



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Análisis del comportamiento de bolsas
de aire en obras de toma con
conductos de sección circular**

TESIS

Que para obtener el título de

INGENIERA CIVIL

PRESENTA:

MARISOL MEDRANO PONCE

DIRECTOR DE TESIS

DR. ÓSCAR POZOS ESTRADA



CIUDAD UNIVERSITARIA, CIUDAD DE MÉXICO, 2016



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/047/16

Señorita
MARISOL MEDRANO PONCE
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor DR. ÓSCAR POZOS ESTRADA, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

"ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE BOLSAS DE AIRE EN OBRAS DE TOMA CON CONDUCTOS DE SECCIÓN CIRCULAR"

- INTRODUCCIÓN
- I. PRESAS Y SUS COMPONENTES
- II. OBRA DE TOMA
- III. AIRE ATRAPADO EN CONDUCTOS CERRADOS
- IV. ESTUDIO EXPERIMENTAL
- V. CONCLUSIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 24 de mayo de 2016.
EL PRESIDENTE

M.I. GERMÁN LOPEZ RINCÓN

GLR/MTH*gar.



RESUMEN

Las obras de toma en presas son conductos que son conformados por un conjunto de estructuras auxiliares (rejillas, orificios, compuertas y dispositivos de disipación de energía) a través de los cuales se extrae de forma controlada y regulada el agua que se encuentra en el vaso de una presa.

Uno de los inconvenientes que se presentan en los conductos cerrados de las obras de toma, es la presencia de aire atrapado, éste puede causar una serie de problemas, por ejemplo, la disminución de la sección efectiva del paso del agua provocando así el incremento de la pérdida de carga, asimismo puede presentarse el retorno de bolsas de aire debido a la fuerza de flotación. Es por eso, que en esta tesis se presenta un estudio teórico-experimental que tuvo como objetivo analizar el comportamiento del aire en el conducto de una obra de toma, para evaluar la velocidad de remoción de las burbujas y pequeñas bolsas de aire, así como, su volumen con respecto a la pendiente del conducto.

Con el análisis experimental se encontró que las velocidades de remoción obtenidas son similares a las medidas por otros investigadores y que se tiene una correlación entre la pendiente del conducto y la velocidad de remoción de la burbuja o bolsa de aire.



AGRADECIMIENTOS

Ante todo agradezco primeramente a Jehová por permitirme terminar una linda etapa de mi vida y a la persona más linda y maravillosa que puede existir, para ti mamá (Leticia Ponce Hernández) te agradezco inmensamente por tu apoyo incondicional y tus consejos que siempre me has dado, por creer en mí y por estar en cada logro de mi vida, tú eres mi mayor ejemplo de vida, tú me enseñaste a luchar por lo que quiero y a no dejarme derrotar, de ti eh aprendido tantas cualidades, me has hecho una mujer fuerte pero amable teniendo presente mis valores, eres una gran mujer y te agradezco infinitamente tu amor, cariño y comprensión, te amo mamá.

Mi otro gran pilar eres tú, papá (Hipólito Medrano Morales), te agradezco tus consejos siempre alentadores pero con mucho cariño, gracias por confiar en mí, por darme esos regaños tan acertados y por tus palabras sabias que siempre me ayudaron a salir adelante y a tener presente mis metas de vida, eres un gran hombre y siempre te admiraré, te amo papá.

A ambos los amo y les agradezco por siempre estar para mí, estoy muy orgullosa de ser su hija y poder contar con unos padres tan sinceros, cariñosos e incondicionales.

El siguiente agradecimiento es para mi hermano Alejandro, aunque tengas un carácter fuerte, de ti eh aprendido muchas cosas y eres de las personas que siempre me reta por aprender cada día algo nuevo, sé que siempre contare contigo y yo estaré para ti, te quiero mucho.

Le agradezco a mi linda familia, a mi abuelita Toñita por su tierno cariño, amabilidad, y consejos, a mi tía Lucy por ser una mujer que siempre ha salido adelante y me ha apoyado, a mi tía Rosy por su comprensión y ánimos, a mis tíos Antonio y Gabriel por los lindos recuerdos, a mis primas: Miriam por enseñarme siempre a luchar por lo deseo, a Jazmín por tus sabios consejos, a Vanne por darme muchas alegrías y a mi primo Edgar por siempre hacerme reír, a todos les agradezco su lindo apoyo, alegrías y cariño que me dan, los quiero mucho.



Este agradecimiento es en especial, para ti, mi F, te amo infinitamente, tu haz sido parte de este gran esfuerzo, te agradezco por tus enseñanzas, por tu tranquilidad, por tus regaños, por tus consejos, por las alegrías, por tu ternura, amabilidad pero sobre todo por apoyarme, por estar siempre a mi lado y por tu lindo y maravilloso amor que me das, recuerda mi F que *“te lo digo desde el alma, no quiero dejar de pensar en ti, como parte de mí, pensé en echar las raíces y quedarme contigo, eres mi amor eterno mi ángel de la guarda :) :3 <3”*.

A mis amigas (Karen, Yessica y Mónica) por siempre contar con ustedes, por aventuras, travesuras, regaños, cariño y apoyo que siempre me han dado. Las quiero mucho.

El siguiente agradecimiento es para mí Director de Tesis el Dr. Óscar Pozos Estrada por su apoyo y afecto incondicional para la realización de esta Tesis. También agradezco a mis sinodales: Dr. Amado Abel Jiménez Castañeda, Ing. Héctor Alfredo Legorreta Cuevas, M.I. Miguel Ángel Rodríguez Vega y a M.I Rodrigo Takashi Sepulveda Hirose, por su tiempo, comprensión y apoyo durante el proceso de esta Tesis.



ÍNDICE

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	9
OBJETIVO.....	10
CAPÍTULO 1. PRESAS Y SUS COMPONENTES	11
1.1 COMPONENTES DE UNA PRESA	11
1.2 CLASIFICACIÓN DE CORTINAS	13
1.2.1 CORTINAS RIGÍDAS	14
1.2.2 CORTINAS INTERMEDIAS.....	18
1.2.3 CORTINAS FLEXIBLES	18
1.3 ALTURA HIDRÁULICA	21
1.4 FACTORES QUE AFECTAN LA DETERMINACIÓN DEL TIPO DE CORTINA.....	23
1.4.1 CONDICIONES DE SITIO	23
1.4.2 FACTORES HIDRÁULICOS.....	24
CAPÍTULO 2. OBRA DE TOMA	25
2.1 ELEMENTOS QUE CONFORMAN UNA OBRA DE TOMA.....	25
2.1.1 ESTRUCTURA DE ENTRADA	25
2.1.2 CONDUCTOS	27
2.1.3 MECANISMOS DE REGULACIÓN Y EMERGENCIAS.....	28
2.2 DISEÑO DE OBRAS DE TOMA.....	29
2.3 PERDIDAS EN UNA OBRA DE TOMA.....	29
2.3.1 PERDIDAS POR FRICCIÓN	30
2.3.2 PERDIDAS POR ENTRADA	30
2.3.3 PERDIDAS POR REJILLAS	31
2.3.4 PERDIDAS POR SALIDAS	31
2.4 TIPOS DE OBRAS DE TOMA EN CORTINAS	32



2.4.1 OBRA DE TOMA A TRAVÉS DE CORTINA DE CONCRETO	32
2.4.2 OBRA DE TOMA A TRAVÉS DE CORTINA DE TIERRA, O DE TIERRA Y ENROCAMIENTO	33
2.4.3 OBRA DE TOMA A TRAVÉS DE CORTINA DE MATERIALES GRADUADOS	34
2.4.4 OBRA DE TOMA EN TÚNEL	34
CAPÍTULO 3. AIRE ATRAPADO EN CONDUCTOS CERRADOS	37
3.1 CAUSAS POR LA QUE EN CONDUCTOS CERRADOS SE INTRODUCE AIRE	37
3.2 PATRONES DE RÉGIMEN EN UN FLUJO	38
3.2.1 FLUJO ESTRATIFICADO.....	39
3.2.2 FLUJO ANULAR.....	39
3.2.3 FLUJO ONDULAR.....	40
3.2.4 FLUJO CON PEQUEÑAS BURBUJAS DE GAS.....	40
3.2.5 FLUJO CON BURBUJAS DE GAS.....	40
3.2.6 FLUJO CON BOLSAS DE GAS	41
3.3 PROBLEMAS CAUSADOS POR AIRE ATRAPADO EN OBRA DE TOMA.....	41
3.3.1 GOLPE DE ARIETE PROVOCADO POR LA EVACUACIÓN DE AIRE	41
3.3.2 INCREMENTO DE PERDIDA DE CARGA CAUSADO POR AIRE ATRAPADO EN CONDUCTOS CERRADOS	42
3.3.3 RETORNO DE BOLSAS DE AIRE DEBIDO A LA FUERZA DE FLOTACIÓN .	43
3.4 MEDIOS HIDRÁULICOS.....	45
3.4.1 VERONNESE Y LARA	45
3.4.2 KALINSKE Y ROBERTSON	46
3.4.3 KALINSKE Y BLISS	47
3.4.4 KENT	49
3.4.5 GANDENBERGER	50
3.4.6 FALVEY.....	52
3.4.7 ESCARAMEIA	53



3.4. POZOS ET AL	53
CAPÍTULO 4. ESTUDIO EXPERIMENTAL	55
4.1 DISPOSITIVO EXPERIMENTAL.....	55
4.1.1 INSTRUMENTACIÓN ADICIONAL DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL	57
4.2 MEDICIONES DE VELOCIDAD	61
4.3 PROGRAMA TRACKER	62
4.3.1 FUNCIONAMIENTO	63
4.3.2 SEGUIMIENTO MANUAL.....	68
4.3.3 IMPORTACIÓN DE GRÁFICOS, IMÁGENES Y DATOS	73
4.3.4 GUARDAR ARCHIVO	74
4.4 OBTENCIÓN DE LA VELOCIDAD DE LAS BURBUJAS	75
4.5 OBTENCIÓN DE LA VELOCIDAD DE REMOCIÓN	79
4.6 ANALISIS DE RESULTADOS DE LAS BURBUJAS	81
4.7 VOLUMEN DE LAS BURBUJAS.....	83
4.8 CÁLCULO DE LAS FUERZAS DE ARRASTRE, FLOTACIÓN Y GRAVEDAD.....	90
4.9 ANALISIS GENERAL DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL.....	94
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES	97
BIBLIOGRAFÍA	99



INTRODUCCIÓN:

Las obras de toma consisten en una estructura de entrada, conductos, mecanismos de regulación y dispositivos para disipación de energía, cuyo objetivo es el de extraer el agua almacenada en una presa, dicha extracción debe ser de manera controlada y regulada, permitiendo así que su funcionamiento se de en condiciones satisfactorias no importando las circunstancias.

Con lo anterior se observa que los conductos de las obra de toma son elementos primordiales dentro de una presa, por lo que debe cumplir con una seguridad operacional eficaz, en ocasiones, dicha seguridad se puede ver afectada por la presencia de aire en el conducto, provocando así una serie de problemas, tales como, disminución de la sección efectiva del paso del agua generando así el incremento de la pérdida de carga, asimismo puede presentarse el retorno de bolsas de aire debido a la fuerza de flotación. Por otra parte, la combinación de aire-agua puede traer beneficios, como evitar la presión negativa, también esa combinación puede provocar que se presente un golpe de ariete cuando se desee evacuar el aire del conducto cerrado.

Actualmente no se tiene la información suficiente, para conocer la afectación de la presencia de aire en los conductos cerrados, en ocasiones los diseños, la construcción, la operación y el mantenimiento de los mismos son mal ejecutados, ya que los efectos del aire son subestimados e incluso ignorados.

Debido a lo mencionado anteriormente, esta tesis expondrá el comportamiento del aire en los conductos cerrados de una obra de toma, mediante un estudio teórico-experimental y con ayuda del programa tracker (software de acceso libre).

En los capítulos 1 y 2 se describen los conceptos generales de presas y obra toma. En el capítulo 3 se exponen las causas, los problemas y los medios para remover el aire atrapado en conductos cerrados, en el capítulo 4 se muestra el estudio experimental que se realizó para analizar el comportamiento de las burbujas y pequeñas bolsas de aire en tuberías con pendientes suaves, así como la obtención del volumen y la velocidad de remoción del aire por último, el capítulo 5 contiene las conclusiones.

**OBJETIVO:**

Analizar el comportamiento del movimiento del aire (burbujas y pequeñas bolsas de aire) en conductos de sección circular con pendientes suaves, utilizando un dispositivo experimental y un programa de cómputo de acceso libre (TRACKER), para comparar los resultados obtenidos con los de otros autores.

CAPÍTULO 1. PRESAS

Una presa es una obra artificial colocada en el cauce de un río para modificar su funcionamiento hidráulico, ya sea para almacenar agua, para proporcionar carga hidráulica (tirante) o simplemente para regular la forma del escurrimiento (Murillo, 2012).

Esto se logra mediante un conjunto de estructuras que son diseñadas con amplios criterios y los cuales son enlistados y mostrados posteriormente en la figura 1.1.

1. Vaso
2. Cortina
3. Obra de excedencias
4. Obra de toma

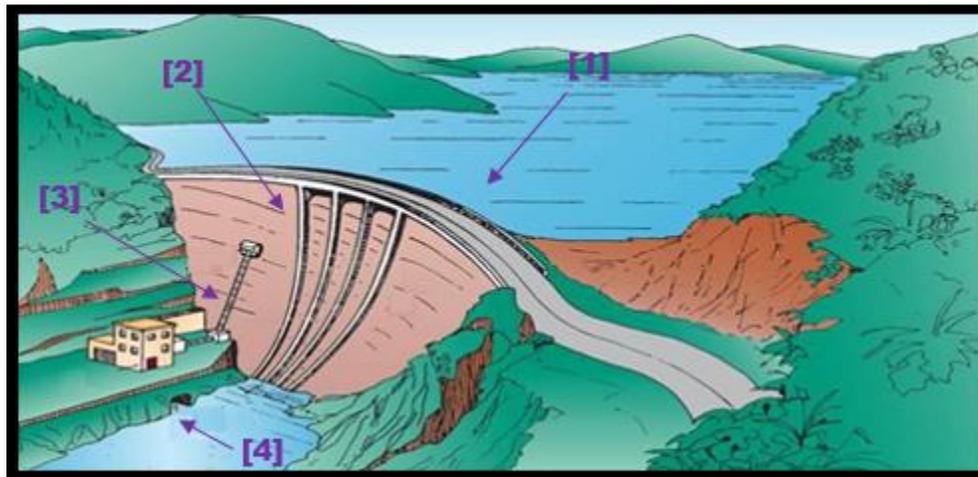


Figura 1.1 Elementos de una presa.

1.1 COMPONENTES DE UNA PRESA

La descripción de los componentes de las presas que se describe a continuación se basa en Torres H, (1990):

VASO. El vaso es la parte del valle que contiene lo almacenado, por lo tanto son volúmenes de agua retenidos



CORTINA. La cortina es un elemento fundamental de una presa, ya que es una estructura que obstaculiza el flujo del río, por lo tanto debe cumplir condiciones de estabilidad e impermeabilidad.

OBRA DE EXCEDENCIAS. Son elementos muy importantes dado que tienen como función desalojar los volúmenes excedentes de agua que se presentan en el vaso, esto haciéndolo de una manera controlada y segura. Novak, P. (2001) clasifica las obras de excedencias de la siguiente forma:

- ❖ Vertedor de caída libre
- ❖ Vertedor en caída rápida
- ❖ Vertedor de abanico
- ❖ Vertedor en canal
- ❖ Vertedor de canal lateral
- ❖ Vertedor de pozo o embudo
- ❖ Vertedor en túnel
- ❖ Sifones vertedores

OBRA DE TOMA. Es un conducto a través del cual se extrae agua de forma controlada, para permitir condiciones satisfactorias de flujo, eficiente control y regulación de las extracciones en cualesquiera circunstancias.

El diseño de la obra de toma varía de acuerdo a las condiciones geológicas y topográficas, los tipos y dimensiones de las cortinas, así como de las variaciones de los gastos por extraer.

1.2 CLASIFICACION DE CORTINAS

En la figura 1.2 se muestra la clasificación de cortinas mediante un mapa conceptual y posteriormente se describen brevemente las cortinas que se consideran más relevantes.

Es importante mencionar que existen tres tipos de mampostería:

- 1) Cal y canto
- 2) Mortero empaquetados entre las rocas y
- 3) Concreto.

En la figura 1.2 las siglas CCR significan Concreto hidráulico Compactado con Rodillo.



Figura 1.2 Clasificación de una presa por tipo de cortina.



1.2.1. CORTINAS RÍGIDAS

- *CORTINAS DE GRAVEDAD*. Las cortinas de gravedad tienen una característica particular, dado que son cortinas masivas de concreto o mampostería, su peso propio les permite soportar las fuerzas a las que les son impuestas. En la figura 1.3 se presenta un esquema de una presa a gravedad.

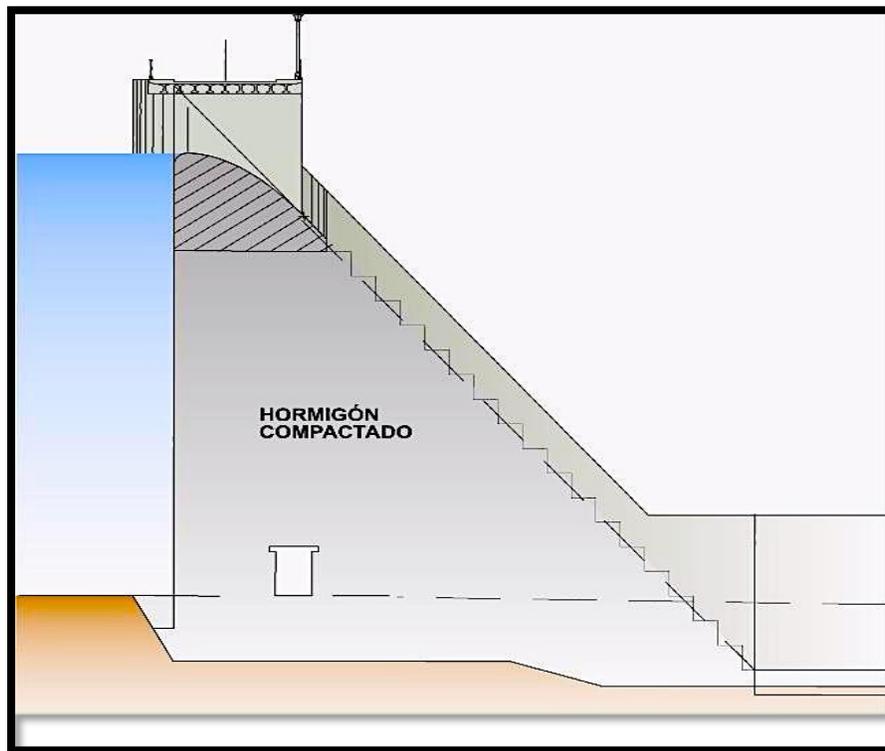


Figura 1.3 Cortina de gravedad.

- *CORTINA DE ARCO*. Son estructuras curvas que pueden ser de concreto o mampostería, y que son desplantadas en lugares donde la altura de las laderas es mayor al ancho del cauce. Su convexidad debe ser orientada hacia aguas arriba ya que así adquiere la mayor parte de su estabilidad al transmitir las fuerzas actuantes a las superficies de la cimentación. Se puede observar un ejemplo de cortina de arco en la figura 1.4.



Figura 1.4 Cortina de arco de la presa Plutarco Elías Calles, Aguascalientes México.

- **CORTINA ARCO-BÓVEDA.** Este tipo de cortina tiene forma de huevo y cuenta con las mismas características de una cortina de arco solo que además posee una curvatura en su sección vertical y otra en su vista en planta, esto permite una utilización más eficiente del concreto, así como una mejor distribución de las fuerzas que actúan sobre ella. Un buen ejemplo de una cortina de arco-bóveda es el de la presa Vajont, (Figura 1.5).



Figura 1.5 Cortina de arco-bóveda de la presa Vajont, Longarone, Italia.



- **CORTINA ARCO-GRAVEDAD.** Las cortinas de arco-gravedad son construidas principalmente en cañones, debido a que su peso es considerable les aportan una mayor estabilidad. En las figuras 1.6 y 1.7 se muestran dos ejemplos de cortinas arco-gravedad.

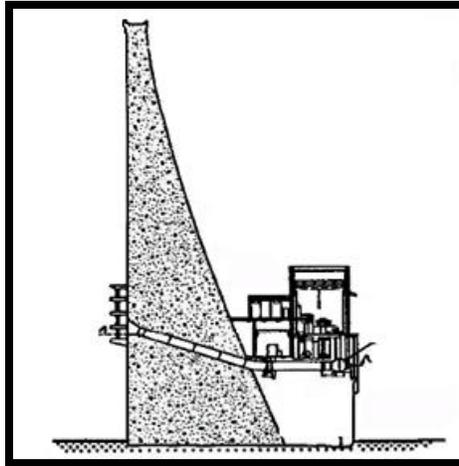


Figura 1.6 Corte transversal de una cortina arco-gravedad.



Figura 1.7 Presa Santa Eulalia, España, cortina arco-gravedad.

- **CORTINAS DE MACHONES O CONTRAFUERTES.** Este tipo de cortinas son más económicas que las de tipo gravedad, debido a que durante su construcción se utiliza menos material, pero lo más destacable de dichas cortinas es que

recibe la fuerza hidrostática mediante una pantalla o muro, los cuales transmiten dicha fuerza al terreno.

Al tomar la decisión de construir una cortina de este tipo se tiene la gran ventaja, de que la presa es capaz de soportar el vertido sobre su corona sin causar daño a la estructura (murillo, 2012).

En cuanto a su construcción como su nombre lo dice está compuesta por dos elementos estructurales, machones y contrafuertes. Los primeros son elementos estructurales que al unirse crean una barrera, la cual impide el paso del cauce y que están sostenidos por elementos perpendicularmente a ellos denominados contrafuertes, su principal función es transmitir el sistema de fuerzas a la cimentación, (ver figuras 1.8 y 1.9).

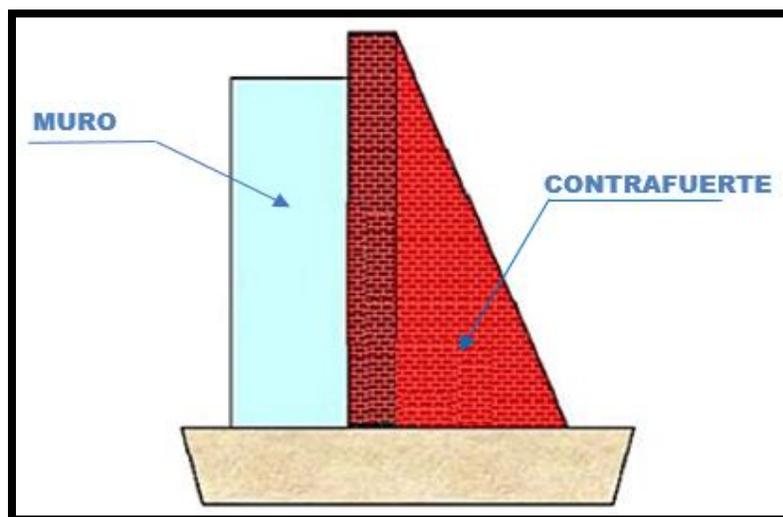


Figura 1.8 Corte transversal de una cortina de machones o contra-fuertes, (Murillo, 2012).

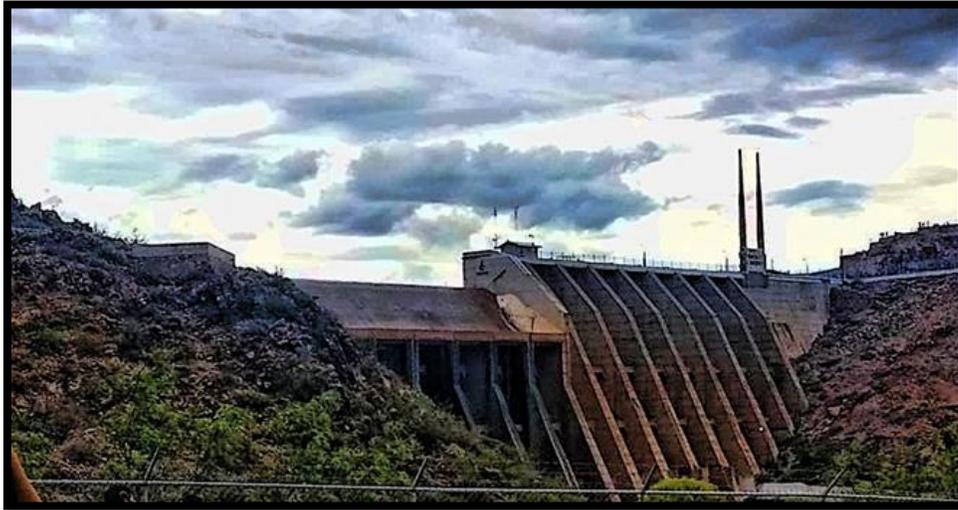


Figura 1.9 Presa “Francisco I. Madero” cortina de contrafuertes, (Chihuahua, México).

1.2.2 CORTINAS INTERMEDIAS

- **CORTINA DE MURO/TERRAPLÉN.** Las cortinas de muro/terraplén combinan un muro rígido ya sea de mampostería o concreto con un respaldo de fragmentos de roca, esto provoca que se tenga una cortina o elemento estructural que en su mayoría pueda trabajar rígidamente y a la vez mediante su cimentación le permite tener una estabilización flexible.

1.2.3 CORTINAS FLEXIBLES

- **CORTINAS DE TIERRA Y ENROCAMIENTO.** Lo distintivo de este tipo de cortinas es su composición interna, ya que pueden estar construidas por roca suelta, grava, arena, limo o arcilla. Una fase importante durante su construcción es la compactación de cada uno de los elementos, promoviendo así una permeabilidad aceptable.
- **CORTINA HOMOGÉNA DE TIERRA.** Esta cortina está formada por capas delgadas de tierra (arcilla y limos) impermeables compactadas y en donde sus

caras o paramentos están protegidas por una capa de enrocamiento, que permite que no sean dañados por el oleaje del cauce, (Figura 1.10).



Figura 1.10 Cortina homogénea de tierra.

- **CORTINA DE ENROCAMIENTO.** Está formada básicamente con fragmentos de roca de diferentes tamaños y su paramento mojado es revestido por una sección impermeable que puede ser de concreto hidráulico, placas de acero o placas de madera, (ver figura 1.11).

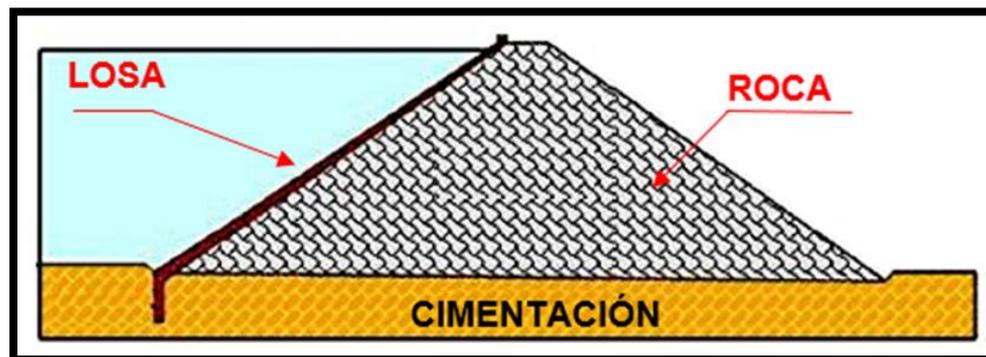


Figura 1.11 Cortina de enrocamiento, (Murillo, 2012).

- **CORTINA DE MATERIALES GRADUADOS.** Las cortinas de materiales graduados están constituidas por secciones, Torres Herrera (1990) comenta que se tiene una zona central o corazón de materiales finos e impermeables, consecutivamente se van



colocando secciones o zonas semipermeables y permeables tanto hacia aguas arriba como aguas abajo partiendo de nuestra zona central hasta llegar a nuestra capa de roca, tal y como se puede observar en la figura 1.12.

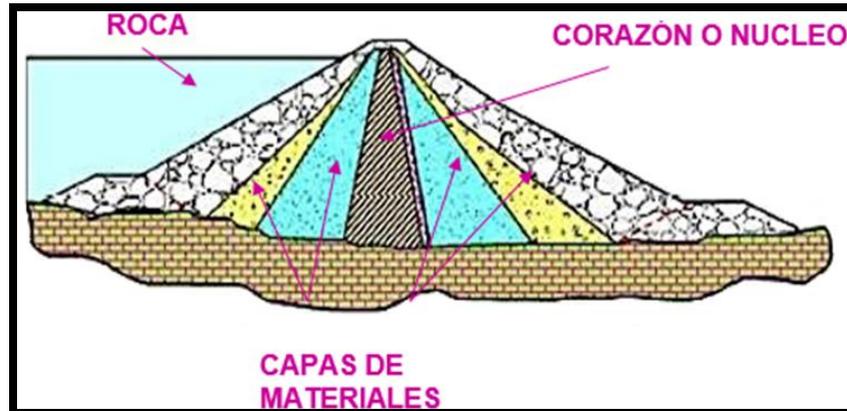


Figura 1.12 Cortina de materiales graduados, (Murillo, 2012).

El tipo de material y la cantidad que se utilicen para su fabricación depende de la disponibilidad de los materiales que se encuentren en la región donde será desplantada la cortina, (torres, 1990).

- CORTINA TIPO INDIO. También conocidas como de cimentación flotante ya que son desplantadas en materiales granulares (arena y grava), su principal objetivo es, la derivación, normalmente son cortinas de pequeña altura y gran longitud, (figura 1.13).



Figura 1.13 Presa tipo indio El Sufragio (Sinaloa, México).

- CORTINA TIPO GAVION. Este tipo de cortinas consta de cajas de alambre galvanizado rellenas con fragmentos de rocas pequeñas, lo cual provoca que sean permeables y que en cuanto a su funcionamiento se tengan grandes deformaciones (ver figura 1.14).

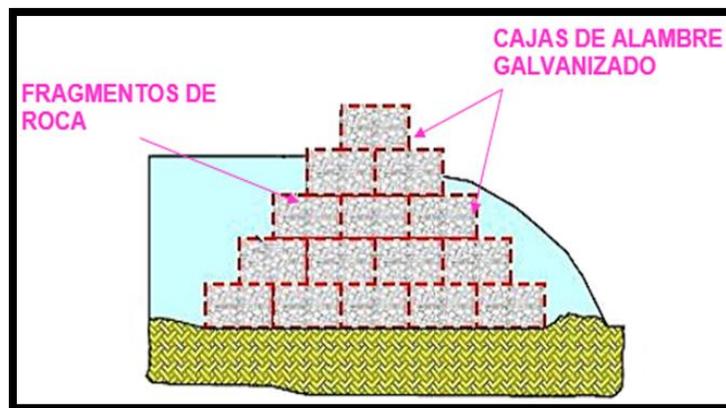


Figura 1.14 Cortina tipo gavión (Murillo, 2012).

1.3 ALTURA HIDRAULICA:

Otra clasificación de cortinas se da mediante la altura hidráulica, Torres Herrera (1990) comenta que la altura hidráulica es la diferencia en la elevación entre el punto más bajo del lecho del río y el nivel más alto en el vaso. Con esta definición se llamará a una cortina alta con una altura mayor a 15 m y una cortina se considerará baja cuando su altura sea menor a la altura descrita anteriormente.

Dicha altura hidráulica se obtiene como la suma de las alturas de las capacidades de azolve más la de aprovechamiento (ecuación 1.1):

$$HH = HCP + HAP + HS + HBL \quad (1.1)$$

DONDE:

H_{CP} = Capacidad para azolves o capacidad muerta (m).

H_{AP} = Capacidad de aprovechamiento (m).

H_S = Capacidad de superalmacenamiento (m).



H_{BL} = Altura correspondiente al bordo libre (m).

De las alturas mencionadas anteriormente se describirá brevemente en qué consiste cada una.

- ❖ Capacidad de azolve o capacidad muerta. Es la altura útil para retener los azolves que lleguen al vaso de la presa y después se sedimenten.
- ❖ Capacidad de aprovechamiento. Es la altura necesaria para satisfacer las demandas de extracción de agua del vaso y de acuerdo con cierta ley establecida es el volumen comprendido entre el Nivel de Aguas Mínimas de Operación (NAMINO) y el Nivel de Aguas Máximas de Operación (NAMO).
- ❖ Capacidad de superalmacenamiento. Es la altura que retiene el volumen para la regulación de avenidas, comúnmente se expresa en millones de m^3 .
- ❖ Altura de bordo libre. Es la magnitud entre el Nivel de Aguas Máximas Extraordinarias (NAME) y la corona de la cortina.

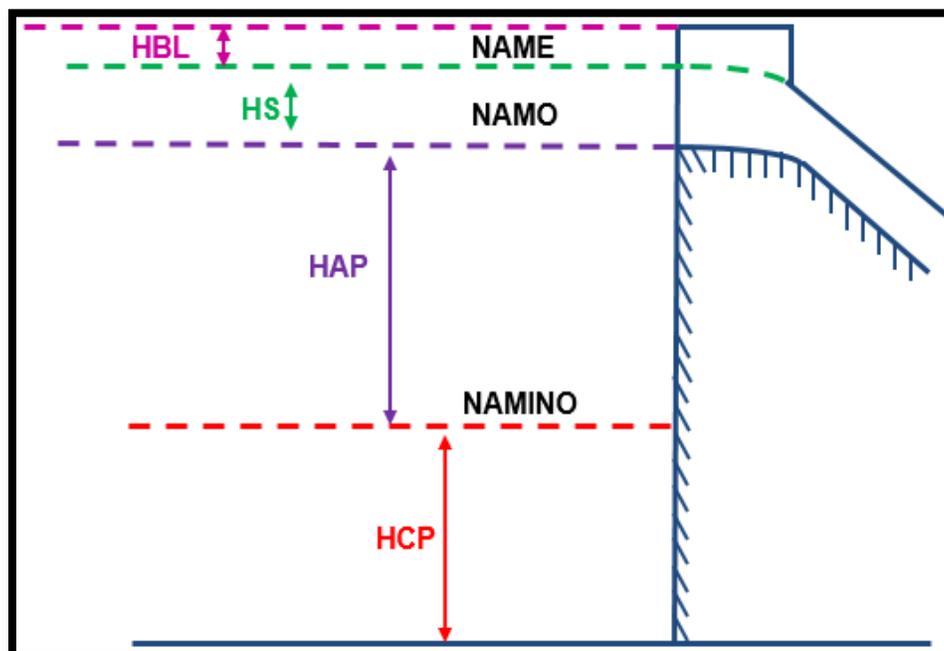


Figura 1.15 Esquema de alturas y niveles hidráulicos, (Torres, 1990).



1.4 FACTORES QUE AFECTAN LA DETERMINACION DEL TIPO DE CORTINA

Para la adecuada determinación del tipo de cortina, se tienen cuatro factores que como se puede observar a continuación:



1.4.1 CONDICIONES DE SITIO

1. CIMENTACIONES. La cimentación en una presa es de vital importancia dado que soporta todo el sistema de fuerzas a las que es expuesta, por lo tanto para tener una eficaz cimentación necesitamos tener en cuenta las siguientes características:

- ❖ Esfuerzos permisibles.
- ❖ Características elásticas.
- ❖ Coeficiente de excavación.
- ❖ Profundidad de excavación.
- ❖ Evaluación de la efectividad.

Además de cumplir con lo anterior debe tener la resistencia necesaria a la infiltración, ya que este fenómeno causa erosión y pérdida del agua almacenada.

Al analizar dichas fuerzas y tener un amplio estudio de los materiales que se encuentran en el sitio a desplantar se obtiene una clasificación de tipos de suelos, las cuales pueden



ser roca, limo-arcilla, grava y arena, teniendo en cuenta que se también se encuentran suelos saturados.

2. TOPOGRAFÍA. Este elemento, al igual que la cimentación, es muy importante, ya que, este estudio nos dirá si es posible ejecutar el proyecto así como el tamaño aproximado del vaso y la localización, al obtener estos datos lograremos tener indirectamente la estimación del gasto y el dimensionamiento de la estructura.
3. MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN. Para obtener las fuentes y tipo de materiales que se tienen tanto en el sitio del desplante como a los alrededores de éste, se realizarán reconocimientos geológicos extensos y rigurosos, buscando con esto la explotación de materiales que sean durables, fuertes y si es posible con características impermeables.

1.4.2 FACTORES HIDRÁULICOS

- OBRAS DE EXCEDENCIAS. Como ya se mencionó anteriormente, son elementos muy importantes, dado que tienen como función desalojar los volúmenes excedentes de agua que se presenta de manera controlada y segura. Los factores para la elección de tipo de obra de excedencias dependerán de las condiciones topográficas y geológicas de la zona.
- OBRAS DE DESVIO. Se realizan este tipo de obras para dejar casi seca la zona donde se desplantará la presa, pueden ser túneles de desviación o canales abiertos. Para poder seleccionar la obra de desvió, dependerá del tipo de cortina, el tipo de obras de excedencias y de toma, además del espacio disponible en la zona donde se colocará la cortina, (Torres Herrera, 1990).
- OBRA DE TOMA. Es un conjunto de estructuras que se realizan o construyen con el objeto de extraer el agua de forma controlada.



CAPITULO 2. OBRA DE TOMA

La obra de toma es un conjunto de estructuras cuyo objetivo es extraer de forma controlada el agua almacenada en una presa y poder utilizarla con el fin para el cual fue proyectado su aprovechamiento.

2.1 ELEMENTOS QUE COMPONEN UNA OBRA DE TOMA

Los elementos que conforman una obra de toma, deben cumplir varios requerimientos, entre ellos, el de regular y conducir el gasto de demanda, tener pérdidas muy pequeñas, evitar la entrada de basura u otros materiales flotantes que puedan dañar la estructura y por último, el de minimizar la sedimentación en la conducción.

A continuación se enlistan los elementos que conforman una obra toma, (Torres, 1990):

1. Estructura de entrada.
2. Conductos.
3. Mecanismos de regulación y emergencia.
4. Dispositivos de disipador de energía (cuando sean requeridos).

Dichos elementos se deben diseñar para cubrir y satisfacer las condiciones del sitio donde se desplantará la presa, porque para obtener las elevaciones y las pendientes es necesario conocer la capacidad requerida, la localización y la elevación del agua en la descarga.

2.1.1 ESTRUCTURA DE ENTRADA

La estructura de entrada es muy importante en una obra de toma, principalmente por los componentes que la constituyen, debido a que éstos evitan la entrada de elementos extraños que puedan dañar tanto las estructuras como los dispositivos que conforman toda la obra de toma.

La estructura de entrada de una obra de toma está conformada por los siguientes elementos (Ver figura 2.1):

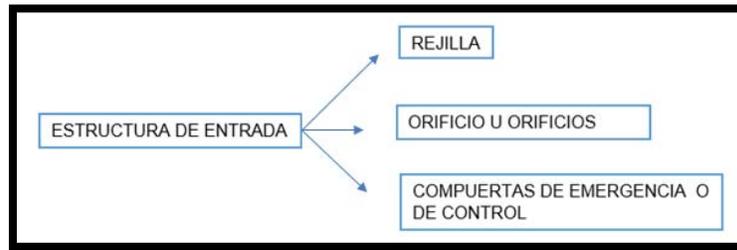


Figura 2.1 Elementos de una estructura de entrada para una obra de toma

- **REJILLAS.** Este elemento estructural tiene como función evitar que los sólidos flotantes atraviesen la estructura de entrada y crucen los diferentes sistemas de conducción, evitando así afectaciones en los mecanismos tales como, válvulas de emergencias, válvulas de servicio, turbinas hidráulicas y bombas, (Torres, 1990). Las rejillas están conformadas por soleras de hierro, las cuales estas apoyadas en viguetas de acero o en vigas de concreto; sus dimensiones generalmente van de 10 cm a 30 cm de ancho por 5 cm a 15 cm de altura, su separación va de 5 cm a 15 cm (siendo este la máxima separación) centro a centro y su longitud puede ser de 4 m a 5 m, tal y como se muestra en la figura 2.2, estas medidas dependerá del tipo de presa y tipo de obra de toma. Otro elemento de la rejilla son los marcos de acero, los cuales se buscan que en caso que se presente una falla, sea primero la rejilla que falle antes que el marco. Las velocidades del flujo a través de las rejillas varían de 1.0 m/s en tomas superficiales hasta 5 m/s en rejillas ubicadas en tomas profundas.

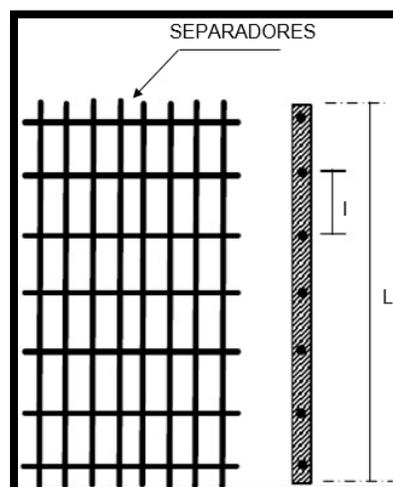


Figura 2.2 Esquema de rejillas (Torres, 1990).



Dónde L es la longitud total de la solera y l es la longitud efectiva para cálculo de la rigidez lateral.

- **ORIFICIO U ORIFICIOS.** A un orificio lo denominamos como la abertura de forma regular la cual se encuentra en una pared y tiene como objetivo el erogar el líquido que se encuentra aguas arriba del mismo.
- **COMPUERTAS DE EMERGENCIA O DE CONTROL.** La función principal de estos dispositivos no solo es desaguar los conductos cuando se presente una emergencia, hay ocasiones que también se requieren para realizar la limpieza de los conductos o para su mantenimiento.

Los mecanismos de control se dividen en dos grupos:

- ❖ **Controles de Regulación:** Son los elementos destinados a regular y controlar el agua de la toma, con el propósito de dosificar los caudales de desfogue. Los mecanismos más utilizados son las válvulas y las compuertas.
- ❖ **Controles de Contingencia o Mantenimiento:** Estos dispositivos tienen como objetivo el operar solo en los casos de emergencia, de inspección y reparación, pueden ser válvulas o compuertas, que operan totalmente abiertas o cerradas.

2.1.2 CONDUCTOS

Los conductos pueden ser túneles o tuberías, o bien, la combinación de ambos.

Tanto el túnel como la tubería pueden trabajar a presión, pero en el caso del túnel, puede también trabajar con flujo a superficie libre.

A largo de su longitud se construyen transiciones y/o un canal de acceso, la primera situación aplica cuando se requieren cambios de tamaño o de forma en las secciones rectas y el canal de llamada se utiliza cuando se desea orientar el flujo de agua desde el vaso hasta el sitio de toma, tal como lo comenta Torres (1990).



La localización de los conductos dependerá del tipo de cortina, cuando se tienen cortinas de concreto los conductos se localizan a través de la misma y en caso de ser túneles serán localizados en las márgenes del río, cuando se tiene una cortina de tierra o de tierra y enrocamiento, los conductos se localizan dentro de trincheras sobre roca sólida.

La descarga de los conductos puede ser directamente al río o a los sistemas de conducción, claro, teniéndose previamente la disipación de la energía cinética del agua.

2.1.3 MECANISMOS DE REGULACIÓN Y EMERGENCIA

Aunque ambos mecanismos van de la mano, se comenzará con los mecanismos de regulación.

Los mecanismos de regulación tienen la finalidad de extraer los gastos que sean necesarios para las diferentes necesidades que se presenten, estos mecanismos son generalmente compuertas o válvulas que pueden trabajar con aperturas totales o parciales.

Mientras que los mecanismos de emergencias como su nombre lo dice, sólo son para ocasiones que se presente alguna falla o cuando se requiera hacer inspección, reparación o mantenimiento. También están conformados por válvulas o compuertas.

Algo importante sobre los mecanismos de emergencias es que su instalación es siempre aguas arriba de los mecanismos de regulación y se conservan abiertos.

Ambos mecanismos se diseñan para la carga máxima y es ideal contar con una ventilación adecuada en los puntos donde las válvulas o compuertas vayan a operar bajo grandes cargas y se puedan presentar presiones negativas o en algunos casos se tenga que dejar salir aire comprimido.



2.2 DISEÑO DE OBRAS DE TOMA

La obra de toma debe ser diseñada para facilitar el vaciado para la cual fue proyectada la presa, es por eso que se deben tener en cuenta los siguientes aspectos de diseño:

- ❖ Determinación de la capacidad de descarga en la estructura de salida.
- ❖ Prevención de la posibilidad de cavitación.
- ❖ Dimensionamiento de un venteo para la entrada de aire.
- ❖ Definición del régimen para diferentes gastos.
- ❖ Dimensionamiento de la estructura terminal.
- ❖ Determinación de las deformaciones del suelo o de la roca en la parte del cauce del río que se encuentra al lado de la estructura terminal.

La capacidad de descarga a través de la salida se determina con la expresión para descarga libre (ecuación 2.1):

$$Q = \mu F \sqrt{2gH_{\max}} \quad (2.1)$$

Donde F es la sección transversal del conducto, g es la aceleración de la gravedad (m/s^2) y μ es está definido por la ecuación 2.2):

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum \xi_1 + \frac{\lambda}{d}}} \quad (2.2)$$

Donde λ es coeficiente de fricción, D es el diámetro del conducto y $\sum \xi_1$ es la sumatoria total de las pérdidas locales.

2.3 PÉRDIDAS EN UNA OBRA DE TOMA

Las pérdidas en una obra de toma no deben ser minimizadas, debido a que tiene un efecto muy importante en nuestra capacidad de carga, por lo tanto a continuación se muestran las pérdidas más comunes que se presentan en una obra de toma.



2.3.1 PÉRDIDAS POR FRICCIÓN

Dentro de las fórmulas para determinar las pérdidas de energía en conductos a presión, la ecuación de Darcy-Weisbach (ecuación 2.3) es la más utilizada, porque permite la evaluación apropiada del efecto de cada uno de los factores que afectan la pérdida de carga.

$$H_f = f \left(\frac{L}{D} \right) \left(\frac{V^2}{2g} \right) \quad (2.3)$$

Donde H_f es la pérdida por carga de fricción (m), f es el factor de fricción (adimensional), L es la longitud de la Tubería (m), D es el diámetro de la tubería (m) y g es la aceleración de la gravedad (m/s^2).

2.3.2 PÉRDIDAS POR ENTRADA

Las pérdidas por entrada son afectadas por un factor (K_t), cuyos valores se muestran en la figura 2.3 y dependen de la forma que tenga la entrada de la obra de toma.

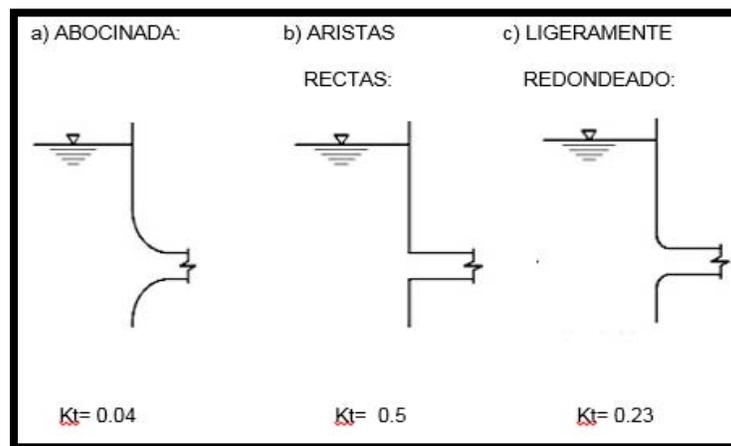


Figura 2.3 Valores de K_t para pérdidas por entrada.

Estos valores son sustituidos en la ecuación 2.4, para poder obtener las pérdidas por entrada:

$$H_x = K_t \frac{V^2}{2g} \quad (2.4)$$

Donde K_t es el factor de forma de entrada de la obra de toma (adimensional), V es la velocidad de entrada de la obra de toma y g es la aceleración de la gravedad (m/s^2).



2.3.3 PÉRDIDAS POR REJILLAS

Las rejillas, son considerados elementos importantes de una obra de toma, por lo tanto el poder conocer las pérdidas que provocan nos permite tener un mejor funcionamiento y poder evitar problemas como el paso de materiales extraños

Las pérdidas por rejillas se calculan con la ecuación 2.5, propuesta por Torres (1990):

$$H_R = \beta \left(\frac{S}{B} \right)^{4/3} \left(\frac{V^2}{2g} \right) \sin \alpha \quad (2.5)$$

Donde S es el grueso de las rejas (cm), B es la separación entre paños interiores de la rejilla (cm), V es la velocidad del líquido, inmediatamente antes de que entre a la rejilla (m/s), α es el ángulo que forma la dirección del flujo con la rejilla, g es la aceleración de la gravedad (m/s^2) y β es el coeficiente que depende de la forma de la reja.

2.3.4 PÉRDIDAS POR SALIDAS:

Por lo regular las obras de toma tienen una descarga libre, por lo tanto el coeficiente de pérdida será igual a 1, para este caso en particular se observa que la pérdida por salidas es igual a la carga de velocidad, (ver ecuación 2.6).

$$H_s = \frac{V_T^2}{2g} \quad (2.6)$$

Donde V_T es la velocidad en la sección inmediatamente anterior a la salida y g es la aceleración de la gravedad (m/s^2).

En algunos casos la descarga de la obra de toma se hace en un canal ahogado, para estos casos se utiliza la fórmula de Borda (ver ecuación 2.7) la cual se expresa a continuación:

$$H_s = \frac{(V_T - V_c)}{2g} \quad (2.7)$$

Donde V_T es la velocidad en el canal (m/s) y g es la aceleración de la gravedad (m/s^2).



2.4 TIPOS DE OBRAS DE TOMA EN CORTINAS

En este apartado se describirán las obras de toma que se utilizan para las diferentes cortinas que se pueden tener en una presa.

2.4.1 OBRA DE TOMA A TRAVÉS DE CORTINAS DE CONCRETO

En este tipo de obras de toma, los conductos comúnmente se colocan atravesando la sección de concreto de la cortina de manera horizontal o con pendiente hacia aguas abajo, con el objetivo que el gradiente de energía en ningún momento intercepte el eje del conducto.

El número de conductos y sus dimensiones de los diferentes elementos de la obra de toma, deben ser diseñados de tal forma que los gastos requeridos se puedan extraer para cualquier elevación en el embalse y en la descarga.

Por lo general, en una cortina de concreto los conductos son de tipo circular, aunque en ocasiones se pueden requerir secciones de tipo rectangular para la instalación de cierto tipo de válvulas o compuertas, en estos casos se deberá prever la construcción de transiciones.

La mayoría de las descargas de las obras de toma se localizan en las zonas no vertedoras de las cortinas, por lo que será necesario el uso de dispositivos para disipar la energía del agua antes de que regrese el agua al río o a los canales de conducción.

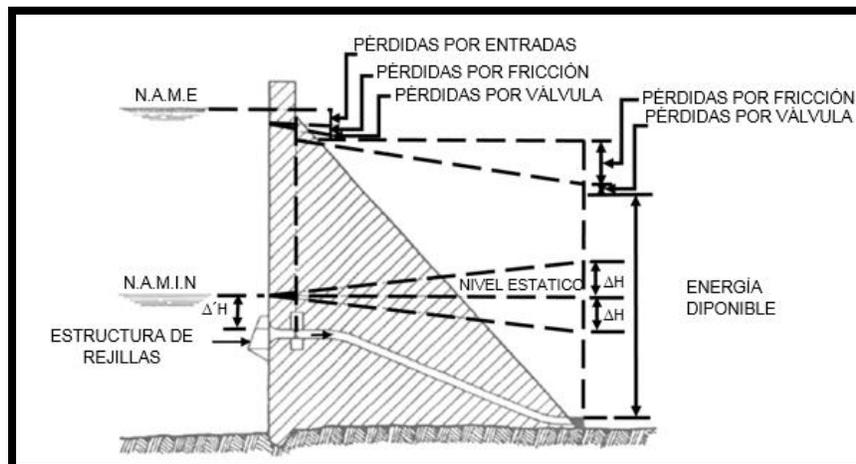


Figura 2.4 Obra de toma en una cortina de concreto (Torres, 1990)



En presas de cortinas de concreto las obras de toma están conformadas por la estructura de soporte de las rejilla, en cuyo interior se alojan las compuertas deslizantes, por conductos (en forma circular o rectangular) que generalmente trabajan a presión y en algunos casos al final de los conductos se encuentra la estructura disipadora de energía, tal como se puede observar en la figura 2.4.

2.4.2 OBRA DE TOMA EN PRESAS A TRAVÉS DE CORTINAS DE TIERRA, O DE TIERRA Y ENROCAMIENTO

Para este tipo de cortinas las obras de toma se deben diseñar, proyectar y construir en la superficie de desplante, en roca firme, o en trincheras excavadas en terreno firme.

Cuando la cortina es baja alta puede ser cimentada en terrenos suaves pero si la cortina es alta se recomienda ser cimentada en roca firme ya que es frecuente que las compuertas o válvulas de emergencia queden localizadas en cámaras o tiros verticales, que coincidan con el eje de la cortina, para eliminar la necesidad de construir torres de toma demasiado altas al pie del talud de aguas arriba así como puentes de acceso al cuarto de control.

Si los tramos de los conductos quedan aguas arriba de la cámara de válvulas, estos deberán conducir el agua con la presión interna que tiene la carga del embalse, para evitar que se tengan variaciones en el diámetro del conducto y por lo tanto evitar la tubificación entre el contacto de la superficie exterior del conducto y el terraplén.

Las válvulas o compuertas de regulación se instalaren en el lado de aguas abajo de las de emergencias, con la finalidad de evitar la construcción de disipadores de energía en el extremo de la salida. La forma de los conductos pueden ser en forma circular o en herradura, los primeros son preferibles para conductos a baja presión o aguas arriba de la cámara de válvulas y las de herradura para el caso contrario.

Sin importar de qué lado se tengan los conductos, todos deben ser diseñados y reforzados para soportar (sin agrietamientos) las cargas del terraplén de la cortina, y en ningún caso debe haber filtraciones de los conductos hacia el terraplén.



2.4.3 OBRA DE TOMA A TRAVÉS DE CORTINAS DE MATERIALES GRADUADOS

Para presas de materiales graduados, es posible que la construcción de la obra de toma sea de en forma de túnel y ésta puede estar alojada en el cuerpo de la cortina o en la ladera, como se muestra en la figura 2.5.

Las partes principales que componen a la obra de toma en presa de materiales graduados consiste en:

- ❖ El canal de acceso, con su plantilla a la elevación del umbral de la toma.
- ❖ La torre de entrada, en la cual se alojan las rejillas,
- ❖ Las compuertas de operación y de servicio (provistas de sus mecanismos elevadores).

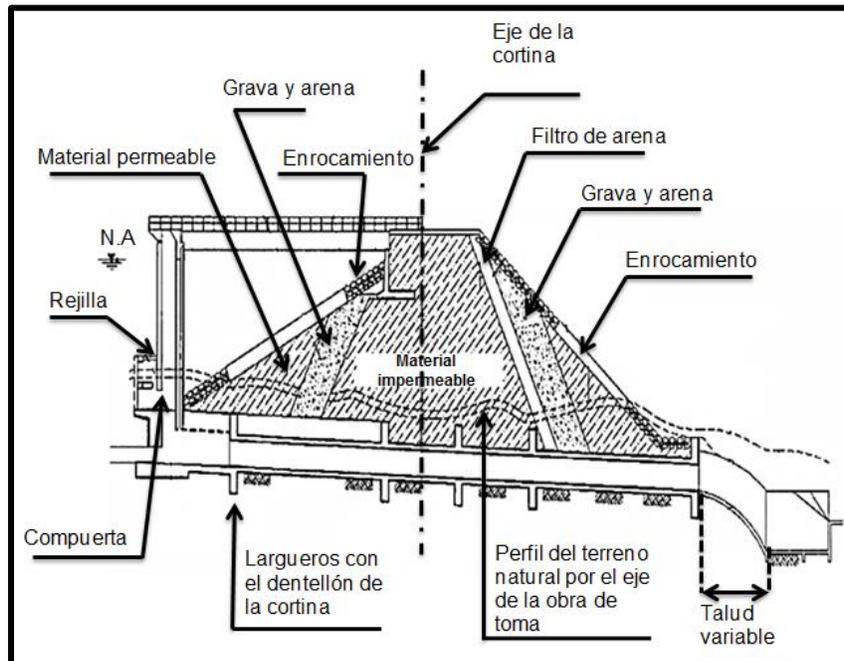


Figura 2.5 Obra de toma a través de cortina de materiales graduados (Torres, 1990).

2.4.4 OBRA DE TOMA EN TÚNEL

Este tipo de obras son recomendables para presas con cortinas de tierra, tierra y enrocamiento o arcos delgados, sin embargo, si la roca a desplantar es sana se pueden utilizar en casi todos

los tipos de cortinas, esto permite tener diseños más económicos sobre todo cuando las descargas se localizarán a lo largo de los túneles de desvío.

Para disminuir la longitud del túnel que se encuentra a presión, se pondrán los mecanismos de emergencia en estructuras relativamente cercanas a la entrada; La descarga hacia aguas abajo de la compuerta podrá ser a canal abierto, pero en caso de que la sección hidráulica del conducto sea menor que la del túnel, se deberán instalar tuberías dentro del conducto con válvulas de regulación en el extremo aguas abajo (ver figura 2.6).

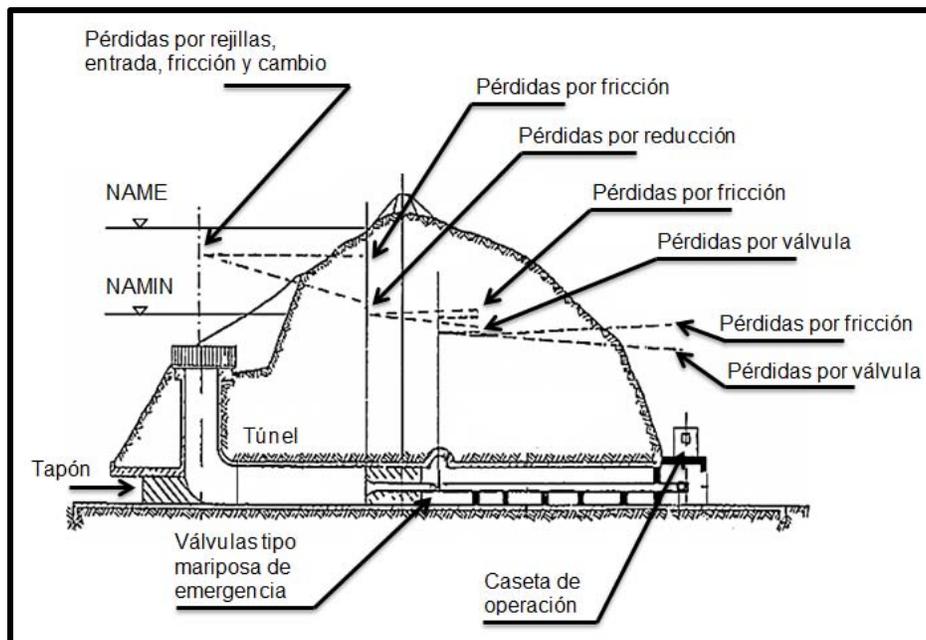


Figura 2.6 Obra de toma mediante túnel (Torres, 1990).

Para las tuberías que se encuentran aguas abajo de la zona de válvulas, la sección del túnel debe ser suficiente para permitir las operaciones de construcción, inspección y reparación sin olvidar que las dimensiones deben ser adecuadas para el equipo que se requiera.

Por lo general se recomienda que los túneles estén revestidos, aún exceptuando que las condiciones de la roca estén en excelentes condiciones, es conveniente que se les aplique ese tratamiento, incluyéndola zona de tuberías o descargas libres, dándonos así una mayor seguridad.

Dicho revestimiento se aplicará de acuerdo a las condiciones de carga a la que estén



sometidos, con esto se evitaran agrietamientos que puedan perjudicar principalmente la parte de aguas arriba en la zona de compuertas o válvulas.

Si la descarga es hacia una tubería, se suele dar el caso de requerir una transición ya que la sección hidráulica del túnel es generalmente mayor que la del conducto.

En el siguiente capítulo se presentan las causas y los efectos del aire atrapado en conductos cerrados, los fenómenos que se exponen podrían también ocurrir en los conductos de las obras de toma, por lo tanto es importante tomarlos en cuenta para evitar los problemas que el aire puede causar en este tipo de estructuras.



CAPITULO 3. AIRE ATRAPADO EN CONDUCTOS CERRADOS

La presencia de aire atrapado en conductos cerrados que forman parte de las estructuras hidráulicas, puede disminuir de forma importante el transporte de agua debido a la reducción de la sección transversal del paso del agua. Esto se puede reflejar en un incremento en las pérdidas de carga y la reducción del gasto. Estos problemas siguen ocurriendo aún hoy en día en sistemas construidos recientemente, debido a la falta de criterios de diseño más eficientemente.

Frecuentemente, los ingenieros dedicados al diseño de estructuras hidráulicas no toman en cuenta o no conocen las causas que generan la entrada de aire a este tipo de sistemas, además de los efectos potenciales que puede producir el aire atrapado.

3.1 CAUSAS POR LAS QUE EN CONDUCTOS CERRADOS SE INTRODUCE AIRE.

Las causas por las que se introduce aire en conductos cerrados, se mencionan a continuación, el conocerlas nos permitirá realizar un mejor diseño para reducir el aire que se introduce en los conductos cerrados:

1. Cuando se presenta presión de vacío en un conducto el aire, puede introducirse a través válvulas de admisión y expulsión de aire mediante juntas defectuosas.
2. El equipo mecánico (las bombas succionan el 5% y 10% de aire, debido a los vórtices que se generan en la succión).
3. Dado que el agua contiene 2% de aire disuelto, éste puede formar bolsas de aire o burbujas, las cuales se presentan cuando la presión se reduce o la temperatura incrementa.
4. Cuando se pone en marcha el sistema, el conducto se encuentra lleno de aire, este aire es desalojado (arrastrado) al iniciar su llenado y es expulsado mediante válvulas, sin



embargo en ocasiones el aire queda atrapado en los puntos altos de los conductos.

5. Al tener en nuestros conductos pendientes suaves u horizontales se pueden acumular burbujas en esos tramos, provocando un salto hidráulico.

En la figura 3.1 se muestra un esquema de un conducto cerrado y una burbuja de aire.

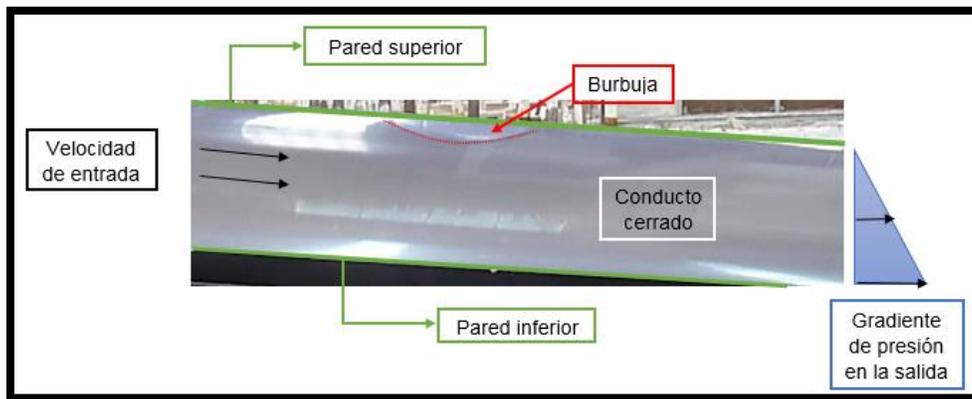


Figura 3.1 Esquema de conducto cerrado con burbuja de aire

3.2 PATRONES DE FLUJO

Cuando dos fluidos, ya sea agua-vapor o agua-aire fluyen juntos en un conducto cerrado, se les llaman flujo bifásico, aunque estrictamente hablando este nombre solo le correspondería al flujo de agua y vapor, para el segundo se le nombra flujo de dos componentes.

El flujo bifásico ocurre en diversos patrones de flujo, tales patrones pueden dividirse en dos grupos:

- ❖ Patrones de flujo horizontales concurrentes.
- ❖ Patrones de flujo verticales concurrentes.

En esta tesis solo se presentan los patrones de flujo horizontales concurrentes, los cuales son:

- ❖ Flujo estratificado.
- ❖ Flujo anular.
- ❖ Flujo ondular.

- ❖ Flujo con bolsas de gas.
- ❖ Flujo con pequeñas burbujas de gas.
- ❖ Flujo con burbujas de gas.

3.2.1 FLUJO ESTRATIFICADO.

Este tipo de patrón se presenta cuando los fluidos (agua-aire o agua-vapor) viajan en el conducto con una velocidad baja, lo que provoca que ambos fluidos se separen completamente, el gas fluye en la parte superior del conducto mientras el líquido fluye por la parte baja del conducto, tal como se observa en la figura 3.2.

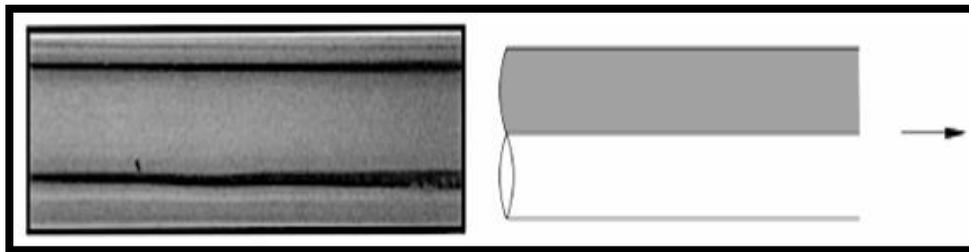


Figura 3.2 Flujo estratificado (Coleman & Garimella, 1999).

3.2.2 FLUJO ANULAR.

Como se muestra en la figura 3.3, cuando la velocidad aumenta da lugar a un núcleo de gas, el cual está rodeado con una capa líquida que en la parte inferior de tubo es mucho más gruesa que en la parte superior y se puede observar un flujo de pequeñas gotas que son arrastradas al núcleo de gas, cuando sucede dicho fenómeno se le conoce como patrón de flujo anular.

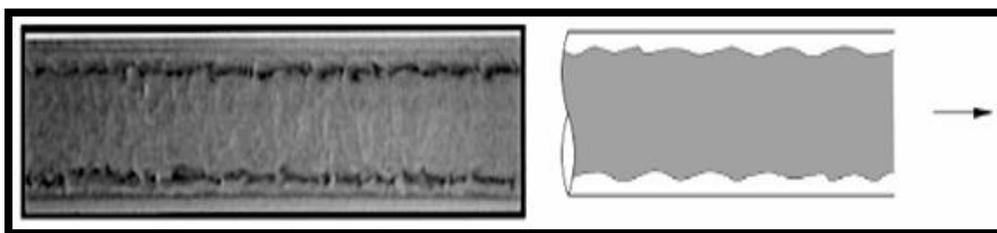


Figura 3.3 Flujo anular (Coleman & Garimella, 1999).



3.2.3 FLUJO ONDULAR.

Cuando se presenta un aumento de velocidad del gas en un patrón estratificado, se rompe la estabilidad de líquido y esto da lugar a ondas que viajan en dirección del líquido, (ver figura 3.4).

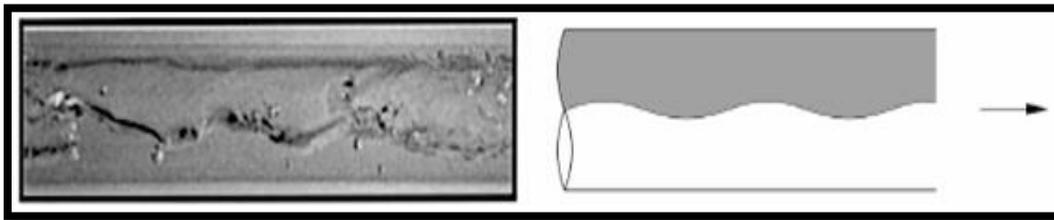


Figura 3.4 Flujo ondular (Coleman & Garimella, 1999).

3.2.4 FLUJO CON PEQUEÑAS BURBUJAS DE GAS.

Este patrón se presenta cuando la fase líquida es continua y la fase gas se distribuye en forma de burbujas esféricas, las cuales tienden a viajar en la mitad superior del conducto.

Cuando se tienen velocidades moderadas de ambos fluidos, se presentará en toda la sección transversal del tubo (conducto) burbujas de gas. Este patrón a veces se denomina flujo de espuma (ver figura 3.5).

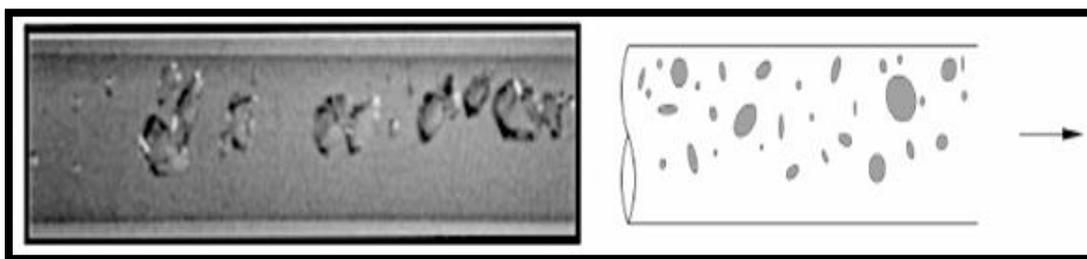


Figura 3.5 Flujo con pequeñas burbujas de gas (Coleman & Garimella, 1999).

3.2.5 FLUJO CON BURBUJAS DE GAS.

Si en nuestro conducto el gasto del gas llega a incrementarse, las pequeñas burbujas que anteriormente se tenían, se unen, esto provoca, como se puede observar en la figura 3.6, que dichas burbujas sean de mayor tamaño y fluyan en la parte superior del conducto.

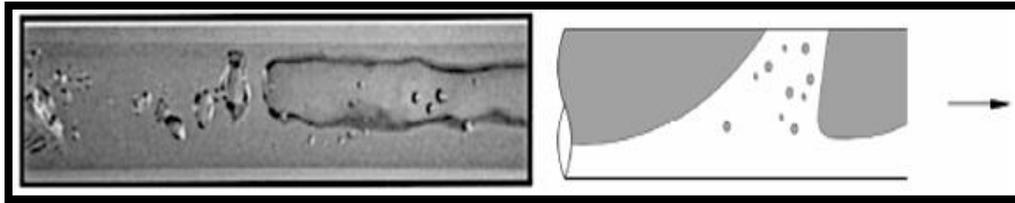


Figura 3.6 Flujo con burbujas de gas (Coleman & Garimella, 1999).

3.2.6 FLUJO CON BOLSAS DE GAS.

Cuando se tiene una velocidad de gas muy alta en un flujo ondular, se crean perturbaciones u ondas que alcanzan una mayor altura, lo suficiente para generar bolsas de aire y alcanzar el techo del conducto, como se puede observar en la figura 3.7.

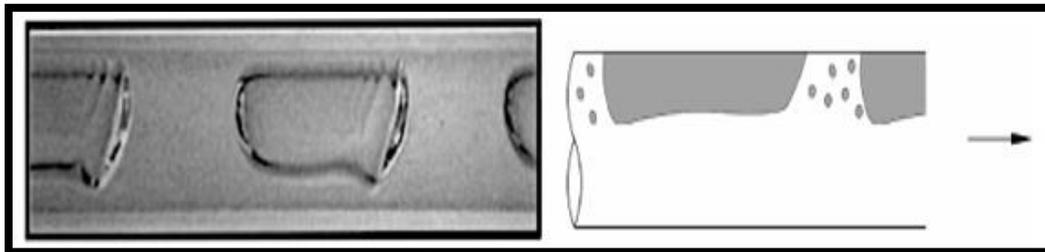


Figura 3.7 Flujo con bolsas de gas (Coleman & Garimella, 1999)

En este tipo de patrón las burbujas transitan con una velocidad mayor que la del líquido.

3.3 PROBLEMAS CAUSADOS POR AIRE ATRAPADO EN OBRA DE TOMA.

El aire atrapado en los conductos de una obra toma crea una variedad de problemas, los cuales pueden incrementar la pérdida de carga debido a que las burbujas o bolsas de aire reducen la sección efectiva del paso del agua, además, el aire atrapado puede producir lecturas incorrectas en dispositivos de medición.

3.3.1 GOLPE DE ARIETE PROVOCADO POR LA EVACUACION DE AIRE.



El incremento de velocidad debajo de la bolsa de aire puede provocar el desprendimiento de una porción de la bolsa o bien su completa remoción (Figura 3.8). El cambio abrupto de la velocidad del fluido, cuando la bolsa es removida y se instala en otro punto alto puede generar un golpe de ariete, el cual puede causar un daño considerable a accesorios y a la conducción.

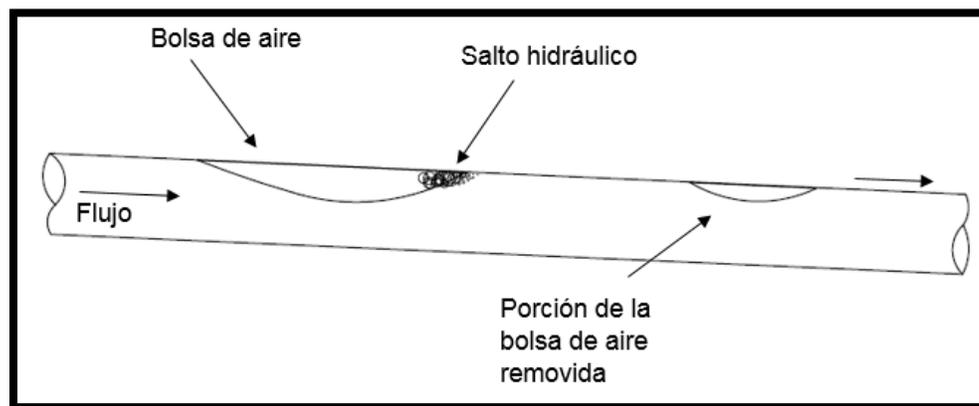


Figura 3.8 Golpe de ariete causado por remoción de una bolsa de aire

3.3.2 INCREMENTO DE LA PÉRDIDA DE CARGA CAUSADO POR AIRE ATRAPADO EN CONDUCTOS CERRADOS

Como se explicó anteriormente el tener en el sistema la presencia de aire atrapado provoca la formación de bolsas o burbujas, las cuales se incrementan de tamaño debido a la unión de unas con otras. Estas bolsas se mantendrán estacionarias, ocasionando una reducción de la sección efectiva del paso del agua, provocando que la línea piezométrica sea paralela a la pendiente de la tubería o conducto según sea el caso y se produzca una pérdida de carga.

El fenómeno antes descrito se puede observar en la figura 3.9

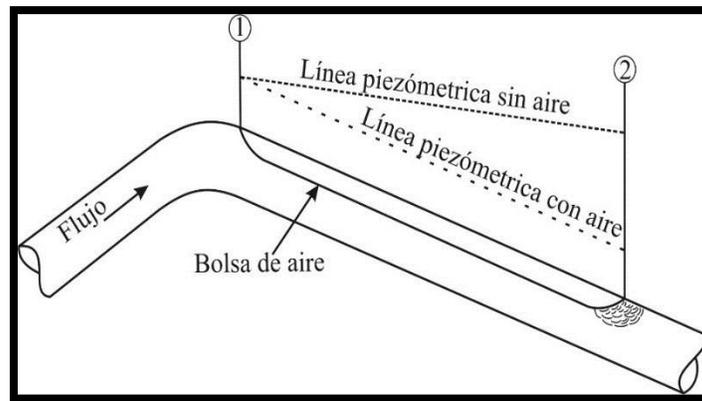


Figura 3.9 Bolsa de aire en una pendiente descendente (Edmunds, 1979).

Cuando el conducto presenta pendientes suaves, el agua tratará de mover la bolsa de aire hacia aguas abajo. Si la bolsa de aire es lo suficientemente grande, la fuerza de flotación de la bolsa puede igualar la fuerza de arrastre del agua esto provocará que la bolsa de aire permanezca estacionaria en el conducto y la fuerza de fricción tiende a cero.

3.3.3 RETORNO DE BOLSAS DE AIRE DEBIDO A LA FUERZA DE FLOTACIÓN.

El aire que se acumula en los conductos cerrados puede formar grandes bolsas de aire, la longitud de las bolsas puede ser de varias veces el diámetro de la tubería. Si en algún tramo del conducto existe una pendiente descendente, puede suceder que la bolsa de aire se estabilice y al mismo tiempo se presenta un salto hidráulico en el extremo aguas abajo de la bolsa, ver Figura 3.10. La acción turbulenta del salto hidráulico causa que el aire entre y se mezcle con el agua que fluye en la conducción. Aguas abajo del salto hidráulico, el aire introducido puede formar burbujas de mayor tamaño y/o bolsas de aire y si éstas son lo suficientemente grandes, la fuerza de arrastre del agua no podrá superar la fuerza de flotación. Entonces, las burbujas y/o bolsas permanecerán estacionarias en el conducto, incrementando su tamaño al tiempo que más burbujas de aire llegan a unírseles. Las bolsas de aire incrementarán su tamaño al mismo tiempo que se reduce su velocidad como resultado del aumento de la fuerza de flotación. Las bolsas de aire pueden regresar con una enorme fuerza a través del salto hidráulico (fenómeno conocido como blowback). Esta fuerza puede ser capaz



de dañar parcial o completamente las estructuras hidráulicas, como la entrada de una obra de toma en una presa.

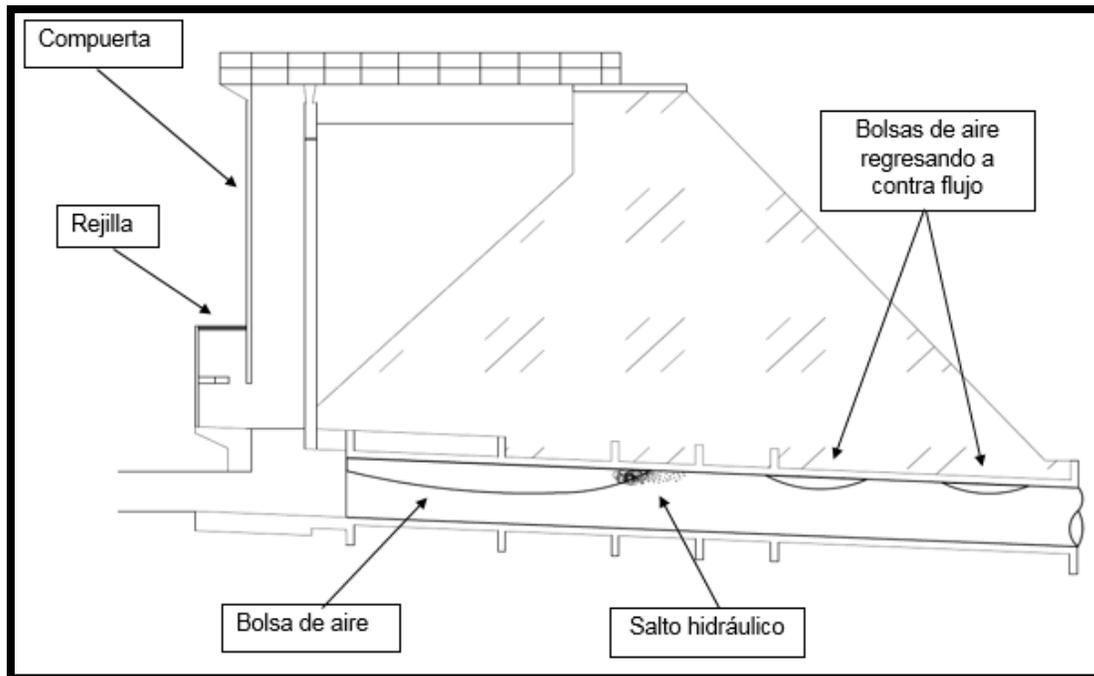


Figura 3.10 Retorno de bolsas de aire a contra flujo (blowback).

Ya que se han explicado las causas y los efectos que provoca el aire dentro de un conducto cerrado, también es importante conocer cómo poder evitarlos, por ello, se cuenta con dos medios y se hace mención de cada uno, a continuación:

- ❖ Medios mecánicos.
- ❖ Medios hidráulicos.

Los medios mecánicos, que se refiere a los venteos y válvulas de aire no son parte del alcance de esta tesis, por lo tanto no se incluyen.



3.4 MEDIOS HIDRÁULICOS

Los medios hidráulicos se basan en la utilización de la inercia del flujo de agua para remover el aire de la conducción (velocidad de remoción). En la actualidad no existe un método analítico universalmente aceptado para analizar el movimiento de burbujas y bolsas de aire en conductos cerrados. Por lo tanto, el diseño de estos sistemas se realiza usando fórmulas semiempíricas. La desventaja es que las recomendaciones de varios autores varían ampliamente y quizá no sean adecuadas para el diseño de algunos conductos. Las posibles causas de esta discrepancia son que las condiciones adoptadas por diferentes investigadores no son generales, además muchas de sus mediciones fueron realizadas en dispositivos experimentales con diámetros pequeños (50 mm) en comparación con los prototipos.

A continuación se mencionaran algunas de las investigaciones más relevantes.

3.4.1 VERONESE (1937) Y LARA (1955)

Durante los experimentos que realizaron Veronese y Lara pudieron encontrar diferentes aspectos del comportamiento que tiene el aire atrapado y los cuales se mencionan a continuación:

1. Encontraron una velocidad mínima para mantener estacionaria una burbuja de aire.
2. Hay velocidades mayores a la mínima que reducen el tamaño de las burbujas, por medio de generación y arrastre, hasta llegar a un tamaño que es conocido como burbuja límite.
3. Si aumenta la velocidad, puede remover dicha burbuja de la conducción manteniendo su tamaño, esta velocidad es llamada velocidad límite.
4. El valor encontrado para la velocidad límite es de 0.59 m/s y es suficiente para remover burbujas de diámetros mayores de 100mm.



3.4.2. KALINSKE Y ROBERTSON (1943)

Estos investigadores no sólo estudiaron la introducción del aire en el salto hidráulico debido a lo vórtices generados por este mismo, sino que también estudiaron la cantidad de aire que aporta el efecto del salto hidráulico así como su comportamiento tanto del gasto del agua como del gasto de aire afectado por diferentes presiones. Mediante sus experimentos tomaron medidas de ambos gastos, así como de los tirantes y de las presiones, antes y después del salto hidráulico, donde se pudieron observar dos casos con respecto a la presión.

El primer caso fue teniendo una presión atmosférica y para el segundo caso se tuvo presiones mayores a la atmosférica.

Se concluyó que en ninguno de los dos casos la presencia o falta de la presión atmosférica tenía efecto en los resultados, además se encontró que cuando el aire es drenado mediante el salto hidráulico se tiende a formar una bolsa de aire, la cual se puede extender hasta aguas abajo de la tubería, pudiendo permanecer estable o regresar a través del salto hidráulico.

Para gastos pequeños se forman bolsas relativamente largas que son desplazadas hacia aguas abajo.

Todos estos análisis (ver figura 3.11) denotan que teniendo condiciones geoméricamente similares, se tendrá una relación, debido a que el gasto drenado o también denominado gasto de aire va a depender del gasto del agua y de la intensidad de turbulencia del salto, obteniendo la siguiente relación adimensional (ecuación 3.1).

$$\frac{Q_{\text{aire}}}{Q_{\text{agua}}} = f \left(F_1, \frac{y_1}{D}, S \right) \quad (3.1)$$

Dónde f es la intensidad de turbulencia del salto hidráulico, F_1 es el número de Froude al inicio del salto hidráulico, y_1 es el tirante aguas arriba, D es el diámetro del conducto y S es la pendiente del conducto.

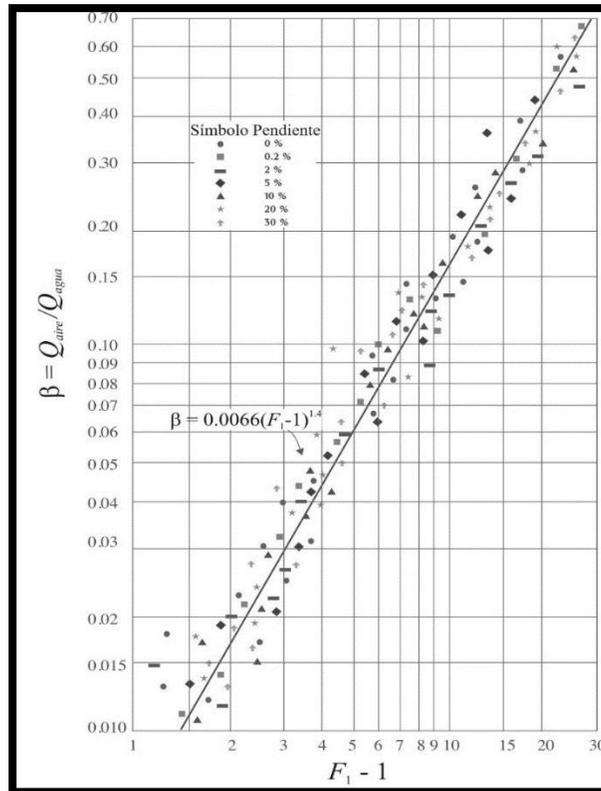


Figura 3.11 Aire ingresado a un conducto cerrado por un salto hidráulico (Kalinske Y Robertson, 1943).

Al continuar realizando más experimentos notaron que el término $\frac{Q_{aire}}{Q_{agua}}$ no se ve afectado por el término $\frac{y_1}{D}$, pero si variará con respecto al número de Froude, con esto, dichos investigadores realizaron una regresión lineal dando como resultado la ecuación (3.2).

$$\beta = \frac{Q_{aire}}{Q_{agua}} = 0.0066(F_1 - 1)^{1.4} \quad (3.2)$$

3.4.3 KALISNKE Y BLISS (1943)

Posteriormente Kalinke y Bliss presentaron datos que indicaban el gasto de agua necesario para mantener la remoción o barrido del aire en cualquier tubería y con cualquier pendiente.



Para obtener dichos resultados en su investigación utilizaron conductos con diferentes pendientes, exceptuando pendientes suaves, con ello concluyeron que no importaba la inclinación que tenga el conducto dado que las burbujas o bolsas de aire siempre terminaban en un salto hidráulico que sellaba el conducto.

También observaron que cuando se presentaban gastos pequeños con pendientes suaves, el salto hidráulico no sellaba el techo del conducto, pero se percibió que el tirante aguas abajo del salto hidráulico se incrementaba gradualmente hasta llenar el conducto.

Para gastos grandes el salto hidráulico introduce y crea aire a velocidades mayores a la que el flujo aguas abajo puede evacuar provocando que el exceso de aire atraviese el salto hidráulico y regrese a la bolsa de aire.

Al ir avanzado en sus investigaciones encontraron que existe un determinado gasto (para cualquier diámetro y pendiente) que es capaz de evacuar de la conducción todo el aire que introduce el salto hidráulico, obteniendo que para gastos pequeños tal remoción o tal gasto dependerá de la velocidad del flujo aguas abajo del salto, mientras que para gastos grandes esa velocidad es suficiente para remover dicho aire (Ver figura 3.12).

Por lo tanto, al terminar dicho análisis descubrieron que el gasto de aire removido y el gasto del agua $\frac{Q_{aire}}{Q_{agua}}$, están en función de la pendiente y del denominado gasto adimensional $\left(\frac{Q_{agua}^2}{gD^5}\right)$, al graficar los datos obtenidos, se encontró que el valor del gasto del agua $\frac{Q_{aire}}{Q_{agua}}$ incrementa con el gasto adimensional $\left(\frac{Q_{agua}^2}{gD^5}\right)$ para cualquier pendiente; Su tendencia de los resultados se puede representar con la ecuación 3.3:

$$\left(\frac{Q_{agua}^2}{gD^5}\right) = 0.707 S \quad (3.3)$$

Donde g es la aceleración de la gravedad, D es el diámetro del conducto y S es la pendiente del conducto.

La ecuación 3.3 se puede presentar en términos de la velocidad del agua (ecuacion3.4).

$$\frac{v^2}{gD} = 1.14 S \tag{3.4}$$

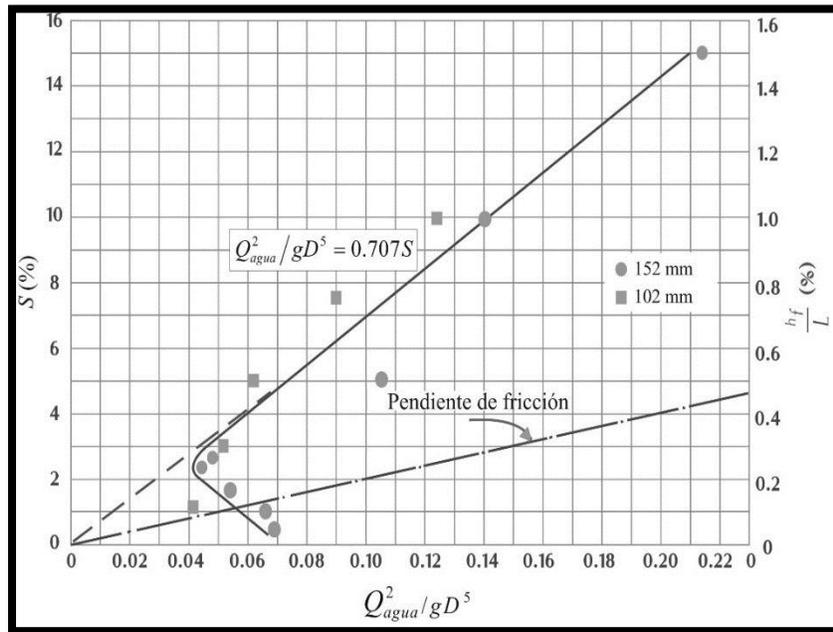


Figura 3.12 Datos experimentales por Kalinske y Bliss (1943).

3.4.4 KENT (1952)

Kent encontró que la velocidad de remoción del aire mediante un salto hidráulico al final de una bolsa de aire está relacionada con la fuerza de arrastre del agua que actúa sobre la bolsa. Según el autor una velocidad de remoción efectiva existe cuando la velocidad media del agua es igual o mayor que la velocidad mínima v_{min} .

Kent desarrolló una relación semiempírica (ecuación 3.5) para obtener el valor de v_{min} , la cual es función de la pendiente de la tubería S y de su diámetro D .

$$V_{min} = C_0^{1/2} \sqrt{gDS} \tag{3.5}$$



Dónde $C_0^{1/2}$ es una función de la forma de la bolsa de aire y mediante datos experimentales se encontró que su valor se vuelve constante cuando la longitud de la bolsa es mayor a $1.5D$.

Sin embargo, haciendo un análisis de la ecuación (3.5) ésta muestra una desviación con respecto a los resultados experimentales, ver Figura 3.13.

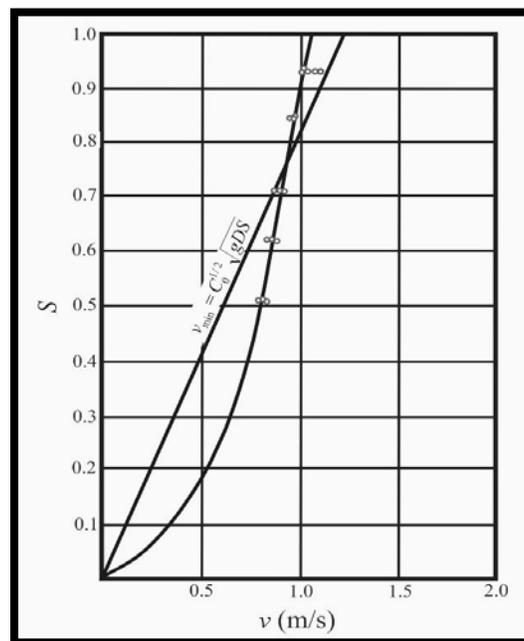


Figure 3.13 Relación entre la velocidad mínima y la pendiente descendente (Kent 1952)

3.4.5 GANDENBERGER (1957)

Gandenberger realizó una investigación experimental para estudiar el movimiento de aire en conductos cerrados. Los experimentos fueron desarrollados en tubos de cristal con diámetros de 10.5 mm, 26 mm y 45 mm, así como en tuberías de acero de 100 mm. Las pendientes podían ser variadas entre 0° y 90° . Los resultados se presentan en la Figura 3.14, donde se lee la velocidad mínima del agua requerida para remover un determinado volumen de aire acumulado en un punto alto del perfil con un diámetro unitario y una cierta pendiente descendente.

El parámetro adimensional n para caracterizar el tamaño de burbujas y bolsas de aire, se define como $n = 4V/\pi D^3$, donde V es el volumen de la burbuja o de la bolsa de aire. La figura 3.14 cubre el rango de $n = 0.02$ a $n > 1$.

Para cualquier diámetro de tubería, la velocidad de remoción se incrementa al crecer al tamaño de la burbuja o bolsa de aire hasta un valor $n = 1$, y posteriormente el valor del parámetro n permanece constante. Gandenberger concluyó que la gráfica es válida para tuberías con diámetros mayores a 0.1 m y para burbujas o bolsas de aire con $n > 1$. En una investigación posterior llevada a cabo en una tubería de 455 m de largo con un diámetro de 500 mm y una pendiente de 5°, Gandenberger corroboró sus conclusiones anteriores.

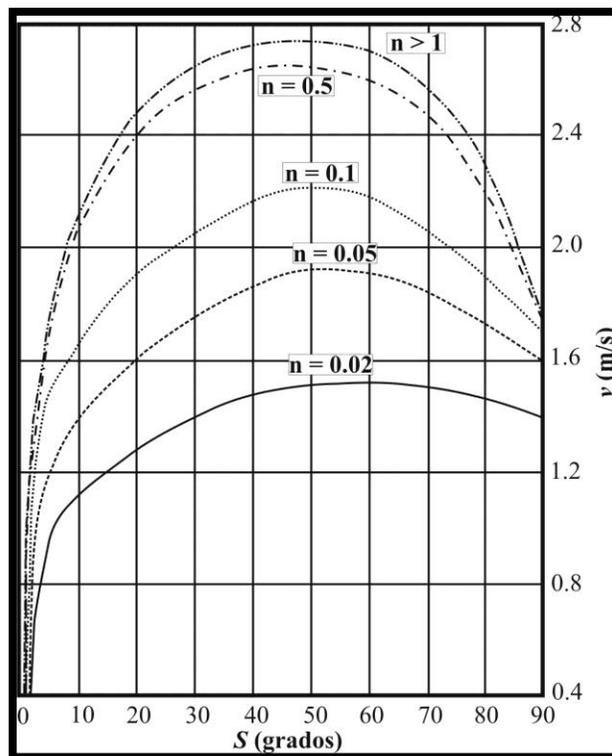


Figura 3.14 Movimiento de burbujas y bolsa de aire de diferentes tamaños en pendientes descendentes (Gandenberger, 1957)



3.4.6 FALVEY (1980)

Este autor elaboró una gráfica que muestra los límites de movimiento de burbujas y bolsa de aire en conductos cerrados, basado en datos presentados por Kalinske y Bliss (1943); Runge y Wallis (1965); Colgate (1966) y Martin (1976).

El autor comenta que la dirección de movimiento de las burbujas y bolsas de aire puede ser analizada tomando en cuenta las magnitudes de las fuerzas de arrastre y flotación actuando sobre una burbuja estacionaria en el flujo. Por ejemplo, las burbujas de aire se mueven perpendicularmente al eje del tubo, cuando la componente vectorial de la fuerza de flotación en la dirección aguas arriba es igual a la componente vectorial de la fuerza de arrastre.

Asimismo, Falvey incluye en su gráfica los resultados obtenidos por Sailer (1955) en prototipos, en los cuales se presentan problemas con grandes bolsas de aire que se movieron en contra flujo, destruyendo por completo las bases de concreto reforzado de algunos tanques del acueducto San Diego. En la Figura 3.15 se muestra la gráfica propuesta por Falvey.

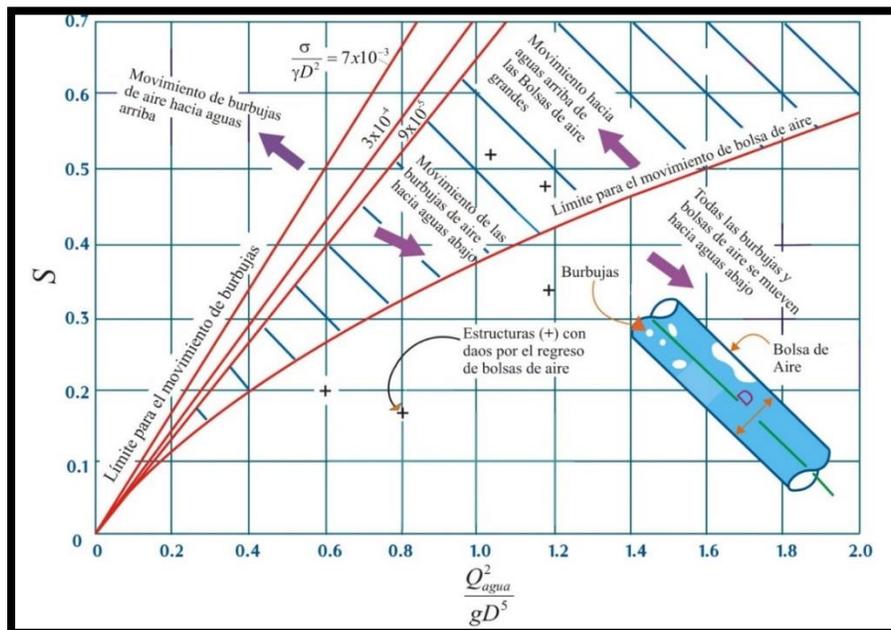


Figura 3.15 Movimiento de burbujas de aire en conductos cerrados fluyendo llenos (Falvey, 1980).



3.4.7 ESCARAMEIA (2007)

Se dedicó a realizar estudios experimentales y numéricos con la finalidad de que se tuviera una guía para minimizar los efectos negativos de la presencia de bolsas de aire en los conductos y con base a sus resultados propuso la ecuación 3.6 para analizar el comportamiento del aire en conductos.

$$\frac{v}{(gD)^{0.5}} = SF[0.56(\text{sen } S)^{0.5} + \alpha] \quad (3.6)$$

Dónde v es la velocidad mínima del flujo requerida para mover una bolsa de aire definido por $BS = \frac{4V}{\pi D^3}$, S es la pendiente descendente, D es el diámetro del conducto, SF es el factor de seguridad igual a 1.1 y α tiene los siguientes valores:

$$\begin{aligned} \alpha &= 0.45 \text{ para } BS < 0.06 \\ \alpha &= 0.50 \text{ para } 0.06 \leq BS < 0.12 \\ \alpha &= 0.57 \text{ para } 0.12 \leq BS < 0.30 \\ \alpha &= 0.60 \text{ para } 0.30 \leq BS < 2 \end{aligned}$$

Esta ecuación es válida para tuberías con una inclinación máxima de 40 grados y con diámetros menores de 1.5m.

3.4.8 POZOS ET AL. (2010)

Pozos et al. (2010) propusieron una expresión analítica, ecuación (3.7), para estudiar el comportamiento de las burbujas y bolsas de aire en tuberías con pendientes descendentes. La efectividad de dicha ecuación ha sido validada con investigación teórico-experimental, así como con el análisis de acueductos en campo.

La ecuación fue obtenida al realizar el balance de la fuerza de arrastre y la componente de la fuerza de flotación en sentido contrario al flujo, actuando sobre una burbuja de aire estacionaria en una tubería fluyendo completamente llena. La comparación de los resultados experimentales con las predicciones obtenidas utilizando la ecuación (3.7) mostró que estos coinciden muy bien.



Esta expresión se puede utilizar para analizar acueductos en la etapa de diseño, así como aquellos que se encuentran en funcionamiento. La mencionada expresión puede escribirse como:

$$\frac{Q_{\text{agua}}^2}{gD^5} = S \quad (3.7)$$

Donde Q_{agua} es el gasto de agua que circula por la tubería, D es el diámetro del tubo, g es la aceleración de la gravedad y S la pendiente de la tubería. El término del lado izquierdo de la ecuación (3.7) se conoce como parámetro de gasto adimensional (PGA).

Para determinar si las bolsas de aire podrían permanecer estacionarias en los puntos altos de los acueductos a bombeo, el PGA debe ser calculado para el rango de gastos con los que opera el sistema y comparado con todas las pendientes de la tubería que componen la línea. Cuando $Q^2/gD^5 > S$ las burbujas y bolsas de aire se moverán con el flujo. Sin embargo, si $Q^2/gD^5 < S$ las burbujas y las bolsas regresarán en sentido contrario al flujo. En este caso, este punto podría acumular bolsas de aire.

Durante el desarrollo de este trabajo se realizó una investigación experimental en un dispositivo en laboratorio, para analizar la velocidad de remoción de burbujas y pequeñas bolsas de aire atrapadas en conductos circulares con pendientes descendentes suaves (menores a 5.9°). El análisis del movimiento del aire se efectuó con un programa de acceso libre llamado TRACKER. En el siguiente capítulo se presentan los experimentos.



CAPITULO 4. ANÁLISIS EXPERIMENTAL

El aire atrapado en los conductos de las obras de toma de las presas puede provocar principalmente presiones transitorias y vibraciones, que pueden dificultar la operación o bien dañar estas estructuras.

Es importante mencionar, que debido a las limitaciones de criterios de diseño y los costos de construcción, es prácticamente imposible construir una conducción a presión libre de aire. Por lo tanto, es esencial entender el transporte de aire en conductos cerrados con el fin de proporcionar una guía en el diseño y operación de los conductos de las obras de toma. El criterio comúnmente utilizado en el movimiento de burbujas y bolsa de aire en un flujo a tubo lleno es la velocidad del flujo de agua para iniciar el movimiento de una burbuja o bolsa de aire, ésta es la llamada velocidad crítica.

En este capítulo se presenta una investigación experimental, realizada para evaluar la velocidad crítica del agua necesaria para remover burbujas y pequeñas bolsas de aire de una tubería de 20 cm de diámetro interior con pendientes suaves ($S < 5.9^\circ$), que simula los conductos de una obra de toma. Las velocidades se obtuvieron con un programa de acceso libre llamado Tracker.

4.1 DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

El dispositivo que se utilizó para la investigación, está conformado por un circuito compuesto de válvulas, venteos, un cárcamo de succión, una bomba de 20 hp de potencia controlada con un variador de velocidad y la sección de medición es de tubería de PVC transparente con un diámetro interior de 20 cm y que es soportada por una rampa movible de metal.

En la figura 4.1 se pueden observar los principales elementos que componen el dispositivo.

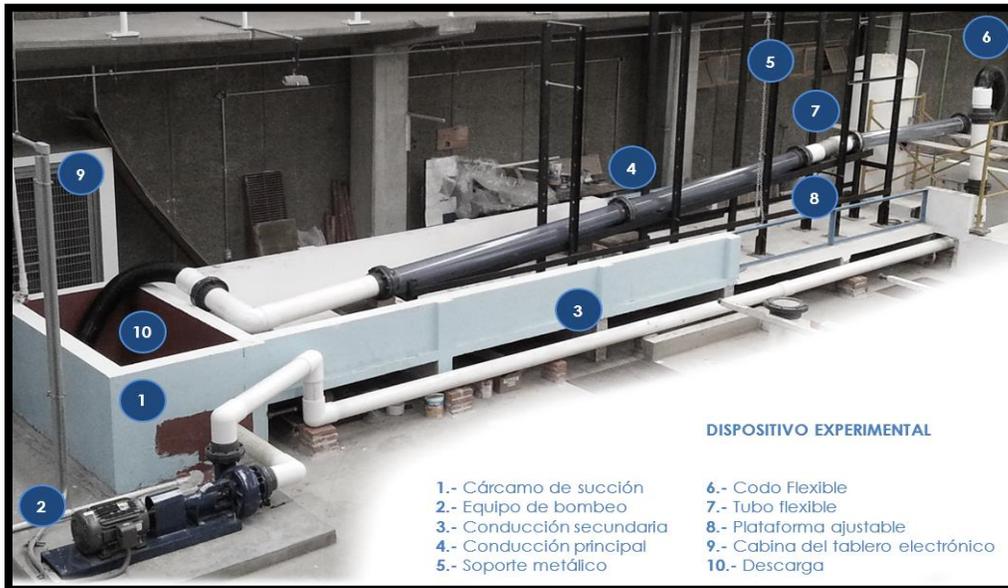


Figura 4.1 Esquema del dispositivo experimental

1. *Cárcamo de succión*: Es la principal fuente de abastecimiento de la bomba, tiene una forma rectangular y una capacidad de 2 m^3 .
2. *Equipo de bombeo*: Se utilizó una bomba con una potencia de 20 hp la cual proporciona un gasto máximo de 55 l/s.
3. *Conducción secundaria*: Es una tubería de PVC de 15 cm de diámetro interior, que va desde la descarga de la bomba hasta el codo flexible.
4. *Conducción primaria*: Está compuesta de una tubería de PVC transparente con un diámetro interior de 20 cm y con una longitud aproximadamente de 8 m, en ella se encuentran instaladas unas válvulas de esfera de $\frac{1}{2}$ pulgada, para permitir la entrada y salida de aire. La conducción primaria fue el elemento donde se realizó todo el estudio experimental.
5. *Soporte metálico*: Tiene una altura aproximada de 10 m y 8 m de longitud, está diseñado para variar su ángulo entre 0° y 45° .



6. *Codo flexible*: Tubería o manguera flexible de 8 pulgadas de polietileno con aros de refuerzo de PVC.
7. *Tubo flexible*: Permite maniobrar con mayor facilidad cuando se modifica la pendiente de la conducción primaria.
8. *Plataforma ajustable*: Tiene una longitud aproximada de 8 m.
9. *Cabina del tablero electrónico*: Dentro de ella se encuentra el variador de velocidad de la bomba.
10. *Descarga*: Conformado por un tubo flexible de 8 pulgadas que descarga al cárcamo de succión.

4.1.1 INSTRUMENTACION ADICIONAL DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

El dispositivo sufrió unos cambios posteriores, debido a las exigencias que requería el experimento, con esto se logró obtener mediciones exactas.

La instrumentación original y la adicional se describen a continuación.

I. Variador de velocidad

Este instrumento modifica la velocidad de giro de la bomba, esto permite variar los gastos del agua que circulan a través de la tubería o conducción principal, en su pantalla se pueden observar las velocidades en Hertz. Su velocidad mínima a la que debe trabajar es de 20 Hertz, esto para evitar que se dañe o queme el motor del equipo de bombeo. Véase la figura 4.2.



Figura 4.2 Variador de velocidad.

II. Medidor de flujo electromagnético

Instrumento de medición para obtener los rangos de gastos ensayados (0 a 55 l/s) (Figura 4.3).



Figura 4.3 Medidor de flujo electromagnético

III. Válvulas

En la conducción primaria se instalaron 3 válvulas de esfera de $\frac{1}{2}$ pulgada, éstas últimas permitir la entrada y la expulsión de aire durante las maniobras de llenado y vaciado respectivamente (Véase la figura 4.4).

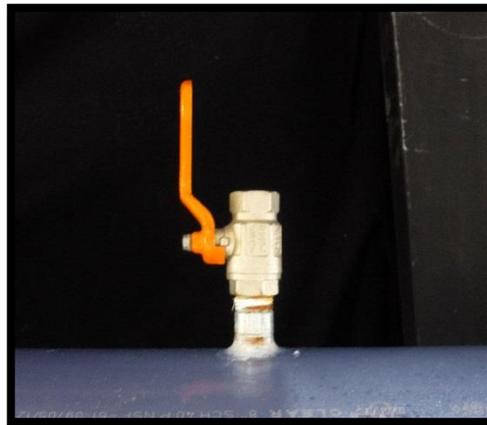


Figura 4.4 Válvula de esfera de ½ pulgada.

Los tres tramos en los que se midieron tanto el ancho como la longitud y además se filmó su comportamiento de las burbujas y pequeñas bolsas de aire, tienen las siguientes longitudes: 120 cm, 96 cm, y 122 cm (Ver figura 4.5).

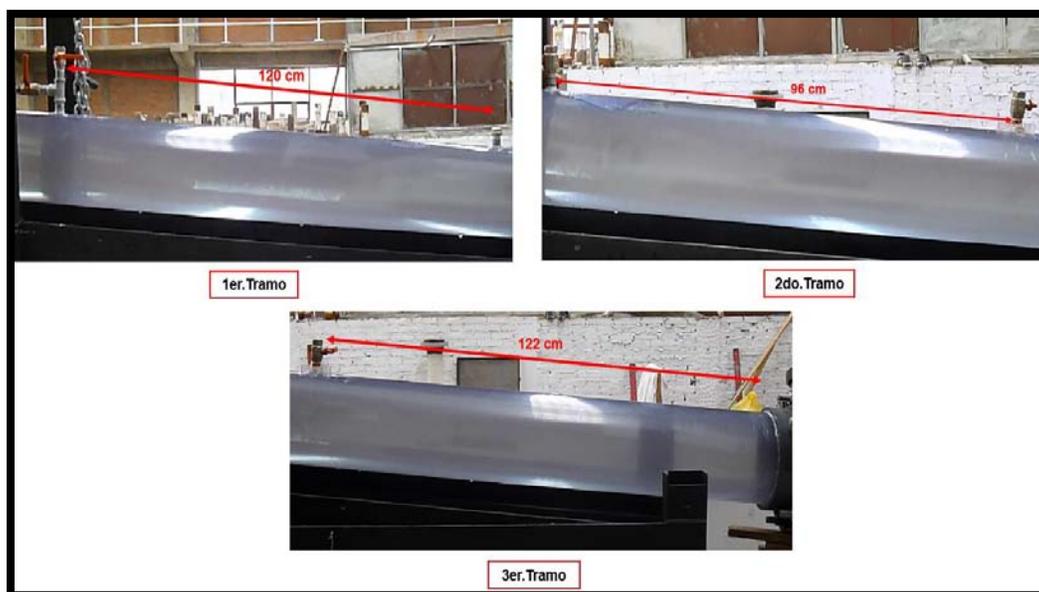


Figura 4.5 Tramos de la sección de medición.



IV. Sistema de inyección de aire

El dispositivo de inyección de aire está conformado por una manguera con diámetro de 1.5 cm, cada extremo de la manguera tiene un aditamento que permite conectarlos al compresor de aire y a la válvula de entrada de aire, respectivamente. (Ver figura 4.6).



Figura 4.6 Sistema de inyección de aire.

V. Válvula de mariposa

La válvula que se observa en la figura 4.7 está colocada al final de la conducción principal, el material del que está hecho es de PVC, cuenta con un diámetro de 8 pulgadas y su función es regular el flujo.



Figura 4.7 Válvula de mariposa de 8 pulgadas.



4.2 MEDICIONES DE VELOCIDAD

El procedimiento que se llevó a cabo para la realización del estudio experimental se describe a continuación:

1. Antes de poner en marcha el dispositivo se debe verificar que el cárcamo este lleno de agua a su máximo nivel y que tanto las válvulas como los venteos estén abiertos.
2. A continuación se prende el variador de velocidad y se va aumentando la velocidad de giro de la bomba.
3. Posteriormente se pone en marcha el equipo de bombeo y la conducción primaria trabaja a superficie libre. En este momento se pasa a verificar la posible existencia de fugas en todo el dispositivo.
4. Una vez realizado lo anterior se va cerrando lentamente la válvula de mariposa, lo que evita la ocurrencia de un fenómeno transitorio brusco y que, la conducción principal empiece a trabajar a tubo lleno.
5. Dependiendo de la pendiente con la que se trabaje va a ser necesario incrementar el gasto con la finalidad de poder expulsar por completo el aire mediante las válvulas.
6. Poco a poco se deben cerrar los venteos y de una a una ir cerrando las válvulas para lograr que la conducción primaria trabaje a tubo lleno, sin aire atrapado.
7. Una vez teniendo el tubo lleno se pasa a colocar el sistema de inyección de aire.
8. En este momento se recomienda tomar el registro del gasto de agua (l/s) y la velocidad de giro (Hz) de la bomba.



9. Seleccionar los tramos en que se realizaran los análisis. Para este estudio se optó por 3 tramos cuyas longitudes son 96 cm, 120 cm y 122 cm (ver figura 4.5).
10. Para el siguiente paso es necesario contar mínimo con dos personas, esto debido a que el proceso de inyección de aire consta de dos válvulas, la del compresor y la de entrada de aire, por lo que cada persona deberá maniobrar una válvula.
11. Al inicio del experimento se recomienda medir con ayuda de un flexómetro el largo y ancho de la burbuja a analizar. Al mismo tiempo se graba el video, el cual comienza cuando la burbuja aparece en el inicio del tramo seleccionado y se finaliza una vez que la burbuja llega hasta el final del tramo.
12. El proceso se repite las veces que se ha necesario y/o se requiera para las diferentes mediciones de trabajo con distintos gastos de agua, volúmenes de aire y pendientes del conducto.
13. Teniendo todos los videos que se grabaron, se procede a hacer la clasificación de cada uno, con ayuda de los datos obtenidos durante el estudio experimental (longitud y ancho de la burbuja y/o pequeña bolsa de aire, así como el gasto).
14. Finalmente se efectúa el análisis de los videos mediante el programa Tracker, para obtener las velocidades de las burbujas y pequeñas bolsas de aire.

4.3 PROGRAMA TRACKER.

El programa de acceso libre tracker implementado en una plataforma Java Open Source Physics (OSP), permite mediante una filmación de un cuerpo (burbuja de aire), poder realizar un análisis detallado de su movimiento.

Entre sus principales características de análisis incluye:

1. Seguimientos de cuerpos de forma manual y/o automático.
2. Posibilidad de obtener valores de velocidad, aceleración laminar, tiempo, etc.
3. Opciones flexibles de calibración del video.
4. Copiar e imprimir datos y gráficas.

El programa tracker tiene una interface muy amigable y fácil de utilizar, además tiene la ventaja de darnos resultados precisos con objetos que en muchos casos son difíciles de analizar. Vea la figura 4.8.

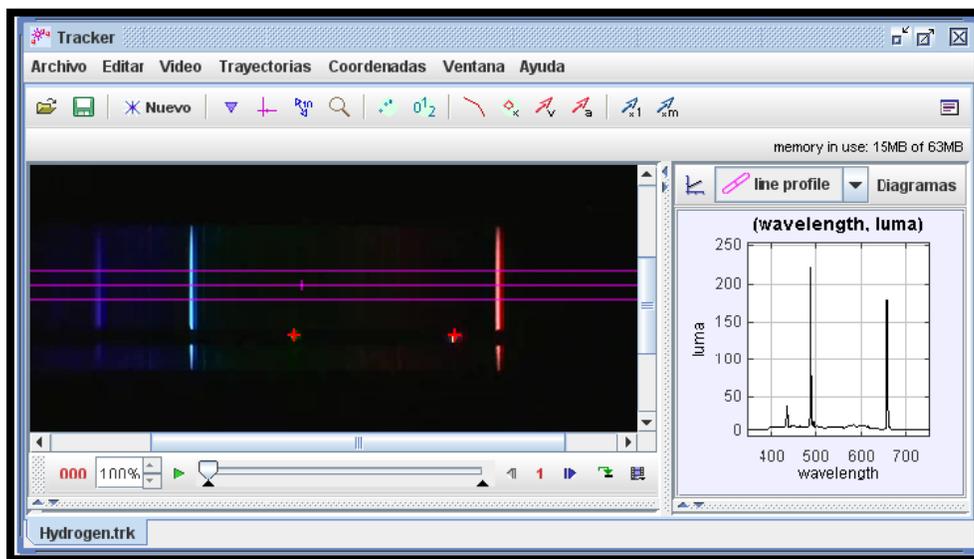


Figura 4.8 Interface del programa Tracker

4.3.1 FUNCIONAMIENTO

Ya que se ha descargado, instalado e iniciado el programa, aparecerá una ventana que contiene como elementos principales: la barra de menú, la barra de herramientas, el controlador de video, la vista principal (en ella aparece el video a analizar una vez cargado), la vista de tablas y la vista de gráficos, como se observa en la figura 4.9.

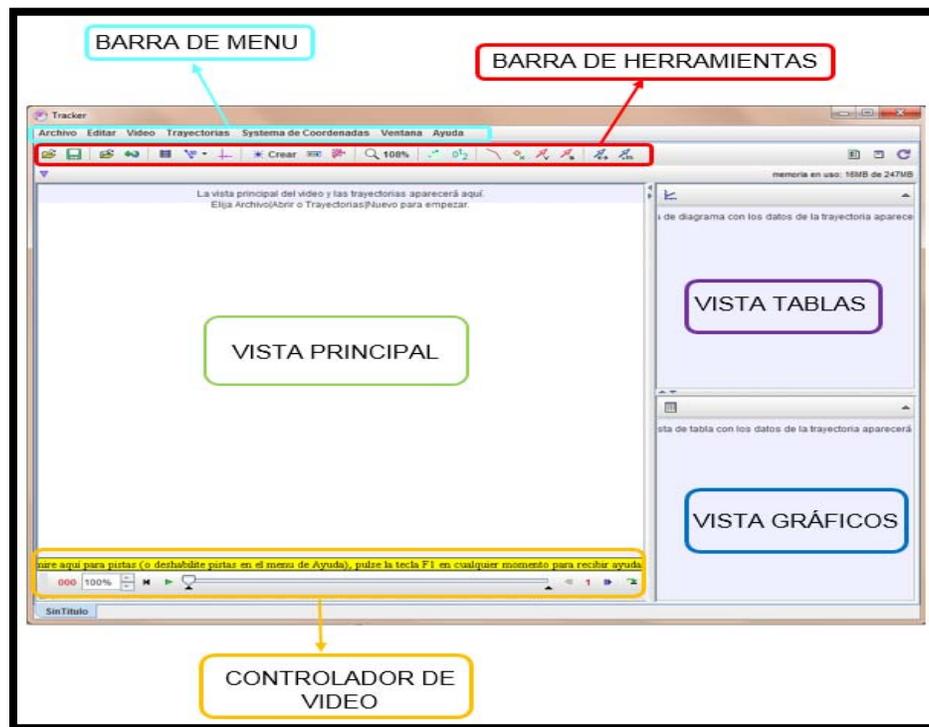


Figura 4.9 Ventana principal del programa Tracker

Para comenzar el análisis de un video, se le da clic al botón “open a video” de la barra de herramientas (Figura 4.10).



Figura 4.10 Barra de herramientas

Y aparecerá la siguiente ventana (Ver figura 4.11) donde seleccionaremos el archivo que se desea analizar:

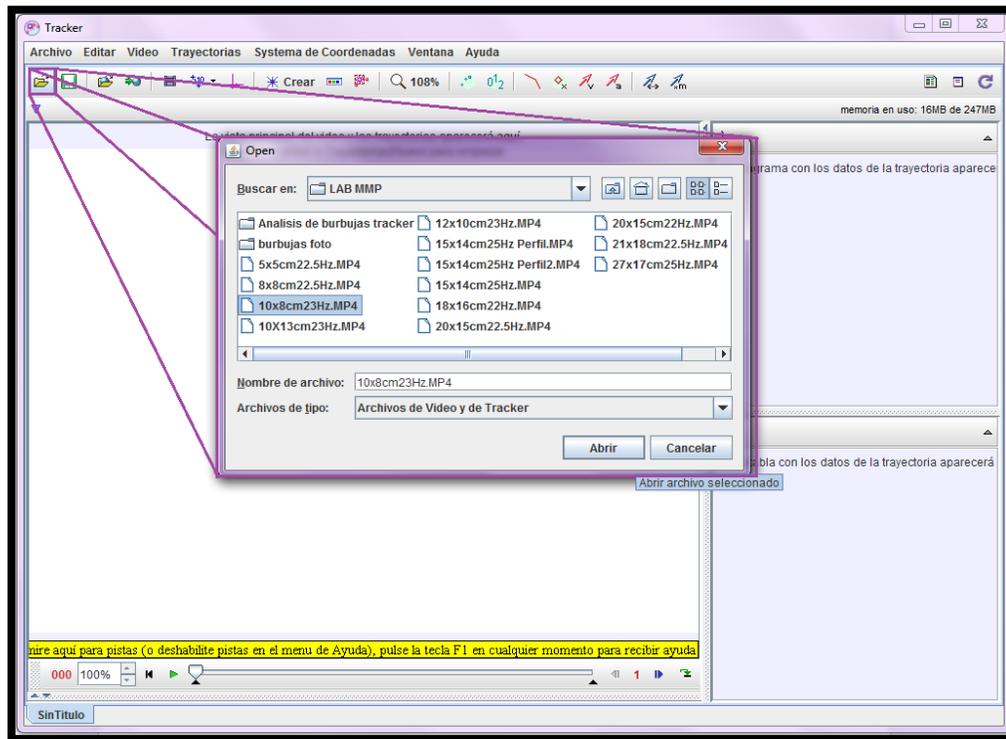


Figura 4.11 Selección de video

El tracker funciona mediante cuadros de video por lo que es importante que una vez cargado el archivo se ajusten los cuadros que se estudiarán, para esto se utiliza el controlador de video y se selecciona el botón “ajustes del video clip”, como se muestra en la figura 4.12.



Figura 4.12 Ajustes del video clip

Posteriormente se puede observar en la figura 4.13 una ventana llamada “ajustes de cortes”.

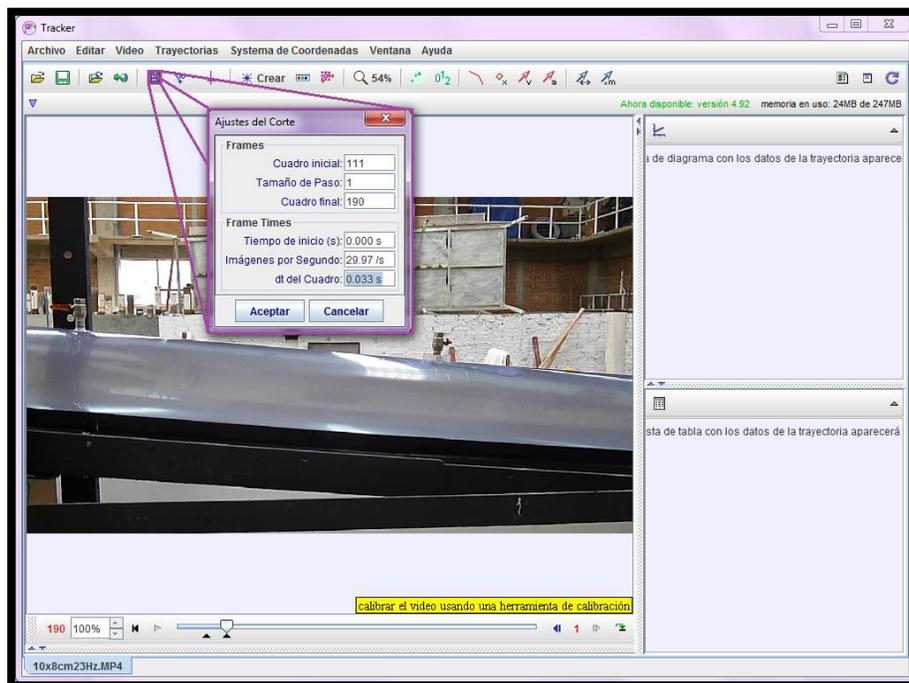


Figura 4.13 Ajustes de cortes.

En el cuadro inicial y el cuadro final, se pondrán respectivamente el tiempo de inicio y final del video que se está analizando.

A continuación se debe calibrar el video eligiendo una longitud conocida, esto se realiza con la ayuda de la vara de calibración que se encuentra en la barra de herramientas y cuyo icono se observa en la figura 4.14.

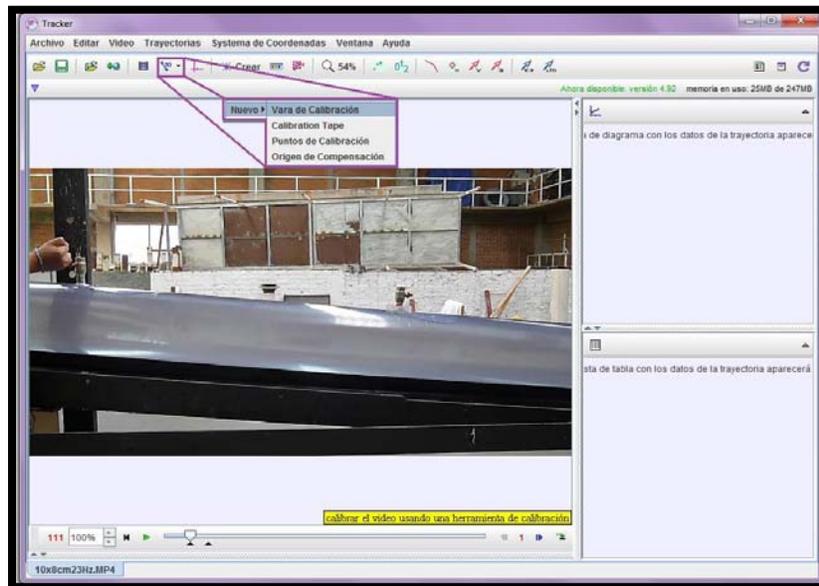


Figura 4.14 Selección de vara de calibración

Una vez que se ha dado clic en la opción de “vara de calibración”, aparecerá dicha vara de color azul, como se puede apreciar en la figura 4.15, donde posteriormente se recomienda modificar su valor por una medida real conocida (para el estudio experimental se tomaron las medidas de 96 cm, 120 cm y 122 cm, dependiendo del tramo que era analizado).

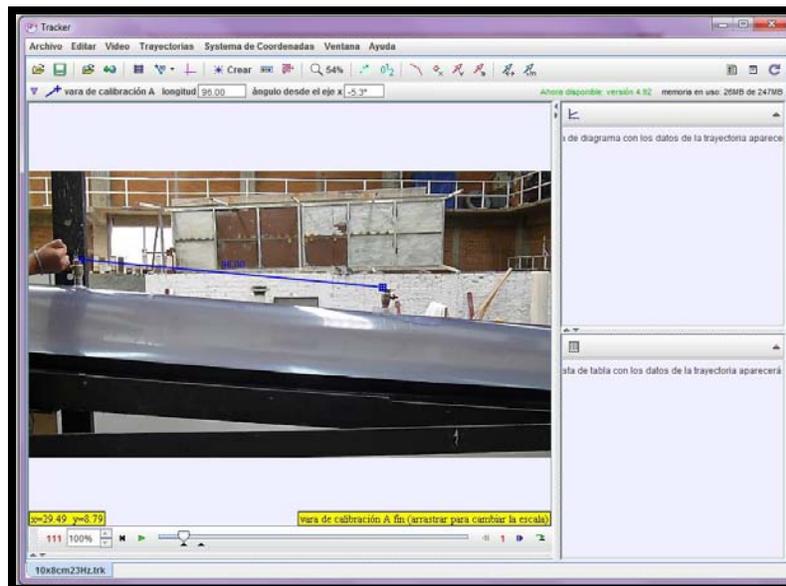


Figura 4.15 Colocación de la vara de calibración



Seguidamente se debe poner los ejes coordenados, estos se obtienen dando clic en el siguiente icono , de la barra de herramientas.

Una vez que aparecieron, se seleccionan y se llevan a un punto de origen, dándoles el ángulo deseado. Ver figura 4.16.

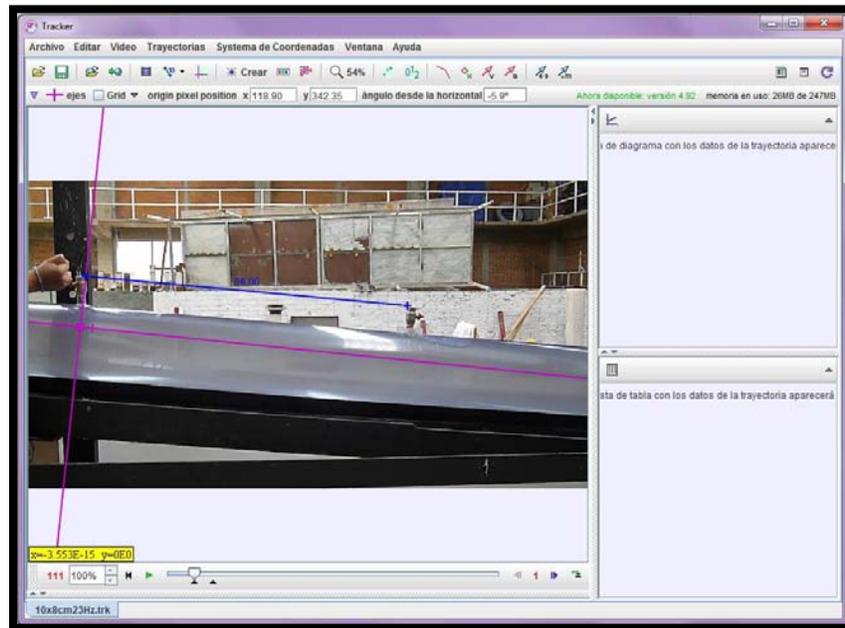


Figura 4.16 Colocación de los ejes coordenados

4.3.2 SEGUIMIENTO MANUAL:

El tracker cuenta con dos tipos de seguimientos para realizar el análisis, manual y automático (autotracker). Para este experimento se optó por la primera opción, debido a que el objeto a analizar (burbuja) no cuenta con una orientación, tamaño y forma definidos, haciendo imposible rastrearlo automáticamente.

Para hacer uso de esta opción, lo primero que se debe realizar es crear el seguimiento, para ello, en la barra de menú, se le da clic en la opción trayectorias, como se muestra en la figura 4.17:

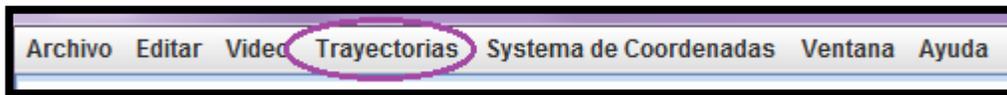


Figura 4.17 Opción trayectorias en la barra de herramientas

De ahí se desplegará un menú donde se da clic en “nuevo” y después se selecciona “masa puntual”. Ver figura 4.18.

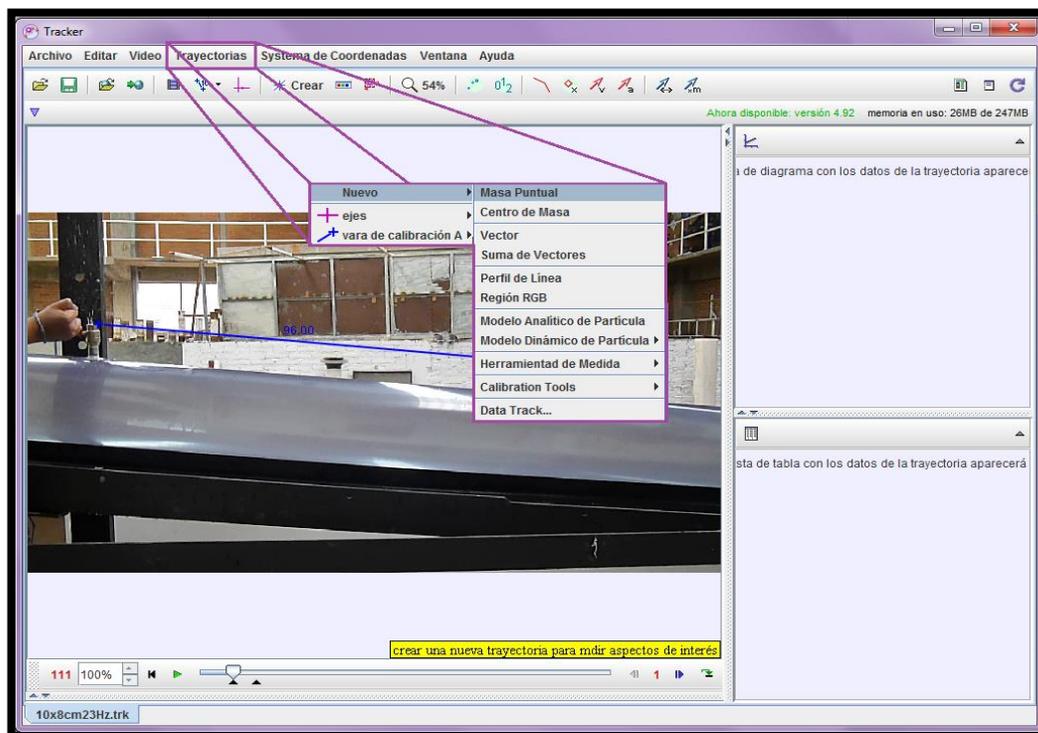


Figura 4.18 Opción de masa puntual

Aparecerá la ventana de masa puntual y se extenderá una lista de opciones (nombre, notas, color, huella, entre otras) las cuales son editables, para este estudio solo se modificó el nombre y color. Observar figura 4.19.

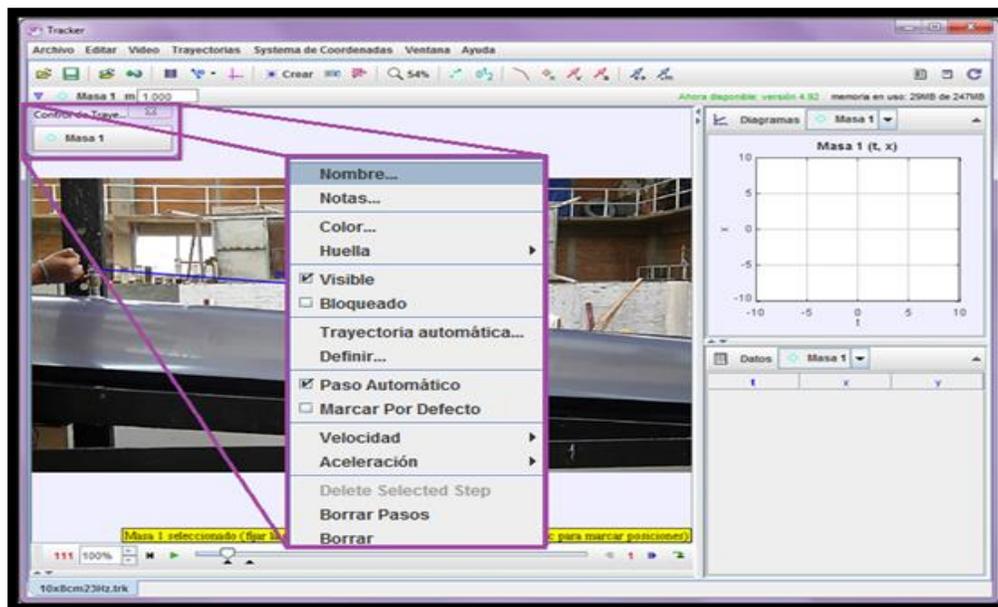


Figura 4.19 Opciones modificables de la masa puntual

Antes de comenzar con el seguimiento manual, se debe modificar tanto la vista de gráficos como la vista de tablas, con el objetivo de seleccionar las variables que se deseen estudiar. Para este estudio se agregó en la vista de gráficos un diagrama más, con el fin de tener la gráfica de la velocidad en el eje x (v_x) contra en tiempo, además se modificó el primer diagrama para obtener la magnitud de velocidad (v) contra el tiempo. Para agregar otro gráfico, se da clic a la pestaña de diagramas y selecciona el número 2. Véase figura 4.20.

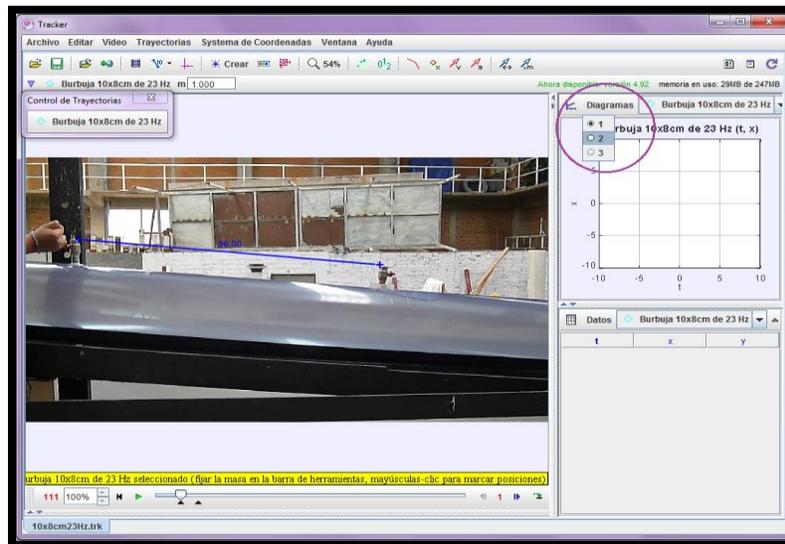


Figura 4.20 Selección de los gráficos

Para obtener las gráficas de las variables que se están analizando contra el tiempo, se da clic en el eje “y”, con esto se desprende una lista de opciones donde, para este experimento se seleccionó “magnitud de velocidad” y “componente en x de la velocidad”, como se observa en la figura 4.21.

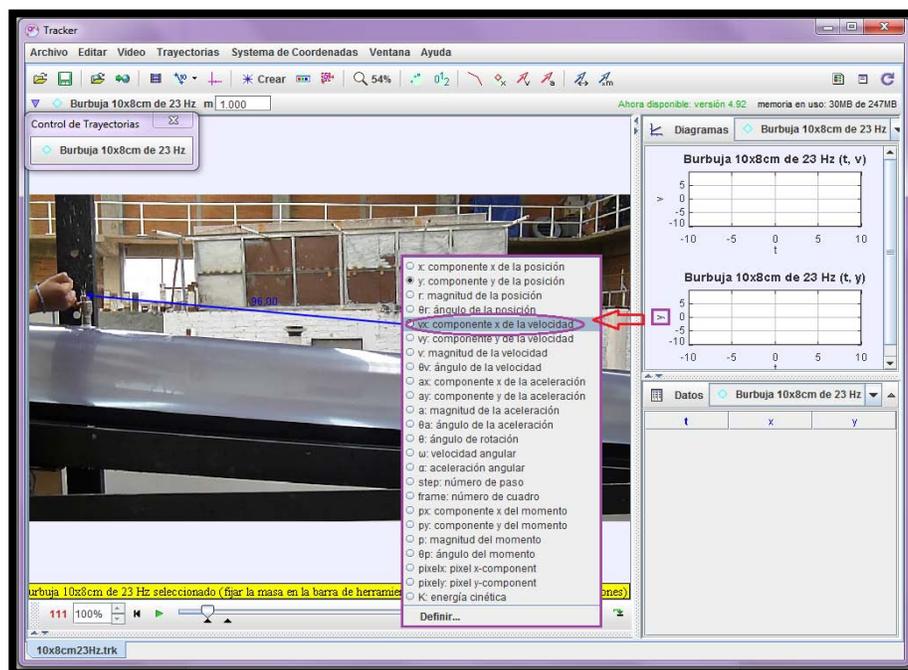


Figura 4.21 Elección de las variables de interés



Para modificar la vista de tablas (véase figura 4.22), con los datos que se necesitan (v_x y v_y), sólo se oprime el botón datos, ahí aparece la pestaña “columnas de la tabla visibles” donde se selecciona los elementos que se necesitan y se oprime el botón cerrar, automáticamente se guardan los cambios.

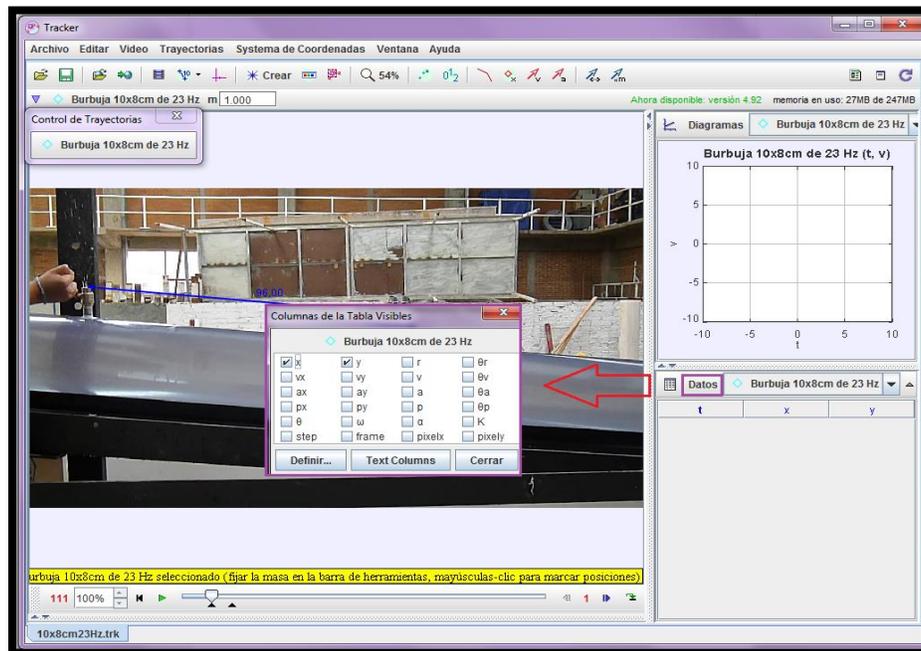


Figura 4.22 Selección de las tablas de datos

Ya que sean realizado los cambios necesarios, se procede a realizar el análisis, para esto se debe ubicar en el objeto a estudiar (burbuja) y con el botón izquierdo del mouse y la tecla “shift” presionados al mismo tiempo, se comienza el análisis, el video avanzará automáticamente al próximo cuadro donde se deberá repetir el mismo procedimiento de la tecla “shift” y el botón izquierdo del mouse hasta finalizar todos los cuadros del video.

Es muy importante no saltarse cuadros, ya que, de lo contrario las velocidades y aceleraciones no podrán ser determinadas.

Una vez terminado el análisis también aparecen los datos en las ventanas de gráficos y tablas. Observar figura 4.23.

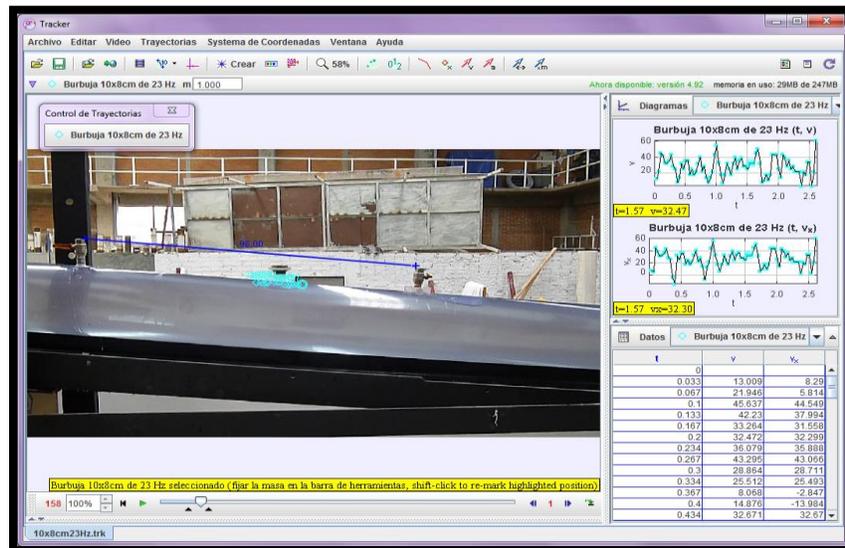


Figura 4.23 Gráficas y tablas obtenidas al final del análisis

4.3.3 IMPORTARCIÓN DE GRAFICOS, IMÁGENES Y DATOS:

Para copiar los gráficos o incluso una imagen del video, se debe colocar el puntero sobre el elemento a copiar, se oprime el botón derecho del mouse e inmediatamente se desplegara una lista donde se escogerá copiar imagen, tal como se observa en la figura 4.24.

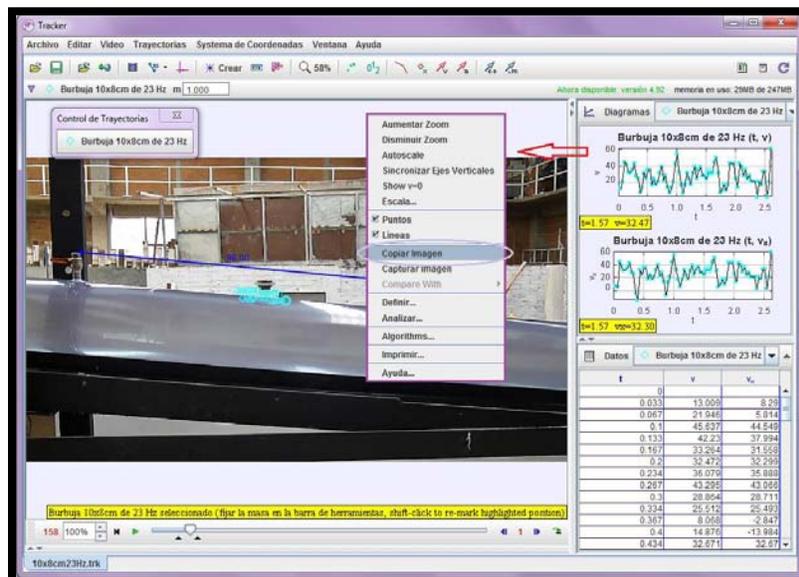


Figura 4.24 Opción para copiar una imagen



Si lo que se desea copiar son los datos de las tablas (véase figura 4.25), selecciona todas las tablas y sus elementos, se oprime el botón derecho del mouse y se escoge la opción “copiar datos seleccionados” y después se selecciona “precisión total”.

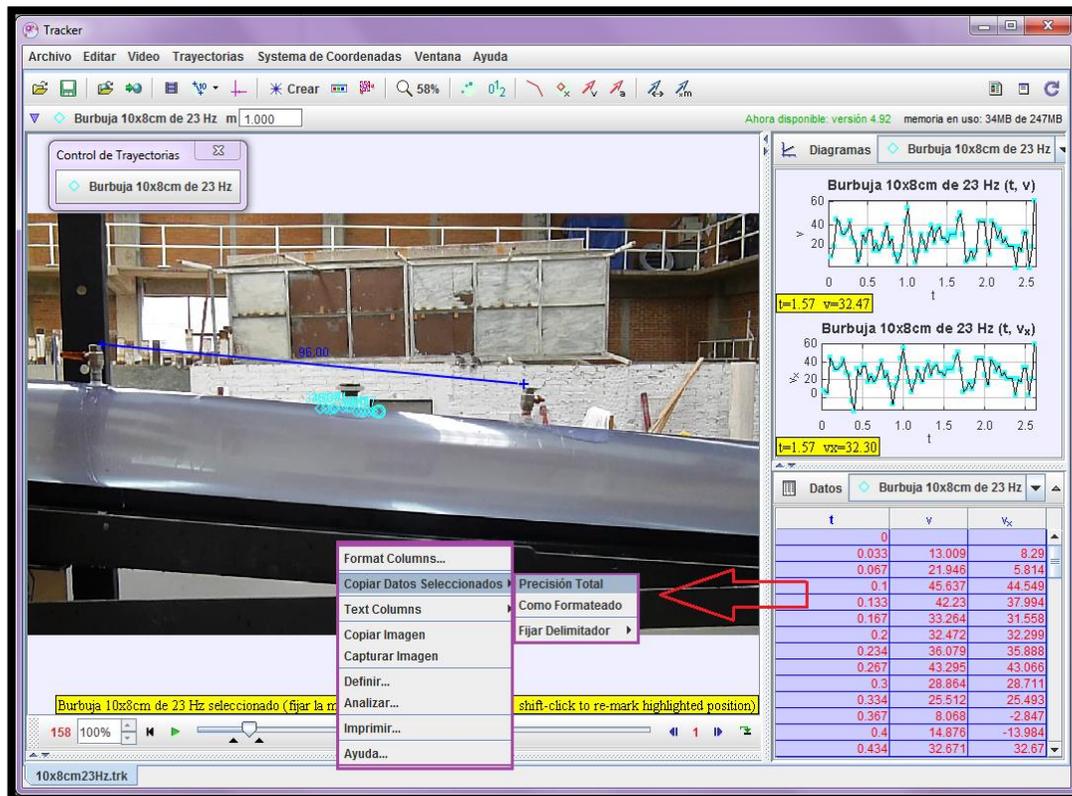


Figura 4.25 Opción para copiar tablas

4.3.4 GUARDAR ARCHIVO:

Por último, para guardar el archivo, se va a la barra de herramientas y se oprime en el icono de guardar, como se observa en la figura 4.26.



Figura 4.26 Icono de guardar archivo

Se desplegará la siguiente ventana (vea figura 4.27) donde se elegirá el nombre del archivo con la extensión .trk y la ubicación.

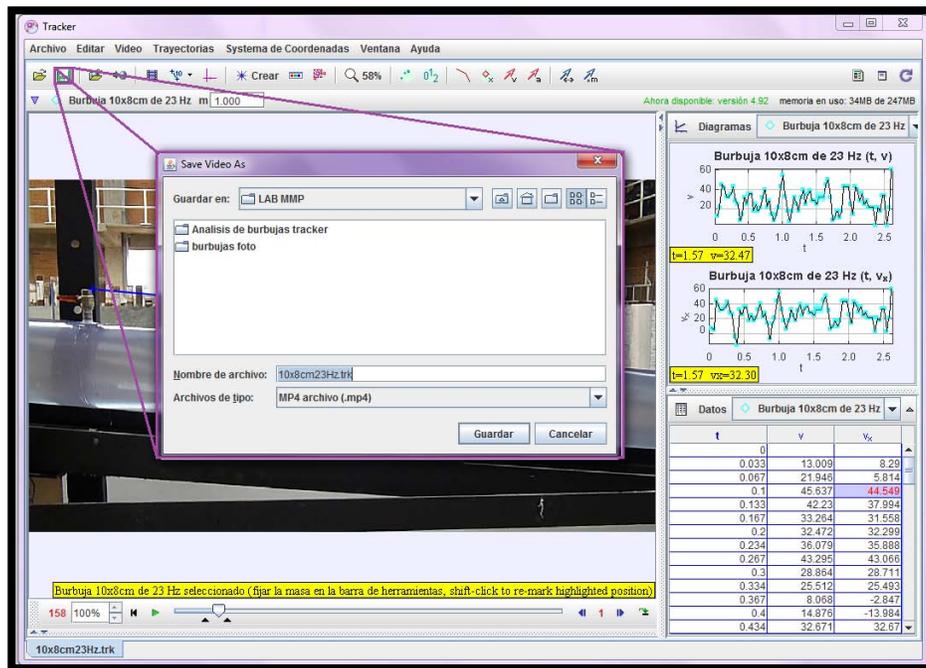


Figura 4.27 Guardar archivo

4.4 OBTECIÓN DE LA VELOCIDAD DE LAS BURBUJAS

Una vez que se realizó el seguimiento de la burbuja mediante el programa tracker, se procede a la obtención de la velocidad de las burbujas de aire.

Para ello se copian los datos de las tablas generadas por el programa y se pegan en una hoja de Excel (ver tabla 4.1). El programa tracker proporciona una velocidad instantánea, que puede variar si la burbuja se acelera o frena. Por lo tanto, se debe obtener un valor promedio o velocidad media, que va a ser considerada como la velocidad de la burbuja.



TABLA 4.1 Velocidades de la burbuja 10x8cm de $Q = 22.45$ l/s, $S = 0.103$ ($\theta = 5.9^\circ$)

Número de cuadros	Burbuja 10x8 cm, $Q=22.45$ l/s		
	t	v(x)	v
	0.00		
1	0.03	49.85	50.04
2	0.07	83.18	83.58
3	0.10	66.65	67.11
4	0.13	49.99	50.33
5	0.17	28.54	29.15
6	0.20	40.87	41.16
7	0.23	10.82	14.15
8	0.27	6.56	6.58
9	0.30	42.90	42.90
10	0.33	34.70	34.70
11	0.37	24.86	24.90
12	0.40	19.28	20.35
13	0.43	38.24	38.41
14	0.47	45.20	45.89
15	0.50	29.65	29.66
16	0.53	37.98	37.98
17	0.57	39.36	39.48
18	0.60	26.11	26.37
19	0.63	4.39	8.23
20	0.70	23.48	23.95
21	0.73	33.32	33.55
22	0.77	24.47	24.73
23	0.80	31.16	31.26
24	0.83	38.51	39.10
25	0.87	24.73	24.73
26	0.90	42.77	42.81
27	0.93	49.20	49.35
28	0.97	25.98	26.53
29	1.00	24.86	24.90
30	1.03	14.50	15.17
31	1.07	11.35	11.63
32	1.10	23.48	23.95
33	1.13	25.26	26.01
34	1.17	24.99	25.17
35	1.20	39.09	39.62
36	1.23	44.28	44.42
37	1.27	26.37	26.37
38	1.30	26.50	26.53
39	1.33	26.76	27.13
40	1.37	24.73	24.73
41	1.40	36.21	36.23
42	1.43	23.09	23.09
43	1.47	10.95	13.26
44	1.50	20.20	20.81
45	1.53	31.95	32.78
46	1.57	25.84	26.78
47	1.60	22.83	23.09
48	1.63	39.62	39.62
49	1.67	31.29	31.30
50	1.70	26.76	27.13
51	1.74	61.20	61.23
52	1.77	52.48	52.64
53	1.80	23.22	23.27
54	1.84	23.09	23.09
55	1.87	35.95	36.23
56	1.90	22.96	23.03
57	1.94	19.94	20.01
58	1.97	42.90	42.90
59	2.00	26.11	26.37
60	2.04	16.27	16.53
61	2.07	41.26	41.26
62	2.10	50.97	51.03
63	2.14	38.11	38.16
64	2.17	41.26	41.26
65	2.20	44.28	44.42
66	2.24	34.96	35.17
67	2.27	36.73	37.12
68	2.30	23.09	23.09
69	2.34	24.34	24.90
70	2.37	29.52	29.61
71	2.40	26.50	26.53
72	2.44	19.94	20.01
73	2.47	11.08	12.53
74	2.50	24.60	24.68
75	2.54	23.22	23.27
76	2.57	28.27	28.40
77	2.60	36.73	37.12
SUMA=		2412.64	2440.58
V=		31.33	31.70



Para obtener la velocidad media, se suman todas las velocidades instantáneas obtenidas y se divide entre el número de cuadros (exceptuando las velocidades iguales a cero) tal como se muestra en el siguiente ejemplo.

Ejemplo 1. Burbuja de 10 cm de largo y 8 cm de ancho, $Q = 22.45$ l/s, y $S = 0.103$ (donde $S = \tan \theta$, $\theta = 5.9^\circ$)

PARA LA VELOCIDAD EN "X":

Numero de cuadros: 77

Sumatoria de velocidades instantáneas: 2440.58 cm/s

Velocidad media en x:

$$\frac{2440.58 \text{ cm/s}}{77} = 31.70 \text{ cm/s}$$

Realizando la conversión a metros se obtiene: $V_x = 0.3170$ m/s

Este procedimiento se realizó para todas las burbujas analizadas en las tres pendientes estudiadas y para los diferentes gastos probados. El resumen de resultados se presenta de la tabla 4.2 a la tabla 4.4.



TABLA 4.2 Velocidades de la burbujas con pendiente $S = 0$ ($\theta = 0^\circ$)

GASTO (m^3/s)	TAMAÑO DE BURBUJA (cm)	VELOCIDAD SOFTWARE TRACKER (m/s)
0.0189	5 X 5	0.357
	7 x 5	0.237
	8 x 6	0.237
	9 x7	0.277
	10 x 8	0.276
	15 x 11	0.144
	15 x 13	0.209
0.0224	22 x 19	0.124
	9 x 7	0.230
	13 x 9	0.258
0.0236	21 x 10	0.240
	19 X 17	0.201
	21 X 18	0.176
0.0247	22 X 19	0.185
	20 X 18	0.230
0.0258	21 X 19	0.204
	19 X 17	0.174
0.0268	21 X 18	0.187
	22 X 18	0.230
	25 X 16	0.197
	32 X 14	0.210

TABLA 4.3 Velocidades de la burbujas con pendiente $S = 0.061$ ($\theta = 3.5^\circ$)

GASTO (m^3/s)	TAMAÑO DE BURBUJA (cm)	VELOCIDAD SOFTWARE TRACKER (m/s)
0.0247	8 x 7	0.358
	8 X 8	0.341
	10 X 8	0.379
	23 X 17	0.017
	26 X 19	0.247
0.0268	11 x 9	0.291
	13 x 10	0.276
	20 x 18	0.196
	25 x 15	0.029
0.0288	25 x 16	0.011
	11 x 17	0.259
	12 x 10	0.213
	25 x 14	0.015
0.0306	28 x 21	0.008
	10 x 9	0.314
	13 x 10	0.240
0.0323	15 x 10	0.165
	15 x 14	0.403
0.0338	18 x 15	0.136
	17 x 15	0.286
0.0352	26 x 17	0.207
	8 X 7	0.491
	11 x 9	0.321
	13 x 10	0.325
	15 x 10	0.347
	20 x 17	0.301

TABLA 4.4 Velocidades de las burbujas con pendiente $S = 0.103$ ($\theta = 5.9^\circ$)

GASTO (m ³ /s)	TAMAÑO DE BURBUJA (cm)	VELOCIDAD SOFTWARE TRACKER (m/s)
0.0189	20 x 15	0.013
	18 x 16	0.013
0.0213	20 x 15	0.006
	8 x 8	0.318
	5 x 5	0.418
0.0224	10 x 8	0.313
	13 x 10	0.320
0.0268	27 x 17	0.012

4.5 OBTENCIÓN DE LA VELOCIDAD DE REMOCIÓN

Las velocidades de remoción para las cuales las burbujas de aire son removidas de la tubería, se obtuvieron con la ecuación de continuidad (ecuación 4.1), es decir se dividió el gasto de agua que fluía por la sección de medición entre el área de la sección transversal de la tubería.

$$v = \frac{Q}{A} \tag{4.1}$$

Posteriormente al cálculo de la velocidad de remoción se obtiene el parámetro de velocidad adimensional o también llamado número de Froude de la tubería (ecuación 4.2).

$$\frac{v}{(gD)^{0.5}} \tag{4.2}$$

Retomando el ejemplo de la burbuja de 10 x 8 cm, $Q = 22.45$ l/s, con pendiente $S = 0.103$, del apartado anterior se tiene:



DATOS:

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$D = 0.20 \text{ m}$$

$$Q = 0.02245 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$A = 0.0314 \text{ m}^2$$

$$v = 0.7143 \text{ m/s}$$

Sustituyendo los datos:

$$\frac{v}{(gD)^{0.5}}$$

$$\frac{0.7143 \text{ m/s}}{[(9.81 \text{ m/s}^2)(0.20 \text{ m})]^{0.5}} = 0.509$$

En la tabla 4.5 se muestra el parámetro de velocidad adimensional o número de Froude de la tubería, para todas las pruebas experimentales realizadas.

TABLA 4.5 Velocidades de remoción para las burbujas de aire y parámetro de velocidad adimensional.

VELOCIDAD DE GIRO (HERTZ)	GASTO (m ³ /s)	VELOCIDAD DE REMOCIÓN (m/s)	$v/(gD)^{0.5}$
22	0.0189	0.6005	0.4287
22.5	0.0213	0.6767	0.4831
23	0.0224	0.7143	0.5099
23.5	0.0236	0.7512	0.5363
24	0.0247	0.7866	0.5616
24.5	0.0258	0.8209	0.5861
25	0.0268	0.8540	0.6097
26	0.0288	0.9166	0.6544
27	0.0306	0.9744	0.6957
28	0.0323	1.0276	0.7336
29	0.0338	1.0759	0.7681
30	0.0352	1.1196	0.7993

4.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LAS VELOCIDADES.

La finalidad de obtener las velocidades de remoción para las burbujas de aire analizadas, es poder compararlas con las velocidades de remoción encontradas por varios autores que han estudiado este fenómeno.

En la figura 4.28 se muestran los resultados de los diferentes investigadores así como los resultados obtenidos en este estudio experimental.

Es importante mencionar, que para este trabajo como en muchas otras investigaciones se aprovechó la ventaja de graficar los resultados en forma adimensional, es decir, el parámetro de velocidad adimensional o número de Froude $v/(gD)^{0.5}$ en función de $(S)^{0.5}$. Al utilizar la raíz cuadrada de la pendiente, se obtienen líneas rectas lo cual simplifica el análisis.

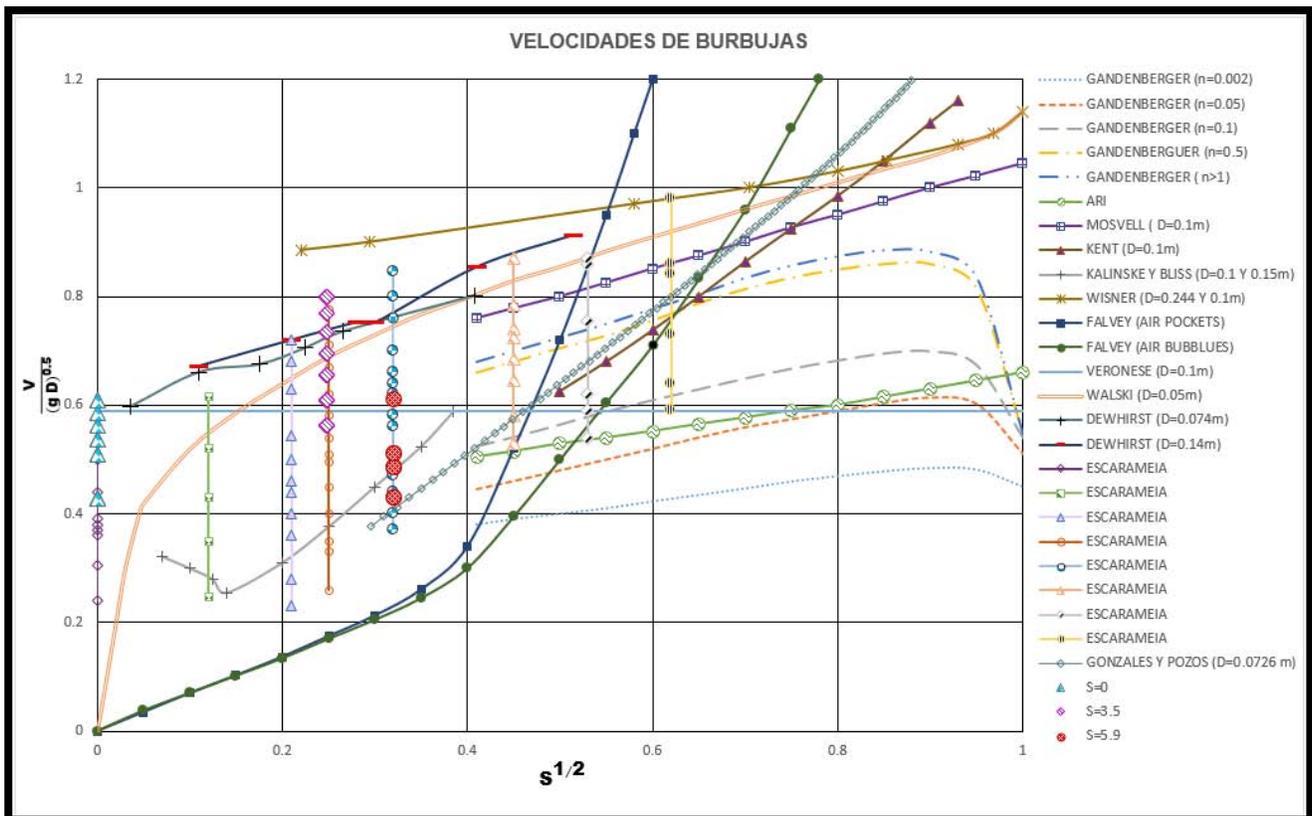


Figura 4.28 Comparación de velocidades.



En la gráfica de la figura 4.28, se observa que los resultados experimentales están dentro del rango de los resultados obtenidos por otros autores. Los datos tienen una tendencia muy similar a los obtenidos por Escarameia (2007).

También se observa que Veronesse (1937) encontró una velocidad de remoción igual a 0.59 m/s, mas no se tiene información de cuales pendientes utilizó para su experimento.

Gandenberger (1957) señala que la velocidad de remoción aumenta conforme aumenta el tamaño de la burbuja hasta $n=1$, pero a partir de ahí se volverá constante.

Mientras tanto Kent (1952) comenta que la velocidad mínima requerida para arrastrar la burbuja no dependerá de su volumen y Kalinke y Bliss (1943) encontraron que la velocidad de remoción disminuye a medida que la pendiente aumenta.

Wisner et al (1975) dedujeron que la velocidad de remoción no puede convertirse en una constante (como es el caso de Veronesse) con el aumento del diámetro, pero si disminuye si el diámetro también lo hace, además encontraron que la longitud de la burbuja disminuye cuando $D > 100\text{mm}$.

Por último la gráfica de Mosvell (1976) es sólo una curva de ajuste de los experimentos de Kent (1952).

Al realizar el análisis global de la gráfica se observa que los resultados obtenidos por cada investigador son diferentes entre sí, esto debido a que cada uno tomó diferentes parámetros para sus estudios experimentales, además se observa que la velocidad de la burbuja para ser expulsada está afectada por la velocidad de remoción del agua y por la fuerza de flotación de la burbuja. Deduciendo así, que la velocidad de remoción y su fuerza de arrastre asociada debe ser mayor a la fuerza de flotación para poder expulsar a la burbuja.

Es importante mencionar que los resultados obtenidos en la investigación experimental coinciden con los de Escarameia (2007), que fueron realizados en un dispositivo con diámetro

de 150 mm. Es decir, de haber obtenido alguna ecuación para evaluar la velocidad de remoción de las burbujas de aire, se hubiera obtenido prácticamente la misma expresión que la propuesta por la autora.

Escarameia (2007) comenta que la ecuación que propone para encontrar la velocidad de remoción de las burbujas de aire, puede ser utilizada con una confianza razonable para tuberías de hasta 1 metro de diámetro interior. En el mismo sentido, Pothof y Clemens (2010); Pothof y Clemens (2011) y Pothof (2011) afirman que los efectos de tensión superficial en un flujo de agua-aire en conductos cerrados pueden ser despreciados cuando la tubería tiene un diámetro interior mayor que 191 mm. Por lo tanto, con los resultados obtenidos durante el estudio experimental en una tubería de 200 mm, se puede afirmar que la ecuación de Escarameia es útil y confiable para analizar o diseñar conductos cerrados con pendientes suaves ($\theta < 22.5^\circ$ ó $S = 0.414$) con diámetros interiores mayores a un metro.

Por lo tanto, con base en lo antes comentado se puede utilizar la ecuación de Escarameia (2007) para el diseño y análisis de conductos circulares cerrados de las obras de toma de presas, que comúnmente son de pendientes suaves y diámetros grandes.

4.7 VOLUMEN DE LAS BURBUJAS

Para el cálculo del volumen de las burbujas de aire se utilizó la gráfica propuesta por Townson (1991), figura 4.29.

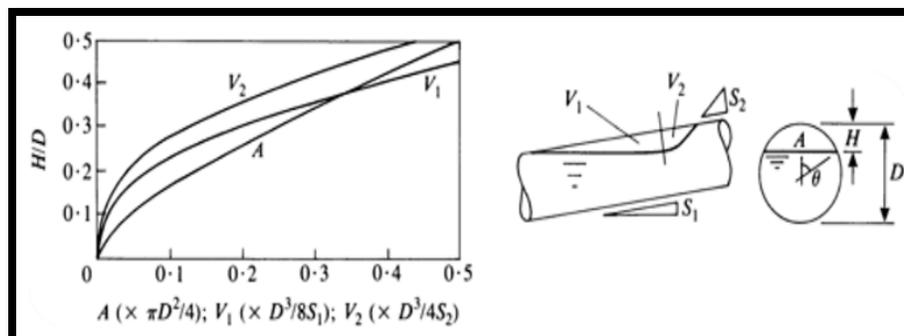


Figura 4.29 Volumen de una burbuja (Townson, 1991).



Para poder utilizar la ecuación de Townson (1991), se necesitan los valores de S_1 , S_2 y H , para la obtención de S_1 , S_2 se requirió conocer θ_1 , θ_2 , recordando que para los cálculos de esta tesis se considera que $S = \tan(\theta)$, para ello se realizó la captura de imagen para cada burbuja del estudio y se exportaron al programa AUTOCAD, como se puede observar en la figura 4.30.

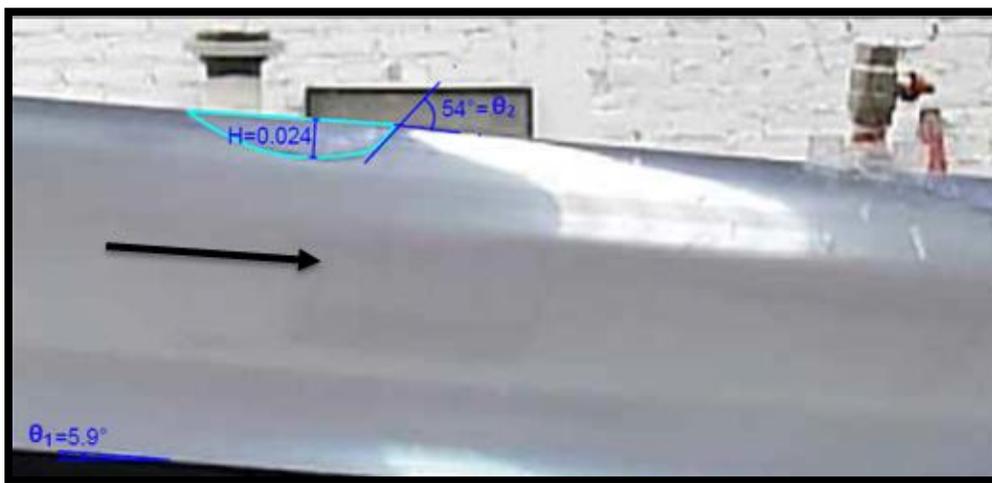


Figura 4.30 Valores de θ_1 , θ_2 y H de la burbuja 10x8 cm, $Q = 22.45$ l/s, $S (5.9^\circ) = 0.103$

Una vez obtenidos los datos se pasaron a una tabla de Excel, donde se obtiene la relación H/D , dato que se utiliza para la gráfica de la figura 4.29.

		DATOS OBTENIDOS CON EL PROGRAMA AUTOCAD		
GASTO (m^3/s)	TAMAÑO DE BURBUJA (cm)	θ_1 (Grados)	θ_2 (Grados)	H (m)
0.0224	10 x 8	5.9	54	0.024
	13 x 10	5.9	69	0.026



Siguiendo con el ejemplo del apartado anterior se mostrará cómo obtener el volumen paso a paso.

Una vez que se tienen los datos, obtenemos las pendientes $S_1 = \tan(\theta_1)$ y $S_2 = \tan(\theta_2)$.

$$\theta_1 = 5.9^\circ$$

$$\tan(\theta_1) = S_1 = 0.103$$

Y para:

$$\theta_2 = 54^\circ$$

$$\tan(\theta_2) = S_2 = 1.376$$

Posteriormente obtendremos H/D

Para el ejemplo se tiene:

Datos:

$$D = 0.20 \text{ m}$$

$$H = 0.024 \text{ m}$$

$$H/D = \frac{0.024 \text{ m}}{0.20 \text{ m}} = 0.215$$

Con este valor de la gráfica (figura 4.31) se obtienen los volúmenes V_1 y V_2 y el área A.

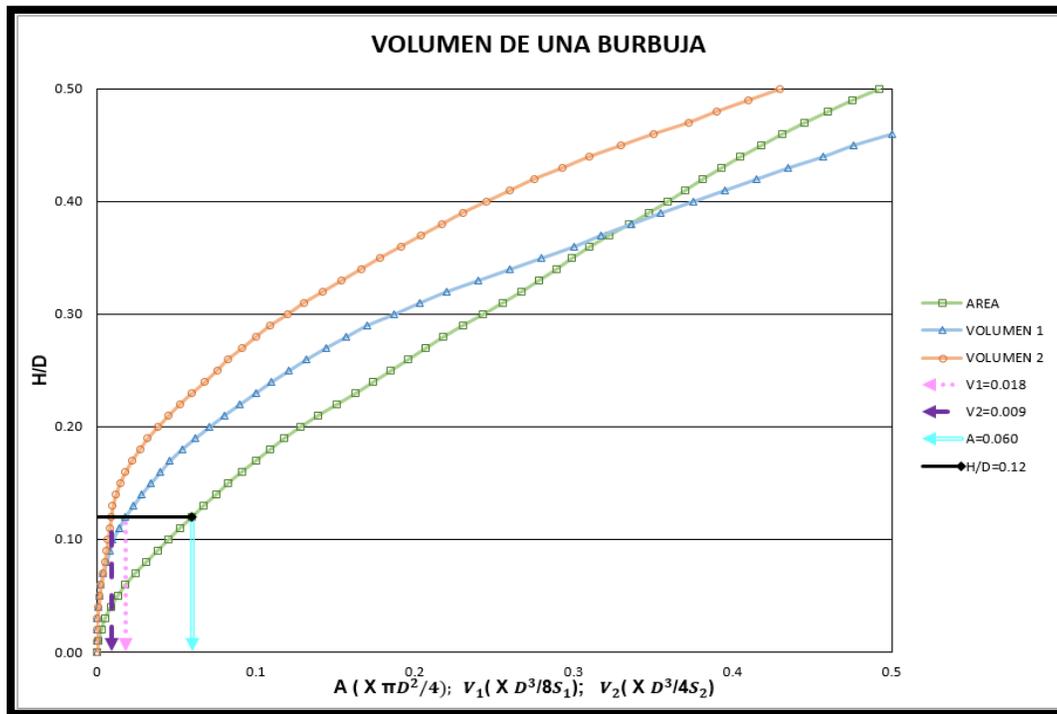


Figura 4.31 Obtención de los valores V_1 , V_2 Y H/D de la burbuja 10x8 cm, $Q = 22.45$ l/s

Posteriormente con las ecuaciones propuesta por Townson (1991) obtenemos V_{1REAL} , V_{2REAL} Y A_{REAL} de la burbuja como se muestra a continuación:

DATOS:

$D=0.20$ m

$S_1=5.9^\circ$

$S_2=54^\circ$

$A_0=0.035$ m²

Para calcular el área se utiliza la ecuación (4.3):

$$A_{REAL} = A_0 \frac{\pi D^2}{4} \quad (4.3)$$



Sustituyendo los valores

$$A = (0.035) \frac{\pi(0.20 \text{ m})^2}{4}$$

$$A = 0.0019 \text{ m}^2$$

Ahora el volumen 1 se obtiene con la ecuación (4.4):

$$V_{1 \text{ REAL}} = V_1 \left(\frac{D^3}{8S_1} \right) \quad (4.4)$$

Sustituyendo:

$$V_1 = 0.018 \left(\frac{0.20^3}{8(0.103)} \right)$$

$$V_1 = 0.00017 \text{ m}^3$$

V_2 se obtuvo con la ecuación (4.5):

$$V_{2 \text{ REAL}} = V_2 \left(\frac{D^3}{4S_2} \right) \quad (4.5)$$

Sustituyendo:

$$V_2 = 0.009 \left(\frac{0.20^3}{4(1.376)} \right)$$

$$V_2 = 0.000013 \text{ m}^3$$



El volumen total de la burbuja es la suma de los volúmenes V_1 y V_2 (ecuación 4.6):

$$V_T = V_1 + V_2 \quad (4.6)$$

$$V_T = 0.00174 \text{ m}^3 + 0.000013 \text{ m}^3$$

$$V_T = 0.00019 \text{ m}^3$$

Y en litros sería:

$$V_T = 0.19 \text{ litros.}$$

Este proceso se realiza para cada burbuja de una de las burbujas, cuyos valores de los volúmenes de aire se muestran en las siguientes tablas:

TABLA 4.6 Volúmenes de las bolsas de aire, $S = 0$ ($\theta = 0^\circ$)

GASTO (m^3/s)	TAMAÑO DE BURBUJA (cm)	VOLUMEN (L)
0.0189	5 X 5	0.029
	7 x 5	0.047
	8 x 6	0.066
	9 x 7	0.074
	10 x 8	0.126
	15 x 11	0.162
	15 x 13	0.167
0.0224	22 x 19	0.187
	9 x 7	0.085
	13 x 9	0.067
0.0236	21 x 10	0.197
	19 X 17	0.161
	21 X 18	0.228
0.0247	22 X 19	0.274
	20 X 18	0.124
0.0258	21 X 19	0.145
	19 X 17	0.191
0.0268	21 X 18	0.442
	22 X 18	0.129
	25 X 16	0.323
	32 X 14	0.372

TABLA 4.7 Volúmenes de las bolsas de aire, $S = 0.061$ ($\theta = 3.5^\circ$).

GASTO (m^3/s)	TAMAÑO DE BURBUJA (cm)	VOLUMEN (L)
0.0247	8 x 7	0.102
	8 X 8	0.137
	10 X 8	0.172
	23 X 17	2.479
	26 X 19	2.551
0.0268	11 x 9	0.105
	13 x 10	0.161
	20 x 18	0.694
	25 x 15	1.223
	25 x 16	1.233
0.0288	11 x 17	0.123
	12 x 10	0.642
	25 x 14	1.575
	28 x 21	2.726
0.0306	10 x 9	0.172
	13 x 10	0.179
	15 x 10	1.032
0.0323	15 x 14	1.102
	18 x 15	1.893
0.0338	17 x 15	0.549
	26 x 17	1.575
0.0352	8 X 7	0.788
	11 x 9	0.869
	13 x 10	1.026
	15 x 10	1.207
	20 x 17	1.880

TABLA 4.8 Volúmenes de las bolsas de aire, $S = 0.103$ ($\theta = 5.9^\circ$).

GASTO (m^3/s)	TAMAÑO DE BURBUJA (cm)	VOLUMEN (L)
0.0189	20 x 15	0.671
	18 x 16	0.773
0.0213	20 x 15	0.359
	8 x 8	0.027
	5 x 5	0.023
0.0224	10 x 8	0.190
	13 x 10	0.230
0.0268	27 x 17	3.610



4.8 CÁLCULO DE LAS FUERZAS DE ARRASTRE, FLOTACIÓN Y GRAVEDAD

Cuando una burbuja/bolsa de aire se encuentra en un tramo de tubería con pendiente descendente, el agua trata de moverla hacia aguas abajo. Si una burbuja o una bolsa de aire es lo suficientemente grande, la fuerza de flotación de la burbuja/bolsa podría igualar la fuerza de arrastre del agua, entonces ésta permanecería estacionaria en la tubería, de esta manera la fuerza de fricción tiende a cero. Las fuerzas actuantes en una burbuja/bolsa de aire se muestran en la figura 4.32.

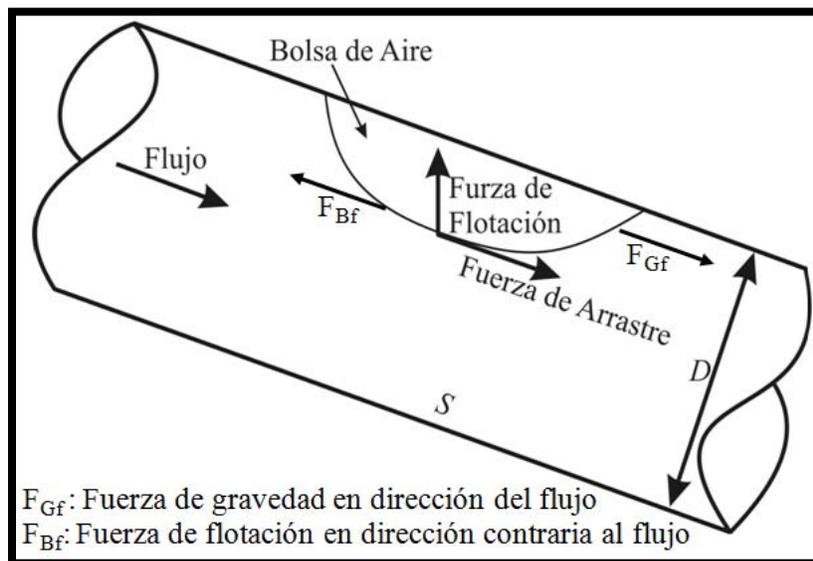


Figura 4.32 Fuerzas que actúan en una burbuja/bolsa de aire estacionaria en un tramo de tubería descendente con flujo de agua a tubo lleno

4.8.1 FUERZA DE ARRASTRE

Para obtener la fuerza de arrastre F_A en la dirección del flujo de agua se utiliza la ecuación (4.7) propuesta por Walski et al (1994).

$$F_a = C_a L w \rho V^2 / 2 \quad (4.7)$$



Donde L es el largo de la burbuja (m), w es el ancho de la burbuja (m), ρ es densidad del fluido (1000 kg/m^3), V es la diferencia entre la velocidad de remoción y la velocidad de la burbuja (m/s) y C_a es el coeficiente de arrastre y se obtiene con la ecuación (4.8) propuesta por Kent (1952):

$$C_a = 0.76 \left(\frac{L}{D} \right)^{1.11} \quad (4.8)$$

Donde L es el largo de la burbuja (m) y D es el diámetro interior del conducto (m).

4.8.2 FUERZA DE FLOTACIÓN

La componente de la fuerza de flotación de la burbuja en la dirección contraria al flujo se calcula con la ecuación (4.9) propuesta por Walski et al (1994), la cual se muestra a continuación:

$$F_{Bf} = \rho g L w H S \quad (4.9)$$

Donde H = es la altura máxima de la burbuja (m) (ver figura 4.30) y S es la pendiente del conducto ($S = \tan(\theta)$).

Para el caso de la pendiente horizontal ($S = 0$), utilizamos la expresión (4.10) para evaluar la fuerza de flotación.

$$F_B = \rho g V \quad (4.10)$$

Donde V es el volumen de la burbuja en (m^3).

4.8.3 FUERZA DE GRAVEDAD



Con la ecuación (4.11) propuesta por Walski et al. (1994) se obtiene la componente de la fuerza de gravedad.

$$F_{Gf} = \rho_g g L w H S \quad (4.11)$$

Donde ρ_g es densidad de la burbuja (1.24 kg/m^3).

Cuando se presentó la pendiente horizontal ($S = 0$), se utilizó la ecuación (4.12) para obtener la fuerza de gravedad.

$$F_G = \rho_g g V \quad (4.12)$$

A continuación se muestran las tablas con los resultados de las fuerzas antes mencionadas.

TABLA 4.9 Fuerzas de arrastre, flotación y gravedad $S = 0$ ($\theta = 0^\circ$)

Longitud de la burbuja L (m)	Ancho de la burbuja w (m)	Velocidad de remoción (m/s)	Velocidad Tracker (m/s)	H (m)	FA (N)	F _{Bf} (N)	F _{Gf} (N)	F _B (N)	F _G (N)
0.05	0.05	0.600	0.357	0.019	0.01	0.00	0.00	0.28	0.0004
0.07	0.05	0.600	0.237	0.027	0.05	0.00	0.00	0.46	0.0006
0.08	0.06	0.600	0.237	0.029	0.09	0.00	0.00	0.64	0.0008
0.09	0.07	0.600	0.277	0.034	0.10	0.00	0.00	0.72	0.0009
0.10	0.08	0.600	0.276	0.041	0.15	0.00	0.00	1.24	0.0015
0.15	0.11	0.600	0.144	0.045	0.95	0.00	0.00	1.59	0.0020
0.15	0.13	0.600	0.209	0.046	0.83	0.00	0.00	1.64	0.0020
0.22	0.19	0.600	0.124	0.049	4.00	0.00	0.00	1.83	0.0023
0.09	0.07	0.714	0.230	0.034	0.23	0.00	0.00	0.83	0.0010
0.13	0.09	0.714	0.258	0.036	0.57	0.00	0.00	0.66	0.0008
0.21	0.10	0.714	0.240	0.038	1.89	0.00	0.00	1.93	0.0024
0.19	0.17	0.751	0.201	0.041	3.51	0.00	0.00	1.58	0.0020
0.21	0.18	0.751	0.176	0.040	5.02	0.00	0.00	2.24	0.0028
0.22	0.19	0.751	0.185	0.047	5.65	0.00	0.00	2.69	0.0033
0.20	0.18	0.787	0.230	0.038	4.23	0.00	0.00	1.21	0.0015
0.21	0.19	0.787	0.204	0.041	5.44	0.00	0.00	1.43	0.0018
0.19	0.15	0.821	0.174	0.039	4.28	0.00	0.00	1.87	0.0023
0.21	0.18	0.821	0.187	0.049	6.09	0.00	0.00	4.34	0.0054
0.22	0.18	0.854	0.230	0.036	6.51	0.00	0.00	1.26	0.0016
0.25	0.16	0.854	0.197	0.043	8.41	0.00	0.00	3.17	0.0039
0.32	0.14	0.854	0.210	0.045	11.90	0.00	0.00	3.65	0.0045



TABLA 4.10 Fuerzas de arrastre, flotación y gravedad $S = 0.061$ ($\theta = 3.5^\circ$).

Longitud de la burbuja L (m)	Ancho de la burbuja w (m)	Velocidad de remoción (m/s)	Velocidad Tracker (m/s)	H (m)	F _A (N)	F _{Br} (N)	F _{Gr} (N)	F _B (N)	F _G (N)
0.08	0.07	0.787	0.358	0.016	0.14	0.05	0.0001	0.06	0.0012
0.08	0.08	0.787	0.341	0.018	0.17	0.07	0.0001	0.08	0.0017
0.10	0.08	0.787	0.379	0.020	0.23	0.10	0.0001	0.10	0.0021
0.23	0.17	0.787	0.017	0.053	10.27	1.24	0.0015	1.49	0.0302
0.26	0.19	0.787	0.247	0.053	7.33	1.57	0.0019	1.53	0.0310
0.11	0.09	0.854	0.291	0.016	0.61	0.10	0.0001	0.06	0.0013
0.13	0.10	0.854	0.276	0.019	1.02	0.15	0.0002	0.10	0.0020
0.20	0.18	0.854	0.196	0.032	5.92	0.69	0.0009	0.42	0.0084
0.25	0.15	0.854	0.029	0.040	12.44	0.90	0.0011	0.73	0.0149
0.25	0.16	0.854	0.011	0.040	13.85	0.96	0.0012	0.74	0.0150
0.11	0.17	0.917	0.259	0.017	1.58	0.19	0.0002	0.07	0.0015
0.12	0.10	0.917	0.213	0.031	1.28	0.22	0.0003	0.39	0.0078
0.25	0.14	0.917	0.015	0.056	13.86	1.18	0.0015	0.95	0.0192
0.28	0.21	0.917	0.008	0.056	26.81	1.98	0.0024	1.64	0.0332
0.10	0.09	0.974	0.314	0.022	0.69	0.12	0.0001	0.10	0.0021
0.13	0.10	0.974	0.240	0.022	1.65	0.17	0.0002	0.11	0.0022
0.15	0.10	0.974	0.165	0.037	2.72	0.33	0.0004	0.62	0.0126
0.15	0.14	1.028	0.403	0.038	2.26	0.48	0.0006	0.66	0.0134
0.18	0.15	1.028	0.136	0.047	7.26	0.76	0.0009	1.14	0.0230
0.17	0.15	1.076	0.286	0.029	5.04	0.44	0.0006	0.33	0.0067
0.26	0.17	1.076	0.207	0.044	16.97	1.17	0.0014	0.95	0.0192
0.08	0.07	1.120	0.491	0.034	0.30	0.11	0.0001	0.47	0.0096
0.11	0.09	1.120	0.321	0.035	1.23	0.21	0.0003	0.52	0.0106
0.13	0.10	1.120	0.325	0.037	1.93	0.29	0.0004	0.62	0.0125
0.15	0.10	1.120	0.347	0.040	2.47	0.36	0.0004	0.72	0.0147
0.20	0.17	1.120	0.301	0.048	8.65	0.98	0.0012	1.13	0.0229

TABLA 4.11 Fuerzas de arrastre, flotación y gravedad $S = 0.103$ ($\theta = 5.9^\circ$).

Longitud de la burbuja L (m)	Ancho de la burbuja w (m)	Velocidad de remoción (m/s)	Velocidad Tracker (m/s)	H (m)	F _A (N)	F _{Br} (N)	F _{Gr} (N)	F _B (N)	F _G (N)
0.20	0.15	0.600	0.013	0.039	3.939	1.180	0.0015	0.676	0.0082
0.18	0.18	0.600	0.013	0.041	3.777	1.340	0.0017	0.780	0.0094
0.20	0.15	0.677	0.006	0.003	5.130	0.091	0.0001	0.362	0.0044
0.08	0.08	0.677	0.318	0.012	0.113	0.077	0.0001	0.027	0.0003
0.05	0.05	0.677	0.418	0.011	0.014	0.028	0.0000	0.023	0.0003
0.10	0.08	0.714	0.3133	0.024	0.226	0.194	0.0002	0.192	0.0023
0.13	0.10	0.714	0.3204	0.026	0.475	0.341	0.0004	0.232	0.0028
0.27	0.17	0.854	0.0125	0.037	17.233	1.713	0.0021	3.640	0.0439



4.9 ANÁLISIS GENERAL DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL.

Al examinar los resultados obtenidos del el estudio experimental, se deduce que conforme la pendiente aumentará o se hace más pronunciada, la velocidad de arrastre de la burbuja también aumentara, esto se debe a que la fuerza de flotación de la burbuja crece haciendo más difícil el poder removerla, por lo que se debe tener en cuenta que si:

- La fuerza de arrastre del flujo de agua es mayor que la fuerza de flotación de la burbuja, esta será expulsada del conducto.
- Por el contrario, si la fuerza de flotación de la burbuja es mayor que la fuerza de arrastre del flujo, la burbuja tenderá a moverse hacia aguas arriba del conducto.
- Por último si ambas fuerzas son guales la burbuja permanecerá estacionaria en el conducto.

Durante los experimentos se observó, que para las 3 pendientes estudiadas la forma de la burbuja cambia. Por ejemplo, cuando la pendiente es horizontal ($S = 0$) las burbujas adoptaban una forma alargada y delgada con grandes longitudes, además las burbuja se volvían inestables provocando su separación en burbujas más pequeñas que son removidas fácilmente del conducto, como se observa en la figura 4.33.

Para la pendiente con un ángulo de 3.5° las burbujas tienen una forma elíptica (ver figura 4.33) y presentan en su extremo aguas abajo una turbulencia que desprende pequeñas burbujas con un diámetro no mayor a un centímetro. En el mismo sentido, cuando se tiene una pendiente con un ángulo de 5.9° , la burbuja es en forma triangular vista en planta y conforme avanza a la descarga de la tubería se va redondeando.

Al analizar las observaciones antes descritas se denota que el efecto de la pendiente en la expulsión de la burbuja tiene un impacto significativo, dicho efecto se debe tomar en cuenta cuando se diseñan los conductos cerrados de las obras de toma, para poder evitar los problemas que ocasiona la presencia de aire.

Con lo descrito anteriormente se recomienda tener pendientes pequeñas en los conductos de una obra de toma, ya que, el remover o expulsar las burbujas y/o bolsas de aire serán mucho más fácil, sin importar el tamaño de la bolsa y/o burbuja.

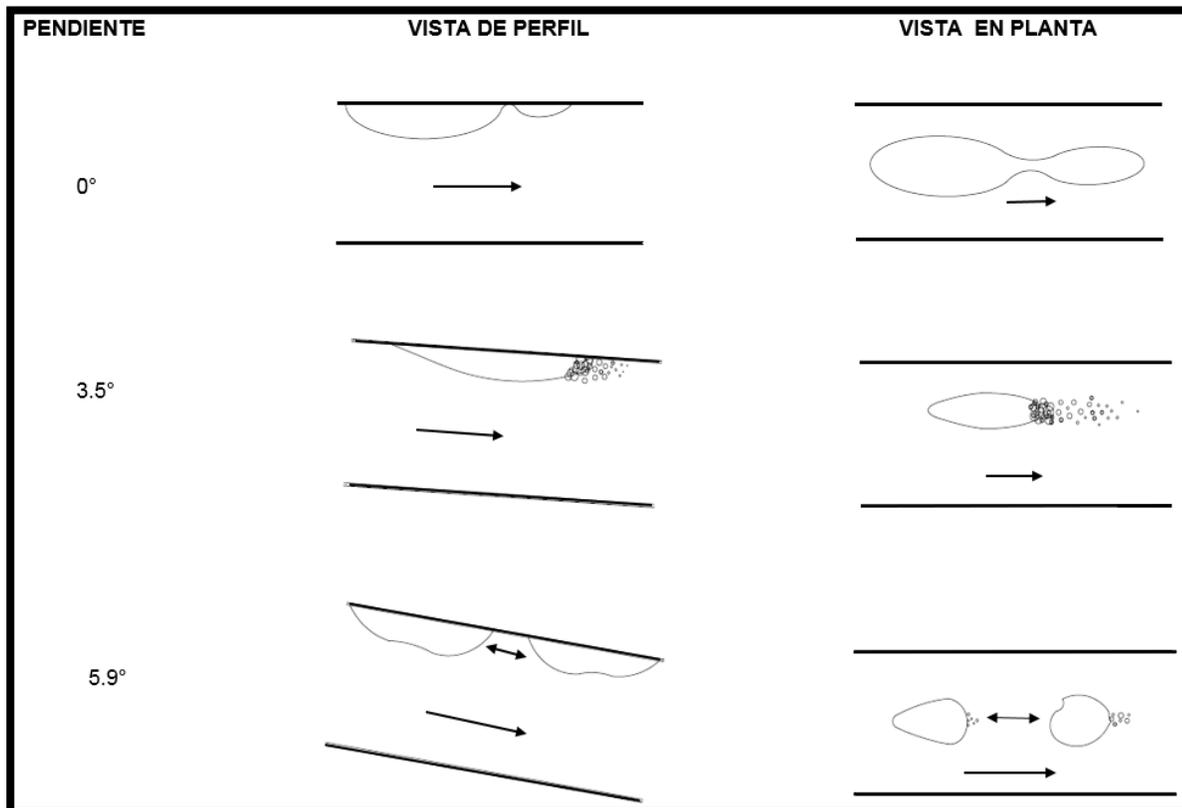


Figura 4.33 Forma de la burbuja contra pendiente



CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

En esta tesis se destacó la importancia de analizar el comportamiento del aire atrapado en los conductos cerrados de las obras de toma de las presas. Es primordial conocer y comprender el efecto que produce la existencia de burbujas y bolsas de aire dentro de estos conductos, con el objetivo de poder evitar problemas tales como, el incremento de la pérdida de carga, así como vibraciones y sobrepresiones.

El análisis del efecto del flujo de agua-aire en conductos cerrados es una tarea compleja. Por lo tanto, es recomendable el uso de dispositivos experimentales para realizar las investigaciones del fenómeno de una manera más sencilla y controlada, esto permite obtener resultados precisos y coherentes que pueden ser comparados con resultados obtenidos con algún modelo numérico.

Debido a lo anterior se optó por realizar un estudio teórico-experimental el cual permitió obtener las siguientes conclusiones:

Para las tres pendientes descendentes analizadas se observó que la forma, tamaño y comportamiento de las burbujas o pequeñas bolsas de aire se ven afectados conforme la pendiente aumenta, incluso para una diferencia de grados mínima, por lo que los resultados obtenidos fueron muy cambiantes.

Los resultados muestran que mientras mayores sean la pendiente y el volumen de aire contenido en la burbuja, mayor tiene que ser la velocidad de remoción y con ello la fuerza de arrastre para poder vencer la fuerza de flotación y así poder evacuar el aire de la tubería. Es importante mencionar que los resultados obtenidos en la investigación experimental coinciden con los de Escarameia (2007), que fueron realizados en un dispositivo con diámetro de 150 mm. Es decir, de haber obtenido alguna ecuación para evaluar la velocidad de remoción de las burbujas o pequeñas bolsas de aire, se hubiera obtenido prácticamente la misma expresión que la propuesta por la autora.



BIBLIOGRAFÍA

- ❖ Burrows, R. and Qiu, D.Q., (1995), Effect of air pockets on pipeline surge pressure, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Journal of Water, Maritime and Energy, Volumen 112.
- ❖ Escameia, M., (2007), Investigating hydraulic removal of air from water pipelines, Water Management ICE 160(WM1).
- ❖ Falvey, H.T., (1980), Air-water flow in hydraulic systems, Bureau of Reclamation, Engineering monograph.
- ❖ Gandenberger, W (1957), Über die wirtschaftliche und betriebssichere Gestaltung von Fernwasserleitungen, R Oldenbourg Verlag, Munich, Alemania Design of overland water supply pipelines for economy and operational reliability (rough translation by W A Mechler, discussion of "Factors influencing flow in large conduits.", Report of the task Force on Flow in Large Conduits of the *Committee on Hydraulic Structures*, ASCE, 92(HY4), 1966
- ❖ García, H., (2001), Presas Derivadoras, 1^{ra} Edición, Departamento de Publicaciones de la facultad de Ingeniería, México.
- ❖ J.W Coleman; S. Garimella (1999), Characterization of two-phase, flow patterns in small diameter round and rectangular tubes, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 42.
- ❖ Kalinske, A.A.; Bliss, P.H., (1943), Removal of air from pipelines by flowing water, ASCE.
- ❖ Kalinske, A.A.; Robertson, J.M., (1943), Closed conduit flow, ASCE.
- ❖ Kent, J.C., (1952), The entrainment of air by water flowing in circular conduits with downgrade slopes, tesis doctoral, Universidad de California, Berkley, California, EUA.
- ❖ Little, M.J., (2002), Air transport in water and effluent pipelines, 2nd Edición, International conference on marine waste water discharges, Estambul, Septiembre 16.
- ❖ Martin, C.S., (1976). Entrapped air in pipelines, Proceedings of the Second International Conference on Pressure Surges, British Hydromechanics Research Association, The City University, London.
- ❖ Murillo F, (2012), Cortinas de presas, XXII Congreso Nacional de Hidráulica, Acapulco, Guerrero, México.



- ❖ Pothof, I.W.M., and Clemens, F.H.L.R. (2010). "On elongated air pockets in downward sloping and inclined pipes." *Journal of Hydraulic Research*, 48(4), 499 – 503.
- ❖ Pothof, I.W.M., and Clemens, F.H.L.R. (2011). "Experimental study of air-water flow in downward sloping pipes." *Int. Journal of Multiphase Flow*, 37(3), 278 - 292.
- ❖ Pothof, I.W.M. 2011. "Co-current air-water flow in downward sloping pipes; transport of capacity reducing gas pocket in wastewater mains." PhD Thesis. Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.
- ❖ Pozos, O; Fáiruzov, Y.; Sánchez, A.; Rodal, E., (2010), Manual de análisis de la problemática del aire atrapado en acueductos para mejorar su eficiencia, México.
- ❖ Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, (2009), Presas con cortina de tierra compactada para abrevadero y pequeño riego, México.
- ❖ Torres, H. (1990), Obras Hidráulicas, 2nd Edición, Limusa.
- ❖ Townson, J.M, (1991), Free-surface Hydraulics, 1^{ra} Edición, CRC Press.
- ❖ Veronese, A (1937), Sul motto delle bolle d'aria nelle condotte d'acqua, Estrato dal fascicolo X, XIV, oct, pp XV.
- ❖ Walski, T.M., Barnhart, T., Driscoll, J., and Yencha, R. (1994). "Hydraulics of corrosive gas pockets in force mains." *Water Environment Research*, 66(6), 772-778.
- ❖ Yazdabdoost, F.; Attari, J., (2004), Hydraulics of Dam and Rivers Structures, 1^{ra} Edición, Balkema.
- YEN, B.C., (1986), HYDRAULICS OF SEWERS, University of Illinois at Urbana Champaign, Department of Civil Engineering, Illinois.

Zhou, L.; Liu, D., (2013) Phenomenon of White Mist in Pipelines Rapidly Filling with Water with Entrapped Air Pockets, Estados Unidos.



ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1. PRESAS Y SUS COMPONENTES

Figura 1.1 Elementos de una presa	11
Figura 1.2 Clasificación de una presa por tipo de cortina	13
Figura 1.3 Cortina de gravedad.....	14
Figura 1.4 Cortina de arco de la presa Plutarco Elías Calles	15
Figura 1.5 Cortina de arco-bóveda de la presa Vajont, Longarone, Italia	15
Figura 1.6 Corte transversal de una cortina arco-gravedad.....	16
Figura 1.7 Presa Santa Eulalia, España, cortina arco-gravedad.....	16
Figura 1.8 Corte transversal de una cortina de machones o contra-fuertes	17
Figura 1.9 Presa “Francisco I. Madero” cortina de contrafuertes	18
Figura 1.10 Cortina homogénea de tierra	19
Figura 1.11 Cortina de enrocamiento	19
Figura 1.12 Cortina de materiales graduados.....	20
Figura 1.13 Presa tipo indio El Sufragio	20
Figura 1.14 Cortina tipo gavión.....	21
Figura 1.15 Esquema de alturas y niveles hidráulicos	22

CAPÍTULO 2. OBRA DE TOMA

Figura 2.1 Elementos de una estructura de entrada para una obra de toma	26
Figura 2.2 Esquema de rejillas	26
Figura 2.3 Valores de K_t para pérdidas por entrada	30
Figura 2.4 Obra de toma en una cortina de concreto	32
Figura 2.5 Obra de toma a través de cortina de materiales graduados.....	34
Figura 2.6 Obra de toma mediante túnel.....	35



CAPÍTULO 3. AIRE ATRAPADO EN CONDUCTOS CERRADOS

Figura 3.1 Esquema de conducto cerrado con burbuja de aire.....	38
Figura 3.2 Flujo estratificado	39
Figura 3.3 Flujo anular.....	39
Figura 3.4 Flujo ondular	40
Figura 3.5 Flujo con pequeñas burbujas de gas	40
Figura 3.6 Flujo con burbujas de gas	41
Figura 3.7 Flujo con bolsas de gas.....	41
Figura 3.8 Golpe de ariete causado por remoción de una bolsa de aire	42
Figura 3.9 Bolsa de aire en una pendiente descendente	43
Figura 3.10 Retorno de bolsas de aire a contra flujo (blowback).....	44
Figura 3.11 Aire ingresado a un conducto cerrado por un salto hidráulico.....	47
Figura 3.12 Datos experimentales por Kalinske y Bliss	49
Figura 3.13 Relación entre la velocidad mínima y la pendiente descendente	50
Figura 3.14 Movimiento de burbujas y bolsa de aire de diferentes tamaños en pendientes descendentes.....	51
Figura 3.15 Movimiento de burbujas de aire en conductos cerrados fluyendo llenos.....	52

CAPÍTULO 4. ESTUDIO EXPERIMENTAL

Figura 4.1 Esquema del dispositivo experimental	56
Figura 4.2 Variador de velocidad	58
Figura 4.3 Medidor de flujo electromagnético	58
Figura 4.4 Válvula de esfera de ½ pulgada.....	59
Figura 4.5 Tramos de la sección de medición	59
Figura 4.6 Sistema de inyección de aire	60



Figura 4.7 Válvula de mariposa de 8 pulgadas	60
Figura 4.8 Interface del programa Tracker	63
Figura 4.9 Ventana principal del programa Tracker	64
Figura 4.10 Barra de herramientas.....	64
Figura 4.11 Selección de video	65
Figura 4.12 Ajustes del video clip	65
Figura 4.13 Ajustes de cortes	66
Figura 4.14 Selección de vara de calibración	67
Figura 4.15 Colocación de la vara de calibración	67
Figura 4.16 Colocación de los ejes coordenados	68
Figura 4.17 Opción trayectorias en la barra de herramientas	69
Figura 4.18 Opción de masa puntual.....	69
Figura 4.19 Opciones modificables de la masa puntual	70
Figura 4.20 Selección de los gráficos.....	71
Figura 4.21 Elección de las variables de interés.....	71
Figura 4.22 Selección de las tablas de datos	72
Figura 4.23 Gráficas y tablas obtenidas al final del análisis.....	73
Figura 4.24 Opción para copiar una imagen	73
Figura 4.25 Opción para copiar tablas	74
Figura 4.26 Icono de guardar archivo.....	74
Figura 4.27 Guardar archivo.....	75
Figura 4.28 Comparación de velocidades.....	81
Figura 4.29 Volumen de una burbuja	83
Figura 4.30 Valores de θ_1 , θ_2 y H de la burbuja 10x8 cm, $Q = 22.45$ l/s, $S (5.9^\circ) = 0.103$	84
Figura 4.31 Obtención de los valores V_1 , V_2 Y H/D de la burbuja 10x8 cm, $Q = 22.45$ l/s	86
Figura 4.32 Fuerzas que actúan en una burbuja/bolsa de aire estacionaria en un tramo de tubería descendente con flujo de agua a tubo lleno.....	90
Figura 4.33 Forma de la burbuja contra pendiente	95



ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 4. ESTUDIO EXPERIMENTAL

Tabla 4.1 Velocidades de la burbuja 10x8cm de $Q = 22.45$ l/s, $S (5.9^\circ) = 0.103$	76
Tabla 4.2 Velocidades de la burbujas con pendiente $S = 0$ ($\theta = 0^\circ$).....	78
Tabla 4.3 Velocidades de la burbujas con pendiente $S = 0.061$ ($\theta = 3.5^\circ$).....	78
Tabla 4.4 Velocidades de las burbujas con pendiente $S = 0.103$ ($\theta = 5.9^\circ$)	79
Tabla4.5 Velocidades de remoción para las burbujas de aire y parámetro de velocidad adimensional	80
Tabla 4.6 Volúmenes de las bolsas de aire, $S = 0$ ($\theta = 0^\circ$).....	88
Tabla 4.7 Volúmenes de las bolsas de aire, $S = 0.061$ ($\theta = 3.5^\circ$).....	89
Tabla 4.8 Volúmenes de las bolsas de aire, $S = 0.103$ ($\theta = 5.9^\circ$).....	89
Tabla 4.9 Fuerzas de arrastre, flotación y gravedad $S = 0$ ($\theta = 0^\circ$)	92
Tabla 4.10 Fuerzas de arrastre, flotación y gravedad $S = 0.061$ ($\theta = 3.5^\circ$)	93
Tabla 4.11 Fuerzas de arrastre, flotación y gravedad $S = 0.103$ ($\theta = 5.9^\circ$).....	93