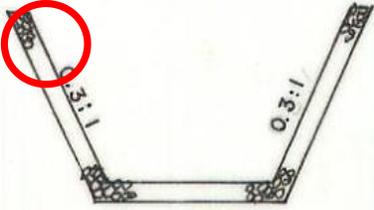
RECONOCIMIENTO E IDENTIFICACIÓN DE DAÑOS					
NOMBRE DE LA CENTRAL:		El Cóbano			
LOCALIZACIÓN:		Gabriel Zamora, Michoacán.			
CONCEPTO:	"001"	FORMATO:	1	FECHA:	13/09/2018
DESCRIPCIÓN DEL DAÑO:		Agrietamiento del revestimiento.			
CROQUIS DE LOCALIZACIÓN			CROQUIS DE UBICACIÓN		
					

Tabla 5.19 Reconocimiento e identificación de daños.

Fuente: Propia.

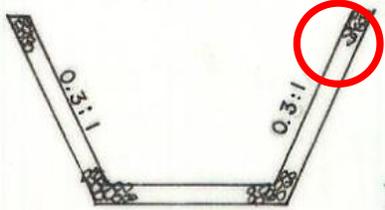
RECONOCIMIENTO E IDENTIFICACIÓN DE DAÑOS					
NOMBRE DE LA CENTRAL:		El Cóbano			
LOCALIZACIÓN:		Gabriel Zamora, Michoacán.			
CONCEPTO:	"007"	FORMATO:	1	FECHA:	13/09/2018
DESCRIPCIÓN DEL DAÑO:		Socavación en el bordo libre.			
CROQUIS DE LOCALIZACIÓN			CROQUIS DE UBICACIÓN		
					

Tabla 5.20 Reconocimiento e identificación de daños.

Fuente: Propia.

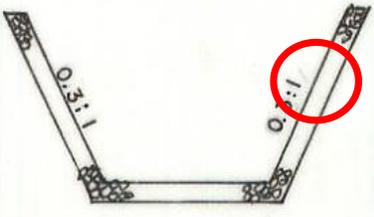
RECONOCIMIENTO E IDENTIFICACIÓN DE DAÑOS					
NOMBRE DE LA CENTRAL:		El Cóbano			
LOCALIZACIÓN:		Gabriel Zamora, Michoacán.			
CONCEPTO:	"008"	FORMATO:	1	FECHA:	13/09/2018
DESCRIPCIÓN DEL DAÑO:		Crecimiento de vegetación en el inicio del bordo libre.			
CROQUIS DE LOCALIZACIÓN			CROQUIS DE UBICACIÓN		
					

Tabla 5.21 Reconocimiento e identificación de daños.

Fuente: Propia.

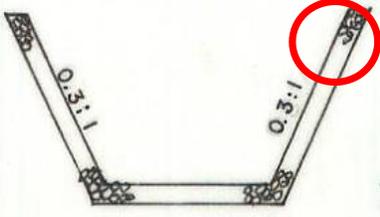
RECONOCIMIENTO E IDENTIFICACIÓN DE DAÑOS					
NOMBRE DE LA CENTRAL:		El Cóbano			
LOCALIZACIÓN:		Gabriel Zamora, Michoacán.			
CONCEPTO:	"008"	FORMATO:	1	FECHA:	13/09/2018
DESCRIPCIÓN DEL DAÑO:		Sobrecrecimiento de "cola de zorra" en el margen derecho del canal			
CROQUIS DE LOCALIZACIÓN			CROQUIS DE UBICACIÓN		
					

Tabla 5.22 Reconocimiento e identificación de daños.

Fuente: Propia.

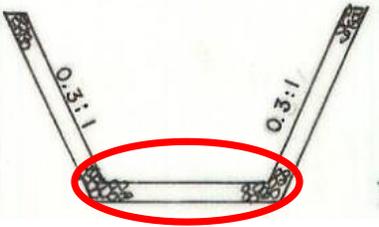
RECONOCIMIENTO E IDENTIFICACIÓN DE DAÑOS					
NOMBRE DE LA CENTRAL:		El Cóbano			
LOCALIZACIÓN:		Gabriel Zamora, Michoacán.			
CONCEPTO:	"008"	FORMATO:	1	FECHA:	13/09/2018
DESCRIPCIÓN DEL DAÑO:		Crecimiento de "cola de zorra" en la plantilla del canal.			
CROQUIS DE LOCALIZACIÓN			CROQUIS DE UBICACIÓN		
					

Tabla 5.23 Reconocimiento e identificación de daños.

Fuente: Propia.

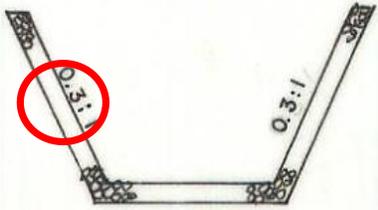
RECONOCIMIENTO E IDENTIFICACIÓN DE DAÑOS					
NOMBRE DE LA CENTRAL:		El Cóbano			
LOCALIZACIÓN:		Gabriel Zamora, Michoacán.			
CONCEPTO:	"007"	FORMATO:	1	FECHA:	13/09/2018
DESCRIPCIÓN DEL DAÑO:		Socavación en las paredes.			
CROQUIS DE LOCALIZACIÓN			CROQUIS DE UBICACIÓN		
					

Tabla 5.24 Reconocimiento e identificación de daños.

Fuente: Propia.

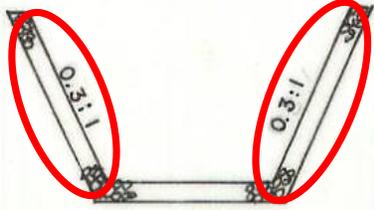
RECONOCIMIENTO E IDENTIFICACIÓN DE DAÑOS					
NOMBRE DE LA CENTRAL:		El Cóbano			
LOCALIZACIÓN:		Gabriel Zamora, Michoacán.			
CONCEPTO:	"008"	FORMATO:	1	FECHA:	13/09/2018
DESCRIPCIÓN DEL DAÑO:		Crecimiento de "cola de zorra" de en las paredes del canal.			
CROQUIS DE LOCALIZACIÓN			CROQUIS DE UBICACIÓN		
					

Tabla 5.25 Reconocimiento e identificación de daños.

Fuente: Propia.

5.3. Aforo.

Para realizar el aforo de este tramo de canal se utilizó un molinete hidráulico ubicado en El Atuto, este dispositivo se introdujo en el agua a diferentes puntos, generalmente se mide a 0,2 y a 0.8 del tirante de agua. En C.F.E., el departamento de hidrometría, se hacen aforos cada 8 días en el canal en tiempo de estiaje, esto para lograr un control más preciso de las variaciones y el comportamiento del caudal. Los aforos para este trabajo fueron proporcionados por la Comisión Federal de Electricidad.

Los datos proporcionados se pueden apreciar en la tabla 5.24, como la velocidad, el área y el gasto, en las fechas y profundidades.

FECHA	PROFUNDIDAD (m)	ÁREA (m ²)	VELOCIDAD (m/s)	GASTO (m ³ /s)	GASTO PPROMEDIO (m ³ /s)
22-feb-18	0.2	12.05	0.797	9.604	9.803
	0.8	12.05	0.830	10.001	
02-mar-18	0.2	11.90	0.790	9.339	9.770
	0.8	11.88	0.859	10.201	
23-abr-18	0.2	14.60	0.611	8.940	9.581
	0.8	14.63	0.699	10.222	

Tabla 5.24 Aforos en El Atuto.

Fuente: propia.

Gracias al promedio de estos 3 aforos se puede apreciar cómo es que el gasto va disminuyendo conforme va pasando el tiempo, ya que las paredes y la plantilla del canal van deteriorándose en mayor magnitud, así como la basura y la vegetación van acumulándose, lo cual hace que el área vaya disminuyéndose, así como la velocidad.

Este tramo del canal corresponde a la sección D del canal, y esta sección está diseñada para un gasto de 14 m³/s, lo cual claramente no se está cumpliendo.

5.4. Cálculo de la velocidad superficial.

Para realizar el cálculo de la velocidad superficial se hizo un estudio de una manera sencilla y práctica teniendo en cuenta que:

$$V = \frac{d}{t}$$

El tramo que comprende del km 8+870.55 al km 9+914.55 se encuentran 4 puentes, en cada uno de ellos se dejó caer un objeto para poder apreciar el tiempo en el que él recorría una distancia igual a 5 metros, se tomaron 3 tiempos con una diferencia de 5 minutos entre ellos para ver si la velocidad variaba con el tiempo, los resultados fueron los siguientes:

- Para el km 8+870.55:

t₁= 5.93 seg.

t₂= 5.04 seg.

t₃= 4.94 seg.

$$V_1 = \frac{5 \text{ m}}{5.93 \text{ s}} = 0.843 \text{ m/s}$$

$$V_2 = \frac{5 \text{ m}}{5.04 \text{ s}} = 0.992 \text{ m/s}$$

$$V_3 = \frac{5 \text{ m}}{4.94 \text{ s}} = 1.012 \text{ m/s}$$

$$V_{t1} = \frac{0.843 \text{ m/s} + 0.992 \text{ m/s} + 1.012 \text{ m/s}}{3} = 0.949 \text{ m/s}$$

- Para el km 8+955.35:

$$t_1 = 7.08 \text{ seg}$$

$$t_2 = 8.40 \text{ seg}$$

$$t_3 = 6.78 \text{ seg}$$

$$V_1 = \frac{5 \text{ m}}{7.08 \text{ s}} = 0.706 \text{ m/s}$$

$$V_2 = \frac{5 \text{ m}}{8.40 \text{ s}} = 0.595 \text{ m/s}$$

$$V_3 = \frac{5 \text{ m}}{6.78 \text{ s}} = 0.737 \text{ m/s}$$

$$V_{t2} = \frac{0.706 \text{ m/s} + 0.532 \text{ m/s} + 0.737 \text{ m/s}}{3} = 0.680 \text{ m/s}$$

- Para el km 9+427.65:

$$t_1 = 5.95 \text{ seg}$$

$$t_2 = 5.90 \text{ seg}$$

$$t_3 = 5.92 \text{ seg}$$

$$V_1 = \frac{5 \text{ m}}{5.95 \text{ s}} = 0.840 \text{ m/s}$$

$$V_2 = \frac{5 \text{ m}}{5.90 \text{ s}} = 0.847 \text{ m/s}$$

$$V_3 = \frac{5 \text{ m}}{5.92 \text{ s}} = 0.845 \text{ m/s}$$

$$V_{t3} = \frac{0.840 \text{ m/s} + 0.847 \text{ m/s} + 0.845 \text{ m/s}}{3} = 0.844 \text{ m/s}$$

- Para el km 9+914.55:

$$t_1 = 5.91 \text{ seg}$$

$$t_2 = 6.45 \text{ seg}$$

$$t_3 = 6.52 \text{ seg}$$

$$V_1 = \frac{5 \text{ m}}{5.91 \text{ s}} = 0.846 \text{ m/s}$$

$$V_2 = \frac{5 \text{ m}}{6.45 \text{ s}} = 0.775 \text{ m/s}$$

$$V_3 = \frac{5 \text{ m}}{6.52 \text{ s}} = 0.767 \text{ m/s}$$

$$V_{t4} = \frac{0.846 \text{ m/s} + 0.775 \text{ m/s} + 0.767 \text{ m/s}}{3} = 0.796 \text{ m/s}$$

De estos resultados se puede concluir que la velocidad superficial promedio para el tramo estudiado es de:

$$V_T = \frac{V_{t1} + V_{t2} + V_{t3} + V_{t4}}{4}$$

$$V_T = \frac{0.949 \text{ m/s} + 0.659 \text{ m/s} + 0.844 \text{ m/s} + 0.796 \text{ m/s}}{4}$$

$$V_T = 0.817 \text{ m/s}$$

Comparando la velocidad superficial con las velocidades en la tabla 5.24, se aprecia que no varía de manera exagerada por lo cual deducimos que el cálculo ha sido correcto.

En el subtema 2.2.1 donde se habla sobre las velocidades máximas y mínimas, Rodríguez (2008) menciona que la velocidad media debe rondar entre 0.61 a 0.91 m/s, así como que para prevenir el crecimiento de vegetación no se debe descender de 0.76 m/s y en este tramo de canal se tiene una velocidad de 0.699 m/s a una altura de 4/5 del tirante de agua. La cual está por debajo de la velocidad recomendada ocasionando que crezca vegetación en el canal.

5.5. Mantenimiento.

- Bombeo autocebante de 3" para achique del interior del canal, para poder efectuar el desazolve.
- Desazolve con excavadora Caterpillar 330 CL o similar en el interior del canal.
- Desazolve con retroexcavadora Caterpillar 416 F o similar.
- Suministro y colocación de concreto lanzado en taludes del canal de conducción.

Incluye:

- Limpieza de la superficie con máquina hidrolimpiadora (3500 psi).
- Armado de refuerzo con malla electrosoldada 6x6-10/10 andada con varilla de 3/8" de diámetro.
- Concreto lanzado en taludes $C_c = 19.62$ Mpa y 5 cm. De espesor.
- Suministro y colocación de concreto en plantilla del canal de conducción. Incluye:
 - Limpieza de la superficie con máquina hidrolimpiadora (3500 psi).

- Armado de refuerzo con malla eledrosoldada 6x6-10/10 andada con varilla de 3/8" de diámetro.
- Concreto simple en plantilla $f''c = 19.62$ Mpa y 8 cm. De espesor.

5.7. Programa de obra.

Un programa de obras es necesario dentro de cualquier mantenimiento ya que así se da un orden y marca los tiempos de la obra, realizando una calendarización con fechas de los trabajos, las cuales deben ser cumplidas a lo largo de la obra para tener un avance óptimo y no generar algún costo extra y finalizar en los tiempos previstos.

Mantenimiento del canal "Central hidroeléctrica El Cóbano" de km 8+870.55 al 9+914.55																															
Programa de Obra																															
No.	Descripción	Días de calendario de Obra																													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	
1	Desazolve manual del canal de conducción del cadenamiento 8+870.55 al 9+914.55; Incluye la extracción de escombros producto del retiro de aplanado suelto y mal adherido a los muros del canal.	[Redacted]																													
2	Extracción del agua del interior del canal de conducción con bomba sumergible para lodos de 3" en la descarga y ataguía a base de costalera rellena con arena y descarga del agua a una distancia máxima de 20 m.	[Redacted]																													

9	Limpieza a detalle en plantilla con medios naturales e hidrolavadora de al menos 3500 Psi.									
10	Suministro, habilitado y colocación de malla electrosoldada en plantilla 6x6 10-10									

Con base a los resultados obtenidos en esta etapa se puede deducir que el canal presenta fallas en su estructura, como son azolve, agrietamiento, socavación, desprendimiento, erosión en sus paredes como en la platilla, lo que genera filtraciones de agua al suelo, también presenta el crecimiento de vegetación en paredes, así como la planta comúnmente llamada cola de zorra, que ocasionan pérdidas en la velocidad del agua.

Todos estos problemas generan que el canal se vuelva cada vez menos eficiente y que sus pérdidas de agua por filtraciones y pérdidas de velocidad vuelvan al canal costoso para la C.F.E.

CONCLUSIÓN

Dentro de la presente investigación el objetivo general fue “Revisar del km 8+300 al 9+400 del canal de conducción que alimenta a la Central Hidroeléctrica “El Cóbano” para conocer si está en óptimas condiciones para su correcto funcionamiento. Así como proponer un mantenimiento para éste”. La inspección del tramo se hizo en base al Manual de Mantenimiento de Obras civiles de la C.F.E. (Comisión Federal de Electricidad), y así llegó a conocer las condiciones en las que trabaja el tramo de dicho canal, por lo cual, si se cumplió ese objetivo, así como el proponer un mantenimiento correctivo.

Después del objetivo general se tienen una serie de objetivos específicos, los cuales son:

Detectar las áreas con mayor deterioro, así como medir el nivel de daño generado en esas zonas. De lo cual si se pudo detectar las áreas con el mayor daño, que son las áreas donde existe socavación, gracias a la inspección visual, así se concluye que si se cumplió el objetivo.

Indicar la importancia que tiene la inspección y evaluación de las obras de conducción. Gracias a los resultados obtenidos se ve reflejado cuán importante es el inspeccionar y evaluar los daños que sufre la estructura, ya que la Central Hidroeléctrica requiere un gasto y una velocidad específica para la producción de energía eléctrica y al presentar deterioro el canal ocasiona que existan pérdidas del flujo del agua, volviendo menos eficiente la planta. Por lo que se concluye que este objetivo se si logró.

Verificar si las condiciones en las que se encuentra el canal son las adecuadas para la velocidad del caudal que corre por él. Se cumplió el objetivo al revisar la velocidad con el molinete y la velocidad superficial, las condiciones del canal provocan que la velocidad se vea disminuida.

Verificar si las condiciones en las que se encuentra el canal son las adecuadas para el gasto que corre por él. Se verificó el canal, realizando los cálculos correspondientes para el gasto, y ya que el canal está diseñado para llevar un gasto de 14 m³/s y actualmente lleva un gasto de 9.77 m³/s, se concluye que las condiciones en las que trabaja dicho tramo no son las adecuadas, porque por las fallas, el agua se filtra al suelo, la vegetación ocasiona la reducción del área del canal. Así que el objetivo se cumplió.

Proponer un mantenimiento preventivo o correctivo que sea efectivo para la mejora de las secciones que se encuentren afectadas, según sea el caso. Se llegó a la conclusión de que el mantenimiento que necesita el canal es de carácter correctivo, ya que la socavación, el desprendimiento de revestimiento, entre otros, no son problemas que se puedan prevenir, puesto que ya existen y en gran magnitud en el canal. Al proponerse un mantenimiento para la solución de los problemas, se logró cumplir el objetivo.

Indicar la importancia de la realización de mantenimientos y actividades de conservación. Puesto que para que un canal trabaja en condiciones favorables, también éste debe estar en condiciones favorables, esto se logra manteniendo el canal en buen estado, realizando mantenimientos preventivos rutinarios se disminuye

el riesgo de tener fallas en el canal que disminuyan la producción y por ende las pérdidas monetarias sean significativas.

Para este trabajo se realizó una pregunta de investigación, que es: ¿Qué pasaría si no se realizara un mantenimiento del canal de la Central Hidroeléctrica El Cóbano? Al no realizarse actividades de mantenimiento en las obras de conducción éstas empiezan a deteriorarse, ya sea por el constante flujo de agua, por la maleza acuática que se encuentra en la plantilla del mismo o por la vegetación en ambas márgenes, disminuyendo tanto la producción de la energía eléctrica y como el rendimiento original para el cual ese canal fue diseñado el canal, además exponiendo la estructura a sufrir mayores daños.

Sin embargo, cuando en las estructuras se realizan con mayor frecuencia mantenimientos y actividades de conservación, la incertidumbre de que ocurra una falla disminuye y así el canal tiende a mantener las características físicas aproximadas a las del proyecto y del diseño original funcionando así en excelentes condiciones.

Con base a la investigación, se ha observado que para la realización de una inspección de un canal que pertenece a la Comisión Federal de Electricidad, es de suma importancia apegarse al Manual de Mantenimiento de Obras Civiles: Sistemas de Conducción, que fue elaborado por la misma C.F.E. Dado a estos manuales se corroboró que la mejor manera para revisarlo es seguir los lineamientos de la empresa.

BIBLIOGRAFÍA

Chow, Ven Te. (1994)

Hidráulica de Canales Abiertos.

Ed. Mc Graw Hill. Colombia.

Comisión Federal de Electricidad. (1993)

Manual de Mantenimiento de Obras Civiles. Sistemas de Conducción.

Departamento de Comportamientos de Estructuras. México.

García Palacios, Jaime. (2013)

Seminario de modelos hidráulicos.

Universidad Politécnica de Madrid. España.

Gardea Villegas, Humberto. (1994)

Hidráulica de Canales.

Facultad de Ingeniería UNAM. México.

Hernández Sampieri, Roberto y Colaboradores. (2010)

Metodología de la investigación.

Ed. Mc Graw Hill. México.

INEGI. (2009)

Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos,
Gabriel Zamora, Michoacán de Ocampo.

México.

Levi Tattes, Enzo. (1996)

Tratado Elemental de la Hidráulica.

Instituto Mexicano de la Tecnología del Agua. México.

Mendieta Ramírez, Angélica. (2005)

Diseño de la investigación.

Ed. Ediciones La Biblioteca. México.

Rodríguez Ruiz, Pedro. (2008)

Hidráulica II.

México.

Simon, Andrew L. (1983)

Hidráulica Básica

Ed. Limusa. México.

Sotelo Ávila, Gilberto. (1997)

Hidráulica General Vol. 1.

Ed. Limusa. México.

Sotelo Ávila, Gilberto. (2002)

Hidráulica de Canales.

Facultad de Ingeniería UNAM. México.

Tamayo y Tamayo, Mario. (2003)

El proceso de la investigación científica.

Ed. Limusa. México.

Trejo Pérez, Octavio. (1975)

Hidráulica.

Instituto Politécnico Nacional. México.

Valiente Barderas, Antonio. (2016)

Ingeniería de Fluidos.

Universidad Nacional Autónoma de México. México.

Villón Béjar, Máximo Gerardo. (2008)

Hidráulica de Canales.

Ed. Villón. Perú.

OTRA FUENTES DE INFORMACIÓN

http://ponce.sdsu.edu/canales/hidraulica_de_canales_01.html

<https://didactalia.net/comunidad/materiaeducativo/recurso/mapa-de-los-estados-de-mexico/72b4395c-d36b-4f37-a61a-07b15d5ef2f6>

<https://mapasinteractivos.didactalia.net/comunidad/mapasflashinteractivos/recurso/mapa-en-color-de-los-municipios-de-michoacan-de/56f19a2b-3a30-43a5-b7ae-d266fce59684>

ANEXO

