



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERIA
HIDRÁULICA – INGENIERÍA CIVIL

**APLICACIÓN DE ESTRUCTURAS FLUÍDICAS EN CANALES PARA EL
CONTROL DEL LLENADO Y VACIADO DE TÚNELES. CASO DE ESTUDIO TÚNEL
EL TECORITO**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ING. JOSUÉ ZAVALA PAREDES

TUTOR PRINCIPAL:
DR. NAHÚN HAMED GARCÍA VILLANUEVA
INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGIA DEL AGUA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX

FEBRERO 2018



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.

JURADO ASIGNADO

Presidente: Dr. Pedroza González Edmundo
Secretario: Dr. Arroyo Correa Víctor Manuel
1er Vocal: Dr. García Villanueva Nahún Hamed
2do Vocal: M. en C. Salgado Maldonado Gilberto
3er. Vocal: M.I. González Verdugo José A.

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

TUTOR DE TESIS

Dr. García Villanueva Nahún Hamed

FIRMA

Dedicada con cariño a:

Mis padres

Emma Paredes Ocampo y Enrique Zavala Santamaría

A mis hermanos:

Enrique Zavala y Katleen Zavala

Agradecimientos

Al consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) por su apoyo durante la realización de esta tesis.

A mi tutor el Dr. Nahún Hamed García Villanueva, por el empeño puesto en este trabajo y la confianza puesta en mi para desarrollar esta investigación

A mis revisores: Dr. Víctor Manuel Arroyo Correa Dr. Edmundo Pedroza González M. en C. Gilberto Salgado Maldonado M.I. José A. González Verdugo por el interés mostrado en la revisión de mi trabajo, ya que gracias a sus observaciones y comentarios logre mejorar la presente tesis

INDICE GENERAL

1	Introducción	14
2	Compuertas autooperantes tipo AMIL	18
2.1	Compuerta radial tipo AMIL	18
2.2	Aplicación de las compuertas AMIL	20
2.3	Objetivos de un sistema de regulación mediante una compuerta AMIL	21
2.4	Ventajas y desventajas de las compuertas AMIL	22
2.4.1	Desventajas.....	22
2.4.2	Ventajas	23
2.5	Principios de operación de la compuerta tipo AMIL.....	24
2.5.1	Experiencias relacionadas con la utilización de compuertas tipo AMIL	25
3	Compuerta tipo AMIL para el control del llenado y vaciado de un túnel.....	26
3.1	Planteamiento del problema	26
3.2	Objetivos.....	26
3.3	Hipótesis.....	27
3.4	Metodología	27
3.5	Diseño de la compuerta tipo AMIL para el modelo físico.....	28
3.5.1	Ecuaciones para el diseño de una compuerta AMIL	29
3.5.2	Dimensionamiento de la compuerta AMIL para el modelo del Tecorito....	32
3.5.3	Construcción de la compuerta AMIL para el modelo.....	35
4	Pruebas experimentales.....	40
4.1	Pruebas experimentales sin compuerta AMIL	40
4.2	Estudio numérico del funcionamiento hidráulico del túnel el Tecorito	49
4.3	Proceso experimental con compuerta AMIL	50
4.3.1	Procedimiento de calibración.....	51
5	Conclusiones	58
6	Bibliografía	61

**APLICACIÓN DE ESTRUCTURAS FLUÍDICAS EN CANALES PARA EL CONTROL DEL LLENADO
Y VACIADO DE TÚNELES. CASO DE ESTUDIO TÚNEL EL TECORITO**

INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Compuerta autooperante tipo AMIL</i>	18
<i>Figura 2. Compuerta autooperante tipo AMIL</i>	19
<i>Figura 3. Equipo AMIL de regulación aguas arriba</i>	21
<i>Figura 4. Compuerta AMIL operando con un gasto pequeño</i>	24
<i>Figura 5. Compuerta AMIL operando con un gasto grande</i>	24
<i>Figura 6. Compuerta radial tipo AMIL a la salida del túnel</i>	27
<i>Figura 7. Dimensiones características de una compuerta tipo AMIL</i>	30
<i>Figura 8. Dimensiones características de una compuerta tipo AMIL</i>	30
<i>Figura 10 dimensiones características de una compuerta tipo AMIL</i>	32
<i>Figura 10 Vista frontal de la compuerta tipo AMIL</i>	33
<i>Figura 11 parte trasera de una compuerta AMIL</i>	33
<i>Figura 12. Partes de la placa y brazos de una compuerta AMIL</i>	34
<i>Figura 13 Modelo tridimensional de una compuerta AMIL</i>	34
<i>Figura 14 Modelo tridimensional de una compuerta AMIL</i>	35
<i>Figura 15 Placas de solera para compuerta AMIL</i>	35
<i>Figura 16. Placa frontal de la compuerta AMIL con un radio de 19.7 cm</i>	36
<i>Figura 17. Soportes para flotador frontal de la compuerta AMIL</i>	36
<i>Figura 18. Placa frontal de la compuerta con un radio de diseño de 19.7 cm</i>	36
<i>Figura 19. Bridas para uniones de brazos frontales y posteriores</i>	37
<i>Figura 20. Eje central de la compuerta AMIL</i>	37
<i>Figura 21. Unión de eje central con contrapeso central</i>	38
<i>Figura 22. Unión de contrapeso trasero al contrapeo central y eje central de la compuerta AMIL.</i>	38
<i>Figura 23. Unión de parte trasera de la compuerta a la placa frontal</i>	39
<i>Figura 24. Vista superior del modelo de la compuerta tipo AMIL</i>	39
<i>Figura 25. Carga aguas arriba del túnel de 8.70 cm, presurización con gasto de 16.68 l/s equivalente en prototipo a 104.36 m³/s</i>	41
<i>Figura 26. Vista del túnel aguas abajo con un gasto de 16.68 l/s equivalente en prototipo a 104.36 m³/s</i>	41
<i>Figura 27. Profundidad a la salida del túnel = 16 cm</i>	43
<i>Figura 28. Profundidad a la entrada del túnel = 22.50 cm</i>	44
<i>Figura 29. Profundidad a la salida del túnel = 16.30 cm</i>	44
<i>Figura 30. Profundidad a la entrada del túnel = 22.80 cm</i>	45
<i>Figura 31. Profundidad a la salida del túnel = 19.00 cm</i>	45
<i>Figura 32. Profundidad a la entrada del túnel = 26.50 cm</i>	46
<i>Figura 33 Profundidad a la salida del túnel = 20.60 cm</i>	46
<i>Figura 34. Profundidad a la salida del túnel = 30.00 cm</i>	47
<i>Figura 35. Imágenes con burbuja de aire atrapado dentro del túnel</i>	47
<i>Figura 36c. Vista</i>	48
<i>Figura 36b. Vista</i>	48
<i>Figura 36d. Vista</i>	48
<i>Figura 37. Nivelación de compuerta con marco de acero en modelo del túnel el Tecorito ubicado en laboratorio Enzo Levi</i>	50
<i>Figura 38. Colocación de compuerta en modelo físico</i>	50

APLICACIÓN DE ESTRUCTURAS FLUÍDICAS EN CANALES PARA EL CONTROL DEL LLENADO Y VACIADO DE TÚNELES. CASO DE ESTUDIO TÚNEL EL TECORITO

<i>Figura 39. Colocación de soporte de acero para compuerta tipo AMIL</i>	51
<i>Figura 42. Calibración de compuerta tipo AMIL ya instalada en el modelo físico</i>	53
<i>Figura 43. Pruebas experimentales en modelo físico</i>	53
<i>Figura 44. Carga aguas arriba (h=4mm)</i>	54
<i>Figura 45. Carga aguas abajo (h=8 mm)</i>	54
<i>Figura 46. Canal sin compuerta, con presencia de aire atrapado dentro del túnel.</i>	57
<i>Figura 47. Canal con la compuerta AMIL instalada a la salida del túnel, con ausencia de aire atrapado.</i>	57
<i>Figura 48. En esta figura se observa una burbuja de aire muy cerca de la salida del túnel</i>	58
<i>Figura 49. Se observa que la burbuja de aire se encuentra más alejada de la salida del túnel.</i>	59
<i>Figura 50. La burbuja de aire se va expulsando gradualmente de aguas abajo hacia aguas arriba.</i>	59

**APLICACIÓN DE ESTRUCTURAS FLUÍDICAS EN CANALES PARA EL CONTROL DEL LLENADO
Y VACIADO DE TÚNELES. CASO DE ESTUDIO TÚNEL EL TECORITO**

INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1 Expresiones para dimensionar una compuerta tipo AMIL</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 2 Dimensiones para diferentes radios de las compuertas tipo AMIL.....</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 3. Datos del modelo sin la compuerta</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 4. Campañas de medición en campo.....</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 5. Equivalencias para el modelo de las mediciones en campo</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 6. Datos del modelo sin compuerta bajo condiciones iniciales equivalentes en la medición de campo</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 7 Tirantes obtenidos con el software FLOW-3D™ con evaluación del error en porcentaje</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 8 Datos del modelo con la compuerta AMIL</i>	<i>54</i>

**APLICACIÓN DE ESTRUCTURAS FLUÍDICAS EN CANALES PARA EL CONTROL DEL LLENADO
Y VACIADO DE TÚNELES. CASO DE ESTUDIO TÚNEL EL TECORITO**

NOMENCLATURA

Q , gasto m^3/s

VF , variador de frecuencia (%)

Δh_e , incremento de carga a la entrada

Δh_s , incremento de carga a la salida

α , ángulo del sector de flotador

θ_i , ángulo del sector de pantalla inferior

K , talud de la hoja de la compuerta

$B.L.$, altura de bordo libre de la compuerta

P_s , placa de soporte superior

E_f , espesor de flotador

L_{f_i} , Longitud interior del flotador

L_{f_e} , longitud exterior del flotador

B_f , ancho de flotador

H_f , altura vertical del flotador

L_c , longitud total de la hoja de la compuerta

L_p , longitud de la pantalla inferior de la compuerta

H_p , altura vertical de la pantalla inferior de la compuerta

d , carga hidráulica sobre compuerta, tirante aguas arriba

w , abertura máxima de la compuerta

b , ancho de la base de la compuerta

a , ancho superior de la compuerta

l_1 , longitud de brazo superior

l_2 , longitud de brazo posterior

l_3 , longitud de brazo posterior inferior

l_4 , longitud de brazo frontal intermedio

l_5 , longitud de brazo frontal inferior

d_0 , altura de soporte central

r_c , radio de contrapeso central

r_p , radio de contrapeso posterior

**APLICACIÓN DE ESTRUCTURAS FLUÍDICAS EN CANALES PARA EL CONTROL DEL LLENADO
Y VACIADO DE TÚNELES. CASO DE ESTUDIO TÚNEL EL TECORITO**

1 Introducción

El agua en la agricultura es uno de los bienes determinantes de la producción, por tal motivo el uso adecuado de ésta, no sólo debe entenderse como el establecimiento de medidas para su ahorro, sino también para incrementar su productividad, mediante la aplicación de tecnologías modernas de diseño, construcción y operación de la infraestructura hidroagrícola.

De un total de 20 millones de hectáreas que en promedio se cosechan anualmente en México, seis millones son de riego. De la superficie irrigada, del orden de 3 millones 336 mil hectáreas están organizadas en 81 distritos de riego, el resto está comprendido en alrededor de 27 mil pequeñas unidades de riego.

En la superficie bajo riego, que equivale a menos del 30 % de las tierras cultivadas, se genera más del 50 % de la producción agrícola nacional y el 70 % de las exportaciones, lo que en términos de productividad representa 2.3 veces la obtenida en tierras de temporal.

De los 3 millones 336 mil hectáreas, se estima que el 55 % pertenece al sector ejidal y el 45 % a la pequeña propiedad, donde esta superficie es la principal fuente de trabajo de cerca de 550 mil usuarios registrados, de los cuales el 72 % son ejidatarios y el 28 % pequeños propietarios

Dado el gran impacto que tiene la producción agrícola en México es de suma importancia tener un buen servicio de riego el cual requiere de un sistema de regulación de canales, que consiste en controlar de manera permanente y efectiva las entregas del agua de riego en todo el sistema de conducción y distribución. Las razones que exigen este control son: la satisfacción oportuna de los requerimientos de los cultivos, la reducción de las pérdidas de agua, la seguridad en la operación y la reducción de los costos de operación, asumiendo que en la parcela la magnitud de la demanda de riego y su modulación en el tiempo corresponden al nivel tecnológico de los agricultores de cada distrito de riego.

El concepto de modernización de sistemas de riego responde a la necesidad de lograr un aprovechamiento más racional del recurso hídrico en la agricultura, facilitando la introducción de nuevas tecnologías tendiendo a optimizar la gestión, mejorando la eficiencia en el uso del agua.

Un aspecto importante en los programas de modernización integral de los sistemas de riego, es el diseño adecuado de la infraestructura hidroagrícola, ya que la falta de criterios de selección, recomendaciones de localización y aplicación de las diferentes estructuras han provocado que las obras no cumplan con la función para las que fueron diseñadas; esto trae como consecuencia baja flexibilidad de los sistemas, grandes pérdidas de agua, desconfianza de los usuarios y pérdidas económicas.

Un ejemplo en específico de algunas problemáticas mencionadas se da en la red de distribución principal del canal Humaya, esta red se encuentra dentro del Distrito de Riego No. 10, en el estado de Sinaloa, está formado por una serie de canales principales, laterales, sublaterales, ramales, de tierra y concreto propiciando que se tengan fuertes pérdidas de agua por infiltración, afectando el volumen de agua disponible para los cultivos, lo que dificulta la aplicación del servicio del riego y disminuye la flexibilidad del riego al ampliar los intervalos de riego; disminuyendo el potencial productivo de los cultivos y en consecuencia los ingresos de los productores agrícolas (Castillo, J. 2011).

Asimismo, este canal cuenta con gran cantidad de obras hidráulicas como compuertas, sifones, rápidas, etc. Que aunado al deterioro del mismo por avenidas importantes y falta de mantenimiento que se constata en el levantamiento de losas en algunos tramos del canal, gran cantidad de azolve y maleza, conduce a una reducción del área hidráulica y a la pérdida de capacidad efectiva de conducción del mismo.

El flujo en canales tiene la característica de tener una superficie libre que presenta una serie de fuerzas como las de gravedad, de fricción, de presión estática y dinámica, tensión superficial y efectos turbulentos entre las más importantes, que hacen que este tipo de flujo sea muy complejo. Esta condición se agrava cuando se trata de canales de secciones compuestas, con diferentes pendientes, o bien cuando existen obras hidráulicas o de control y se complica cuando se liga el canal a un túnel y este llega a trabajar tanto como canal como conducto presurizado que es el caso del túnel el Tecorito en el canal principal Humaya

APLICACIÓN DE ESTRUCTURAS FLUÍDICAS EN CANALES PARA EL CONTROL DEL LLENADO Y VACIADO DE TÚNELES. CASO DE ESTUDIO TÚNEL EL TECORITO

En el presente trabajo se estudia el funcionamiento de una compuerta tipo AMIL a la salida del túnel el Tecorito, el cual es de sección circular ($D=6.5$ m) y se localiza entre los cadenamientos 07+924 - 09+124 del sistema conocido como canal principal Humaya, tiene una longitud aproximada de 1200 m, fue diseñado para conducir un gasto de $100 \text{ m}^3/\text{s}$, sin embargo, su funcionamiento es problemático cuando conduce gastos mayores a $90 \text{ m}^3/\text{s}$. El canal se une al túnel a través de una transición muy corta pasando de una sección trapezoidal a circular con una ampliación que a la vez es una rápida, además cuenta con un escalón brusco (descendente) a la entrada del túnel; del mismo modo en el extremo final de la conducción, ésta se une al canal trapezoidal en forma abrupta y también existe un escalón brusco, en este caso ascendente, estas características tienen como consecuencia el atrapamiento de aire dentro del mismo, disminuyendo su capacidad hidráulica, es por ello que se propone una alternativa de solución por medio de la implementación de estructuras fluídicas, en caso particular una compuerta tipo AMIL colocada a la salida del túnel.

2 Compuertas autooperantes tipo AMIL

Las estructuras tipo AMIL son parte del grupo de compuertas conocidas como auto-operantes, las cuales para su funcionamiento no requieren de personal ni de motores ni de energía eléctrica. Por lo tanto, no existen mecanismos elevadores, vástagos ni cables o cadenas. Su operación se basa en el uso de la gravedad (peso de la compuerta y contrapesos) y de la energía que proporciona el agua circulando por los canales a cielo abierto (flotadores y empuje hidrostático). En general, las compuertas autooperantes incluyen dispositivos de flotación que al interactuar con el flujo permiten mantener un nivel constante, según el método de operación, aguas arriba, aguas abajo, o bien una combinación de ambas la compuerta gira sobre su eje perfectamente nivelado, que permite movimientos en forma libre.

Una compuerta autooperante puede ser descrita como una compuerta sobre la cual la acción de la mano del hombre y/o de dispositivos motorizados para operar se ha remplazado por un sistema automático que aprovecha la fuerza de gravedad y la energía disponible en el flujo de agua (expresada en la práctica comúnmente como fuerza hidrostática o hidrodinámica). Para lograr el control y el movimiento automático se utilizan estructuras compuestas por contrapesos y flotadores.

2.1 Compuerta radial tipo AMIL

Las compuertas AMIL son trapezoidales radiales con un dispositivo de flotación al frente y en la parte trasera tiene unos contrapesos montados en una estructura de concreto hidráulico. Su funcionamiento se basa en mantener e independientemente del gasto circulante un mismo nivel o un tirante aguas arriba de la estructura. Su forma trapezoidal es para reducir el riesgo de que un pequeño desnivel en la hoja atore a esta, contra la estructura de concreto (Garcia, 2016)

Este tipo de compuertas responden de forma automática en función del flujo y del nivel de agua que controla, por ello se han eliminado montacargas, cables, boyas u otras estructuras complicadas y en su lugar se cuenta con un flotador en la cara aguas arriba de la placa radial.



Figura 1. Compuerta autooperante tipo AMIL

La estructura que soporta la compuerta se balancea sobre un eje de giro horizontal. Para su equilibrio y funcionamiento incluye contenedores lastrados que permiten que la compuerta se balancee sin dificultad, de esta manera y ante cualquier variación del caudal circulante alcanza rápidamente la posición de equilibrio necesaria para mantener el nivel que se desea controlar.

El sistema de cojinetes en el que se soportan los ejes de giro garantiza una operación casi sin fricción y no adherente. En la Figura 1 y 2 se presentan ilustraciones de una compuerta AMIL.

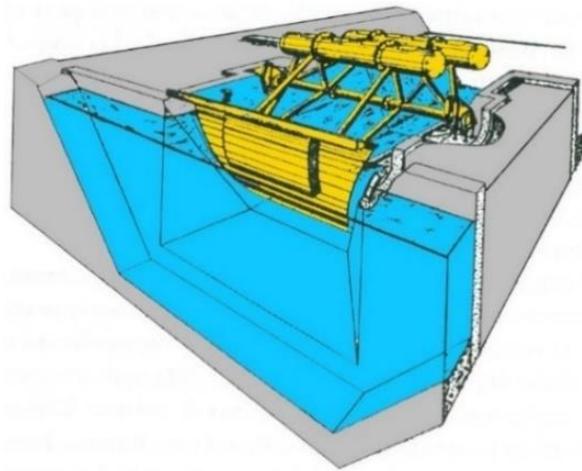


Figura 2. Compuerta autooperante tipo AMIL

Están diseñadas para operar con el criterio de control de nivel aguas arriba. Las compuertas AMIL permiten mantener, a una altura constante y previamente determinada, el nivel de la superficie libre del agua inmediatamente aguas arriba de la estructura de control. Las compuertas AMIL cuentan con un flotador ubicado en la cara aguas arriba de la placa radial el cual normalmente se encuentra parcialmente sumergido dentro del agua. Gracias a la acción de este flotador, derivada del empuje de Arquímedes que actúa sobre el mismo, y a la fuerza que ejerce un contrapeso ubicado en el centro de la compuerta es que se logra mantener un nivel constante que normalmente coincide con el eje de giro de la propia compuerta (Garcia, 2016)

2.2 Aplicación de las compuertas AMIL

Por sus características y versatilidad, las compuertas AMIL pueden utilizarse en una gran cantidad de aprovechamientos hidráulicos.

- **En canales de riego.** La compuerta AMIL mantiene una carga alta y constante en las compuertas derivadoras, sin importar el flujo en las mismas o en el canal. Si se usa en serie a lo largo de la red de distribución, en diferentes estructuras de verificación y distribución, se tendrá entonces un plan de riego automático, confiable y flexible, con unos costos de operación muy bajos. Las compuertas del sistema son de verificación automática para un control confiable de derivación y de atención a la demanda, cualquiera que sea el flujo.
- **En canales de drenaje.** Mantiene el agua en el nivel deseado. Permanece cerrada en el estiaje para evitar un descenso anormal del agua subterránea y comienza a operar en cuanto hay flujo de agua en el sistema. Durante épocas de estiaje, un nivel alto de agua en el sistema de drenaje da como resultado la recarga de los acuíferos y auxilia el manejo de los humedales
- **En lagos con usos recreativos y embalses.** Mantiene un nivel adecuado de agua en todas las estaciones. El nivel del agua se mantiene durante todo el año sin afectar la capacidad o confiabilidad de los vertedores
- **Para el control de avenidas o en los embalses para abastecimiento de agua.** Permite incrementar considerablemente la capacidad de almacenamiento sin tener que sacrificar la capacidad ni la confiabilidad de los vertedores. El uso de compuertas AMIL en la entrada del sistema de control de avenidas, protege automáticamente las zonas inundables
- **Tratamiento de aguas residuales.** El uso de compuertas AMIL en la salida de un clarificador permite elevar el nivel del agua sin tener que disminuir la capacidad de flujo, reduciendo así la descarga de gases fétidos. El uso de las compuertas AMIL con o sin vertedor y haciendo las veces de un bypass automático, permite homogeneizar el flujo en las obras de cabecera durante las horas pico y de menor demanda. Control automático de nivel para canales de desinfección con luz ultravioleta. Regulación automática de los niveles en el tanque de sedimentación durante las variaciones de flujo.
- **Hidroeléctrico.** El sistema permite la optimización de los niveles en la cámara de agua, así como una derivación instantánea durante paros eventuales o programados. Mayor rendimiento hidráulico mediante la conducción de los incrementos del flujo diurno del río a la cámara de agua, al tiempo que se mantiene el flujo mínimo requerido en el río para actividades de pesca y de recreación.

2.3 Objetivos de un sistema de regulación mediante una compuerta AMIL

Estas compuertas están diseñadas para operar con el criterio de control de nivel aguas arriba. Las compuertas AMIL permiten mantener, a una altura constante y previamente determinada, el nivel de la superficie libre del agua inmediatamente aguas arriba de la estructura de control. Las compuertas AMIL cuentan con un flotador ubicado en la cara aguas arriba de la placa radial y normalmente se encuentra parcialmente inmerso dentro del agua. Gracias a la acción de este flotador, deriva del empuje de Arquímedes que actúa sobre el mismo, y a la fuerza que ejerce un contrapeso ubicado en el centro de la compuerta es que se logra mantener un nivel constante que coincide con el eje de giro de la propia compuerta. En la figura 3 se muestra un equipo hidromecánico tipo AMIL para controlar automáticamente el nivel aguas arriba en un canal. En ella se identifica claramente el flotador sobre la compuerta y los contrapesos central y trasero.

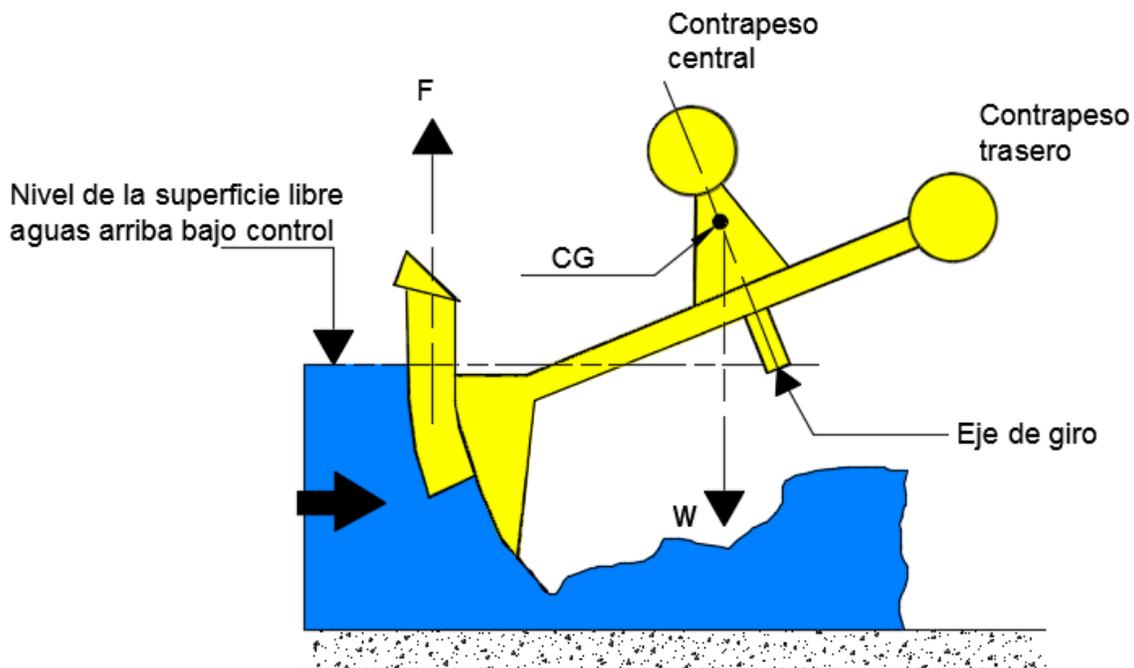


Figura 3. Equipo AMIL de regulación aguas arriba

2.4 Ventajas y desventajas de las compuertas AMIL

Al igual que cualquier tecnología de modernización esta tiene sus ventajas y desventajas a la hora de implementar estas estructuras autooperantes.

2.4.1 Desventajas

- **Calibración**, uno de los principales inconvenientes es la calibración que es muy difícil de lograr, dicha calibración se debe intentar sin agua en el canal y adicionando peso en la parte contraria de la compuerta hasta que se equilibren ambas partes. Este procedimiento es difícil incluso para cualquier dispositivo o arreglo similar.
- **Patentes**. Uno de los mayores problemas a que se han enfrentado quienes colocan estas estructuras, es que el fabricante o constructor normalmente no es el dueño de las patentes y de los planos originales, por lo que las compuertas resultan con diferencias en algunas de sus dimensiones.
- **Control de un nivel**. Otro problema es que el nivel que se pretenda regular es el nivel que coincide exactamente con el eje de giro. Ello implica que una vez lograda la calibración, la compuerta controlará únicamente ese nivel, y en los canales de riego de nuestro país, en ocasiones, se requiere mover el tirante de operación. Por ejemplo, en caso que se quisiera surtir tomas altas. Cualquier otro nivel que se pretenda regular desequilibrará la compuerta.
- **Vulnerabilidad**. Algunos sistemas o equipos para la automatización son vulnerables al vandalismo y a malas operaciones o alteraciones físicas que afectan el funcionamiento de las estructuras de control. Por fortuna, la experiencia ha mostrado que este problema puede ser superado con la provisión de cercas y puntos de vigilancia y con la educación de los usuarios. Este último aspecto es el que realmente garantiza la eliminación del problema y se da cuando existe un adecuado clima de conformidad y confianza entre los usuarios.
- **Azolvamiento**. En cuanto al azolvamiento, la capacidad de limitar la descarga, que es una característica básica y un objetivo del control automático, puede incrementar el riesgo de que se depositen sedimentos en los canales. Una revisión detallada de varios casos muestra que la automatización puede ser inapropiada, o que debe ser aplicada solo cuando se cumplen una serie de restricciones. Por ejemplo, con limitaciones sobre las variaciones permisibles en el flujo y en el número y localización de estructuras automáticas.

2.4.2 Ventajas

- **Mejor eficiencia de distribución y transporte.** Por lo general se logra un incremento de la eficiencia superior a 10 %. El agua que se deja de desperdiciar puede ser usada para incrementar la intensidad del cultivo o para expandir el área irrigada. Alternativamente se obtiene una reducción en los consumos y requerimientos de agua, lo que permite una reducción en la capacidad y, por lo tanto, en los costos derivados del almacenamiento del recurso agua. También los costos originados por el transporte y distribución del agua en los canales y plantas de bombeo se ven reducidos. De la misma manera el consumo de la energía que se requiere para operar el sistema, por ejemplo, la usada en las plantas de bombeo, se reduce en la medida en que se mejora la eficiencia de conducción y distribución.
- **Menor dependencia y requerimiento de personal.** Al simplificar y automatizar las operaciones de control, se hace posible reducir y optimizar el número y capacidades del personal de operación. En este sentido, es importante enfatizar que la automatización no implica la introducción de equipo sofisticado que es difícil de operar y mantener.
- **Mejor regulación.** Con la automatización se logra un mejor control de los niveles del agua, lo que redundará en menores costos de mantenimiento a través de la reducción o eliminación de desbordamientos del canal y de largos y rápidos cambios.
- **Mayor control de los volúmenes suministrados.** Esta ventaja permite reducir el riesgo de sobre elevar los niveles freáticos y de salinización de los suelos entre otros problemas asociados al uso en exceso del agua de riego. Un control preciso de las derivaciones también permite la introducción del concepto de dotación volumétrica. Este es un criterio de asignación, que, al ser aplicado correctamente, propicia que entre los agricultores se obtenga un mayor aprovechamiento y un uso eficiente del agua que utilizan para riego.
- **Confianza y equidad en la distribución.** La introducción de la automatización y la consecuente mejora en la distribución del agua fomenta el desarrollo de un clima de conformidad entre los agricultores. Uno de los primeros efectos, es que simplifica la aplicación de medidas para eliminar las prácticas relacionadas con la malversación del agua entre los agricultores y las autoridades encargadas de su distribución y asignación. Este tipo de clima es una precondition esencial para el éxito de otras medidas de beneficio relacionadas con la gestión del agua y la economía de las asociaciones de usuarios. En términos generales, se mejoran las prácticas de administración del agua en las zonas de riego.
- **Oportunidad en la entrega.** Con algunos sistemas automatizados es posible conocer y prever las necesidades de los usuarios y atenderlas con oportunidad. Estas necesidades pueden derivarse de una política de suministro basada en

demanda libre, en tandeos con calendarios predeterminados, rígidos en el tiempo, o pueden obedecer a los cambios en las prácticas de riego por efecto de la diversificación de cultivos o de la modernización y tecnificación de los sistemas de riego parcelario. Esta oportunidad en la entrega permite una mayor certidumbre y garantía para los usuarios que desean establecer cultivos de calidad y alto rendimiento que requieren un régimen controlado de aplicación.

2.5 Principios de operación de la compuerta tipo AMIL

Cuando el nivel de la superficie libre aguas arriba coincide con el nivel del eje de giro, cualquiera que sea la posición angular de la compuerta, la compuerta AMIL mantiene constante el nivel aguas arriba para cualquier descarga. De aquí que, mientras se cumpla esta condición la compuerta no se moverá y permanecerá en completo equilibrio.

Cuando el flujo cambia, por un incremento o disminución de la demanda, y el nivel aguas arriba tiende a subir o bajar, la compuerta entrará en movimiento y permitirá inmediatamente el paso del flujo necesario para equilibrarse y de esta manera mantener constante el nivel aguas arriba. Así se tiene que cuando circula un gasto pequeño la compuerta está casi cerrada (figura 4) y cuando es un gasto grande la compuerta se abre para controlar una descarga mayor (figura 5) manteniendo un nivel constante aguas arriba

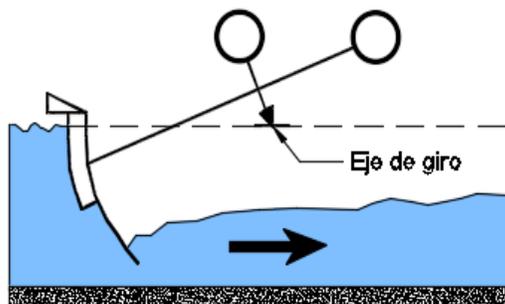


Figura 4. Compuerta AMIL operando con un gasto pequeño

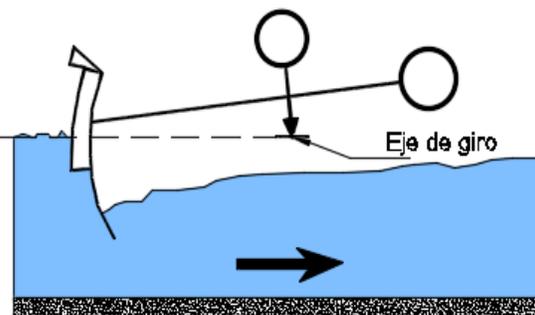


Figura 5. Compuerta AMIL operando con un gasto grande

2.5.1 Experiencias relacionadas con la utilización de compuertas tipo AMIL

Las experiencias internacionales indican que las compuertas tipo AMIL son estructuras de control de niveles confiables, esto siempre y cuando se diseñen, construyan, instalen y calibren de manera adecuada. Cuando no se satisfacen estos requisitos se puede llegar a tener resultados poco satisfactorios como las que a continuación se describen:

Pedroza González & Hinojosa Cuellar, (2014) mencionan que uno de los principales inconvenientes al instalar una compuerta tipo AMIL es la calibración, ya que es muy difícil de lograr. Dicha calibración se debe intentar sin agua en el canal y adicionando peso en la parte contraria de la compuerta hasta que se equilibren ambas partes. Este procedimiento es difícil incluso para cualquier dispositivo o arreglo similar. También comentan que uno de los mayores problemas a que se han enfrentado quienes colocan estas estructuras, es que el fabricante o constructor normalmente no es el dueño de las patentes y de los planos originales, por lo que las compuertas resultan con diferencias en algunas de sus dimensiones.

En el canal Rode se colocaron este tipo de compuertas y se tuvieron los siguientes problemas (Molano, 2001): primeramente, se tuvo una disminución importante en la capacidad de conducción del canal por la sobreelevación necesaria para los tamaños “estándar” de las compuertas. Posteriormente se tuvo el problema, ya mencionado, de la calibración.

Después de varios esfuerzos infructuosos, se decidió convertir las compuertas AMIL en compuertas “aligeradas”; es decir, al tenerse un flotador en la placa frontal de la compuerta, la magnitud de la fuerza necesaria para subirla o bajarla disminuye notablemente. Esto se logró colocando un malacate en el puente de maniobras de la represa, con cables de izada para mantener la compuerta abierta a cierto nivel. Para evitar que personas ajenas al personal de operación del DR movieran estos malacates, se colocó un candado. A esta adecuación se le llama “compuertas aligeradas”. (Pedroza González & Hinojosa Cuéllar, 2014)

Ante estas evidencias, en este trabajo se partió de un estricto control de los cuatro aspectos básicos ya señalados: diseño, construcción, instalación y calibración

3 Compuerta tipo AMIL para el control del llenado y vaciado de un túnel

En esta tesis denominada “Aplicación de estructuras fluídicas en canales para el control del llenado y vaciado de túneles. caso de estudio túnel el Tecorito” se estudia por primera vez la utilización de una compuerta radial tipo AMIL para el control del nivel de flujo a la salida de un túnel para garantizar que su presurización se realice de aguas abajo hacia aguas arriba, este fenómeno se controla y se estudia de manera experimental

- De esta manera el estudio es aplicado a un caso real para así validar la eficiencia de las compuertas AMIL y tener un sustento que avale su funcionamiento.

La riqueza académica y técnica del estudio se soporta y respalda con información tanto de un modelo matemático como de campo obtenidos para el prototipo, la que se contrasta con los datos del modelo físico.

3.1 Planteamiento del problema

El llenado gradual de un túnel abastecido por un canal trabajando a flujo subcrítico alcanza un punto en donde sobrepasa su clave superior, generando la presencia de un sistema parcialmente lleno dentro del mismo. Bajo estas condiciones a medida que el túnel se va presurizando desde aguas abajo hacia aguas arriba el aire va siendo expulsado a través de la entrada del túnel. Por el contrario, en el caso de que el llenado ocurra desde aguas arriba hacia aguas abajo se generará una especie de “tapón hidráulico” que evitará que el aire contenido en el interior del túnel quede atrapado, lo que se puede traducir en una reducción de la capacidad hidráulica del conducto al verse restringida el área hidráulica por efecto del propio volumen de aire atrapado a lo largo del túnel.

3.2 Objetivos

En resumen, los objetivos de esta tesis se concretan en tres aspectos

- Mediante un modelo físico estudiar el proceso de llenado y vaciado de túneles inmersos en sistema de canales a través de la implementación de una compuerta tipo AMIL para el control del llenado.

- Estudio experimental de la disminución de la capacidad de la conducción de túneles sujeto al control del nivel a la salida, caso de estudio el Tecorito.
- Validar la utilidad de utilizar una compuerta tipo AMIL para evitar los problemas asociados con la reducción de la capacidad hidráulica de túneles por efecto de aire atrapado.

3.3 Hipótesis

La acumulación de aire atrapado dentro del túnel el Tecorito, genera una reducción de la capacidad hidráulica del conducto al verse restringida el área hidráulica por efecto del propio volumen de aire atrapado a lo largo del túnel.

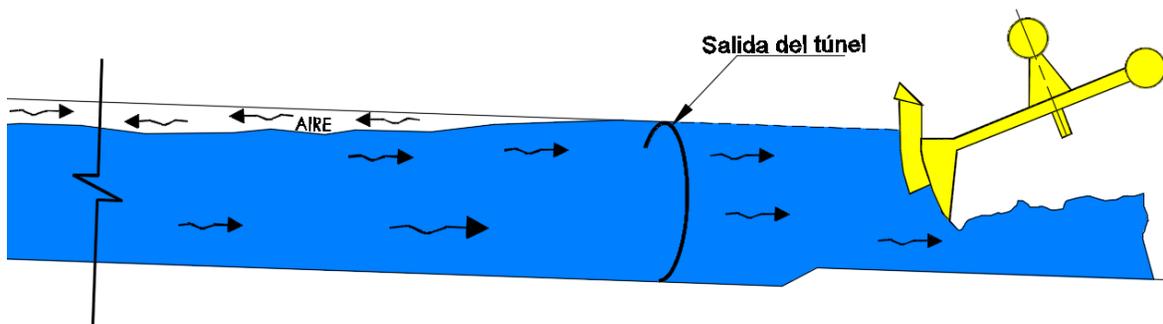


Figura 6. Compuerta radial tipo AMIL a la salida del túnel

3.4 Metodología

Para el desarrollo de este estudio se estableció el siguiente proceso metodológico

- Recopilación de información sobre el proceso de llenado y vaciado de túneles en canales y el uso potencial de estructuras auto-operantes para su control.
- Desarrollo del modelo físico - matemático
- Estudio experimental de la disminución de la capacidad de la conducción del túnel del Tecorito
- Desarrollo y estudio del sistema de control para el llenado y vaciado del túnel del Tecorito
- Diseño y construcción de una compuerta tipo AMIL para el modelo del túnel el Tecorito

Los casos de estudio a analizar son:

- Pruebas en el modelo del túnel el Tecorito sin compuerta a la salida del túnel
- Túnel calibrado con datos de campo proporcionados por laboratorio Enzo Levi
- Túnel con compuerta radial tipo AMIL a la salida del túnel el Tecorito
- Instalación y calibración de la compuerta en el modelo físico

3.5 Diseño de la compuerta tipo AMIL para el modelo físico

Se inició con la recopilación de información acerca del diseño de compuertas tipo AMIL para poder construir una compuerta que se ajustara al tamaño del modelo del túnel el Tecorito, ubicado en el laboratorio Enzo Levi y así poder realizar las pruebas experimentales, lo cual se encontró en la literatura el siguiente gráfico con modelos de compuertas estandarizadas:

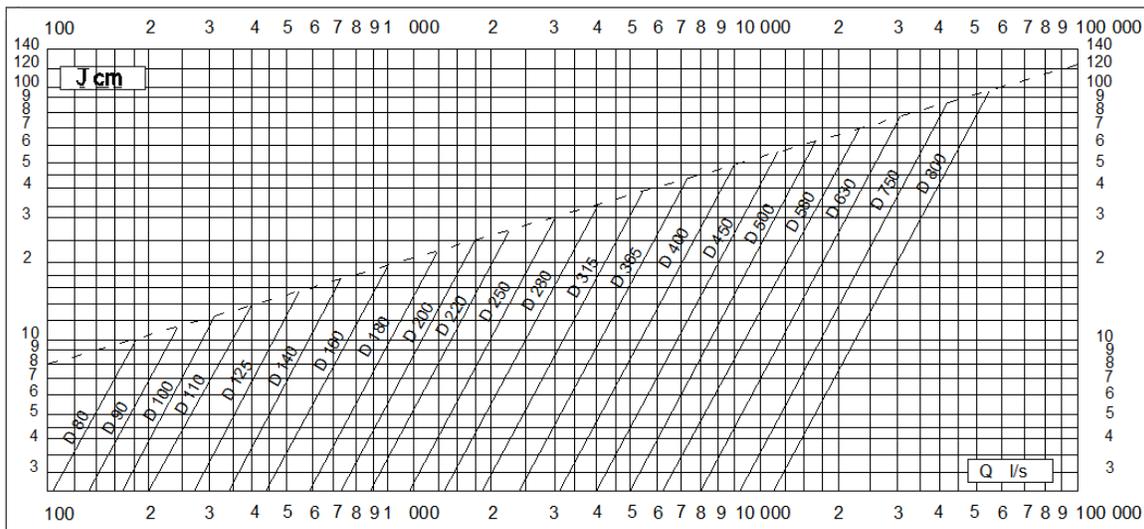


Figura 6. Gráfico de selección de compuerta tipo AMIL

Para la selección del tipo y modelo de compuertas tipo AMIL se han desarrollado una serie de tablas y graficas por medio de las cuales es factible elegir, de una manera fácil y rápida, la más apropiada. Así por ejemplo en la figura 5 se aprecia una tabla que presenta la compañía Alsthom Fluides (Gec Alshon) en el documento de difusión denominado Compuerta AMIL identificado con el número de serie A 650180; es importante hacer notar que esta tabla responde a las características de las compuertas estándar que se fabrican y comercializan también por otras compañías como Waterman Industries, por ejemplo.

Para seleccionar la compuerta se requiere conocer el gasto máximo en l/s que circulará a través de la compuerta Q y la diferencia mínima de carga disponible j que es la diferencia de alturas mínima que se puede presentar entre el nivel inmediatamente aguas arriba de la compuerta medido a una distancia de aproximadamente $2D$ (diámetro) en cm del eje de giro y el nivel inmediatamente aguas debajo de la misma medido a una distancia aproximada de $4D$ en cm del eje de giro, que se prevé se presente con el gasto máximo. Con el valor de Q se entra en el eje X y con el valor de j en el eje Y , en el punto de cruce se ubica la línea correspondiente a la compuerta requerida (cuando el punto no cae directamente sobre de una de las líneas, o sea, cuando cae entre dos de ellas, se selecciona la línea de la derecha que corresponde a la compuerta de mayor tamaño).

3.5.1 Ecuaciones para el diseño de una compuerta AMIL

Al buscar la selección de la compuerta requerida en el modelo del Tecorito se observó que ninguna compuerta de las series contenidas en el gráfico era adecuada y no cumplía con las características necesarias para colocarla en el modelo que se encuentra en el laboratorio Enzo Levi ya que es muy pequeño.

De modo que se recurrió a las fórmulas directas para el diseño específico de una compuerta tipo AMIL con los datos necesarios, en función del gasto máximo (Q Max) conocido y el radio de la compuerta como la principal variable independiente sobre la que se basen las dimensiones de la compuerta. De esta manera en la tabla 1 Se presentan las expresiones algebraicas que permiten dimensionar una compuerta tipo AMIL (García et al, 2001) de esta manera se obtuvieron las medidas correspondientes de cada elemento que conforman la compuerta tipo AMIL requerida por el estudio.

En resumen, el diseño de una compuerta AMIL, consiste en esencia en determinar un arreglo en el que las relaciones de balance de fuerzas son equivalentes a un sistema de control en el que la posición de la estructura se establece en función de la desviación de la variable a controlar, en este caso en función de la variación de un nivel o de un diferencial de niveles. Desde el punto de vista práctico, y en base a la experiencia, se tiene que esta condición se satisface cuando la magnitud de las fuerzas de fricción es despreciable en comparación con las otras fuerzas actuantes. Es bajo esta hipótesis de diseño y tomando como referencia el esquema de la figura 7 que por equilibrio de fuerzas y momentos actuantes se obtienen las dimensiones de la compuerta registradas en la tabla 1. (Garcia, 2016)

Con el fin de generar las bases de diseño para una serie de compuertas tipo AMIL en la tabla 1 se ha considerado pertinente proponer un dimensionamiento estándar que depende del radio de las compuertas de esta manera el radio se establece como la principal variable independiente sobre la que se base el resto de las dimensiones de las compuertas.

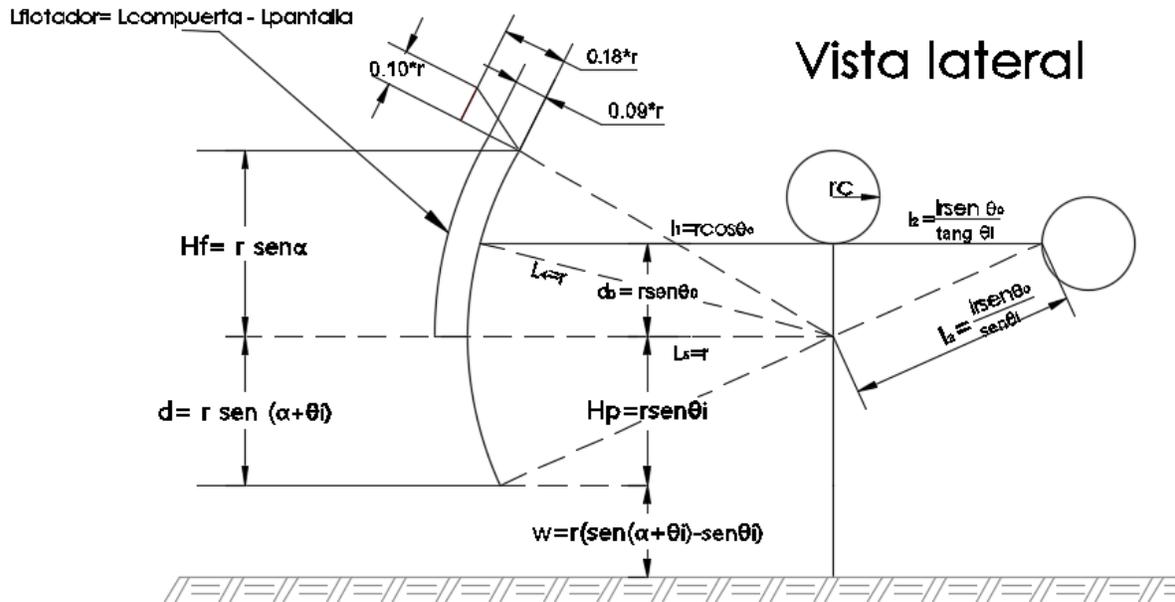


Figura 7. Dimensiones características de una compuerta tipo AMIL

Con la carga hidráulica (d) más la apertura máxima de la compuerta (w) se alcanza el tirante a controlar.

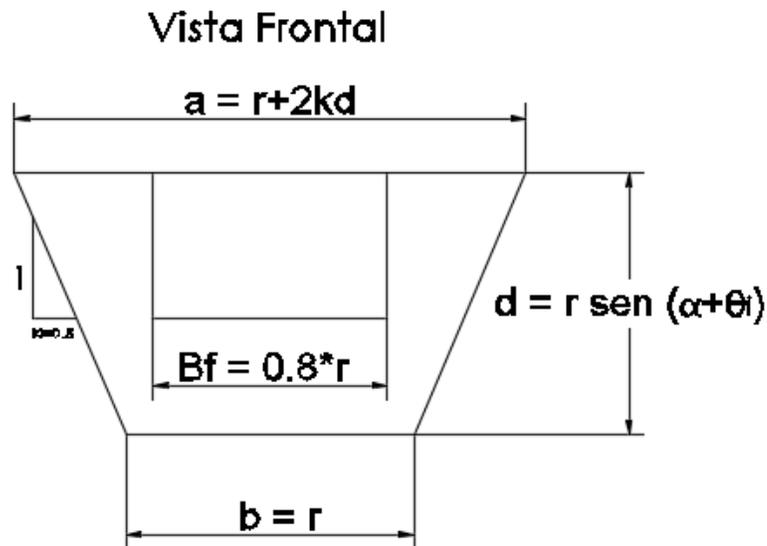


Figura 8. Dimensiones características de una compuerta tipo AMIL

APLICACIÓN DE ESTRUCTURAS FLUÍDICAS EN CANALES PARA EL CONTROL DEL LLENADO Y VACIADO DE TÚNELES. CASO DE ESTUDIO TÚNEL EL TECORITO

Tabla 1 Expresiones para dimensionar una compuerta tipo AMIL

Descripción	Expresión	unidades y comentarios
Radio de la compuerta (variable independiente)	$r = \left[\frac{Q \text{ l/s}}{1.3 \left(\frac{\text{l cm}}{j_{max}} \right)^{0.4}} \right]^{2.5} = \left[\frac{Q \text{ l/s}}{2.343 j_{cm}^{0.4}} \right]^{2.1}$	La r calculada debera ser cambiada por su inmediata superior de la serie; (m)
Angulo del sector del flotador	$\alpha = 30^\circ$	(grados)
Angulo del sector de pantalla inferior	$\theta = 23^\circ$	(grados)
Talud de la hoja de la compuerta	$k = 0.5$	(adim)
Altura bordo libre de la compuerta	$B.L. = 0.1r$	(m)
Placa de soporte superior	$Ps = 0.18r$	(m)
Espesor del flotador	$Ef = 0.09r$	(m)
Longitud interior del flotador	$Lfi = \frac{\pi \alpha r}{180}$	Sobre hoja de la compuerta; (m)
Longitud exterior del flotador	$Lfe = \frac{1.09 \pi \alpha r}{180}$	(m)
Ancho del flotador	$Bf = 0.8r$	(m)
Altura vertical del flotador	$Hf = r \text{sen} \alpha$	(m)
Longitud total de la hoja de la compuerta	$Lc = \frac{\pi(\alpha + \theta_i)r}{180}$	(m)
Longitud de la pantalla inferior de la compuerta	$Lp = \frac{\pi \theta_i r}{180}$	(m)
Altura vertical de pantalla inferior	$H_p = r \text{sen} \theta_i$	(m)
Carga hidraulica sobre la compuerta	$d = r \text{sen}(\alpha + \theta_i)$	(m)
Abertura maxima de la compuerta	$w = r[\text{sen}(\alpha + \theta_i) - \text{sen} \theta_i]$	(m)
Ancho de la base de la compuerta	$b = r$	(m)
Ancho superior de la compuerta	$a = r + 2kd = r(1 + 2k \text{sen}(\alpha + \theta_i))$	(m)
Longitud del brazo frontal superior	$l_1 = r \cos(\alpha/2)$	(m)
Longitud de brazo posterior	$l_2 = \frac{r \text{sen}(\alpha/2)}{\tan \theta_i}$	(m)
Altura de soporte central	$d_0 = r \text{sen}(\alpha/2)$	(m)
Longitud de brazo posterior inferior	$l_3 = \frac{r \text{sen}(\alpha/2)}{\text{sen} \theta_i}$	(m)
Longitud del brazo frontal intermedio	$l_4 = r$	(m)
longitud del brazo frontal inferior	$l_5 = r$	(m)
Radio de contrapeso	r_c	(m)
Radio de contrapeso posterior	r_p	(m)

3.5.2 Dimensionamiento de la compuerta AMIL para el modelo del Tecorito

Con las fórmulas registradas en la tabla 1 se obtuvieron los siguientes resultados para el dimensionamiento de la compuerta tipo AMIL, que se debe instalar en el modelo físico del túnel en estudio obteniendo los siguientes resultados tanto para el modelo físico como para el prototipo:

$$r_m = 0.197 \text{ m}$$

$$r_p = 6.12 \text{ m}$$

con estos radios ingresándose en la fórmula:

$$J = (1.2938556)r^{2.5}$$

$$J = (0.2293) * r$$

se obtienen gastos de:

Q máx: 20 l/s para el modelo
 Q máx.: 120 m³/s para el prototipo

Tabla 2 Dimensiones para diferentes radios de las compuertas tipo AMIL

r	alpha	theta	K	B.L	Ps	Ef	Lfi	Lfe	Bf	Hf	Lc	Lp	Hp	d	w	b	a	l1	l2	l3	l4	l5	do	rc	rp	Qmax	Jmax	Qmin
m	grad	grad	Adim	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m ³ /s	m	m ³ /s
0.10	30.00	23.00	0.50	0.01	0.02	0.01	0.05	0.06	0.08	0.05	0.09	0.04	0.04	0.08	0.04	0.10	0.18	0.10	0.06	0.07	0.10	0.10	0.03			0.004	0.02	0.002962707
0.20	30.00	23.00	0.50	0.02	0.04	0.02	0.10	0.11	0.16	0.10	0.18	0.08	0.08	0.16	0.08	0.20	0.35	0.19	0.12	0.13	0.20	0.20	0.05			0.02	0.05	0.012396721
4.00	30.00	23.00	0.50	0.40	0.72	0.36	2.09	2.28	3.20	2.00	3.70	1.61	1.56	3.19	1.63	4.00	7.19	3.86	2.44	2.65	4.00	4.00	1.04			41.40	0.92	7.13899823
4.25	30.00	23.00	0.50	0.43	0.77	0.38	2.23	2.43	3.40	2.13	3.93	1.71	1.66	3.39	1.73	4.25	7.64	4.11	2.59	2.82	4.25	4.25	1.10			48.18	0.97	8.11367605
4.50	30.00	23.00	0.50	0.45	0.81	0.41	2.36	2.57	3.60	2.25	4.16	1.81	1.76	3.59	1.84	4.50	8.09	4.35	2.74	2.98	4.50	4.50	1.16			55.58	1.03	9.15419689
4.75	30.00	23.00	0.50	0.48	0.86	0.43	2.49	2.71	3.80	2.38	4.39	1.91	1.86	3.79	1.94	4.75	8.54	4.59	2.90	3.15	4.75	4.75	1.23			63.62	1.09	10.26098003
6.12	30.00	23.00	0.50	0.61	1.10	0.55	3.21	3.49	4.90	3.06	5.66	2.46	2.39	4.89	2.50	6.12	11.01	5.91	3.73	4.06	6.12	6.12	1.58			120.00	1.40	17.53306650

Una vez que se obtuvieron los resultados de los elementos de la compuerta AMIL para el modelo físico se inició con el diseño de la misma.

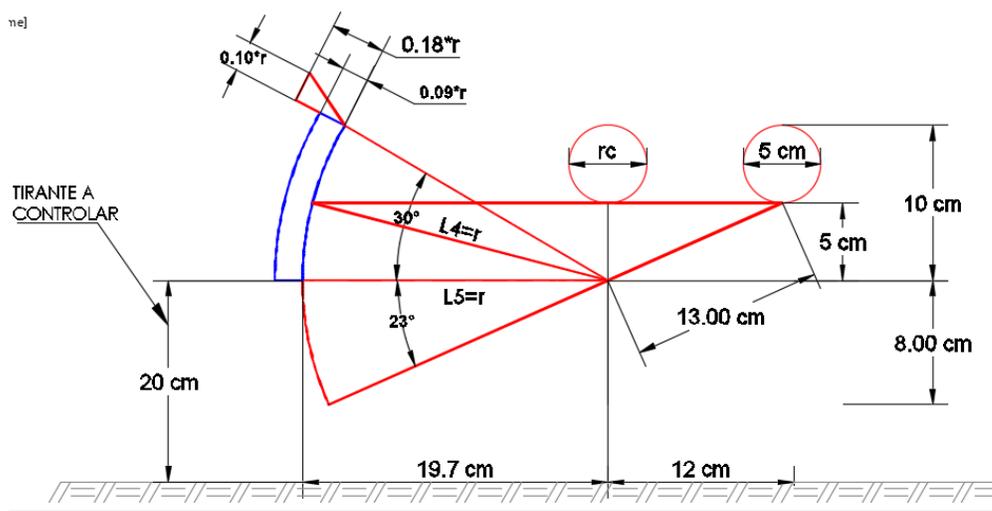


Figura 9. Dimensiones características de una compuerta tipo AMIL

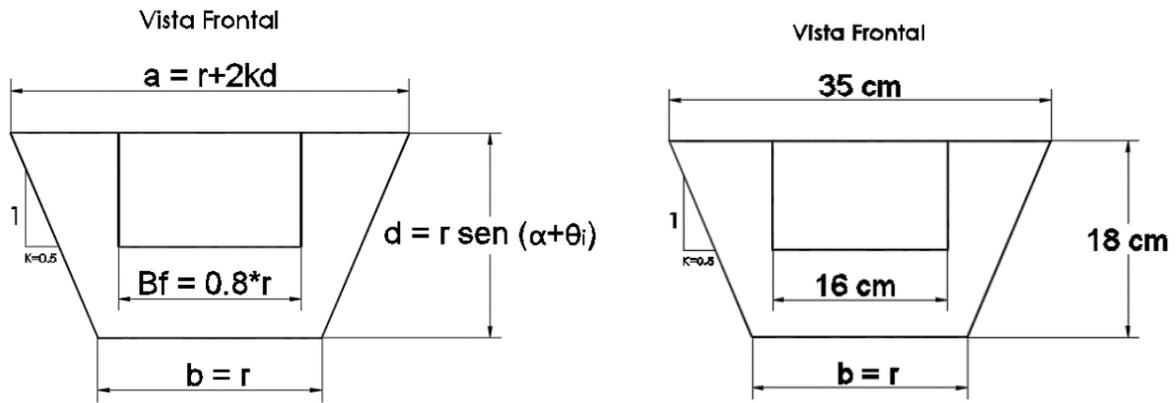


Figura 10 Vista frontal de la compuerta tipo AMIL

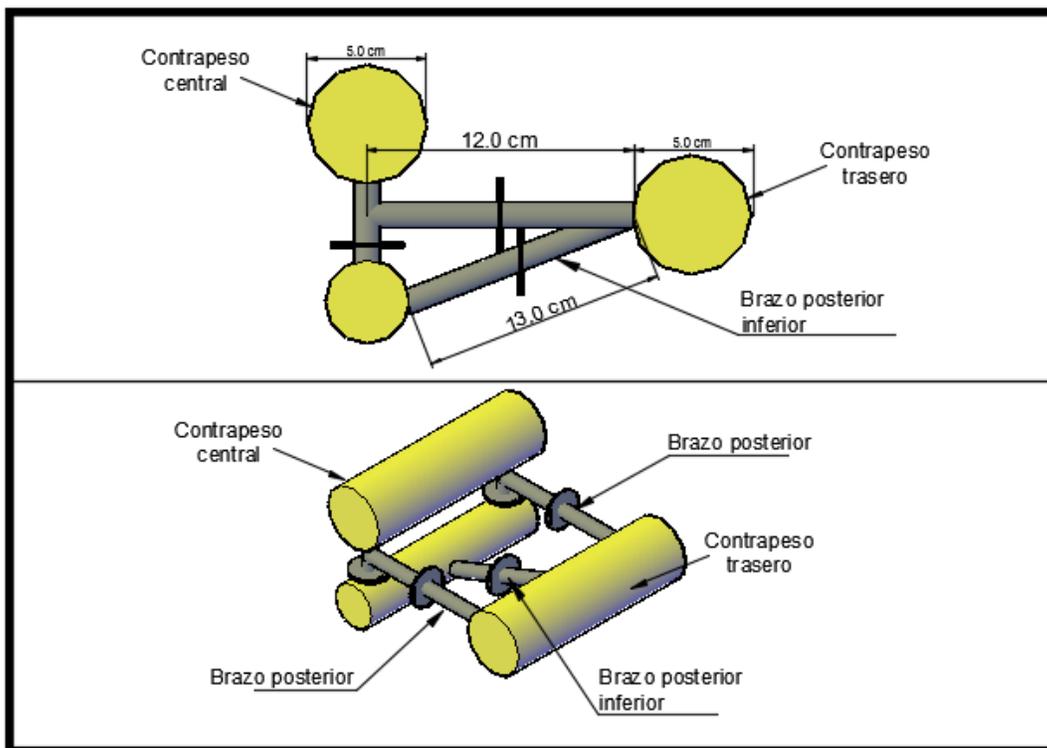


Figura 11 parte trasera de una compuerta AMIL

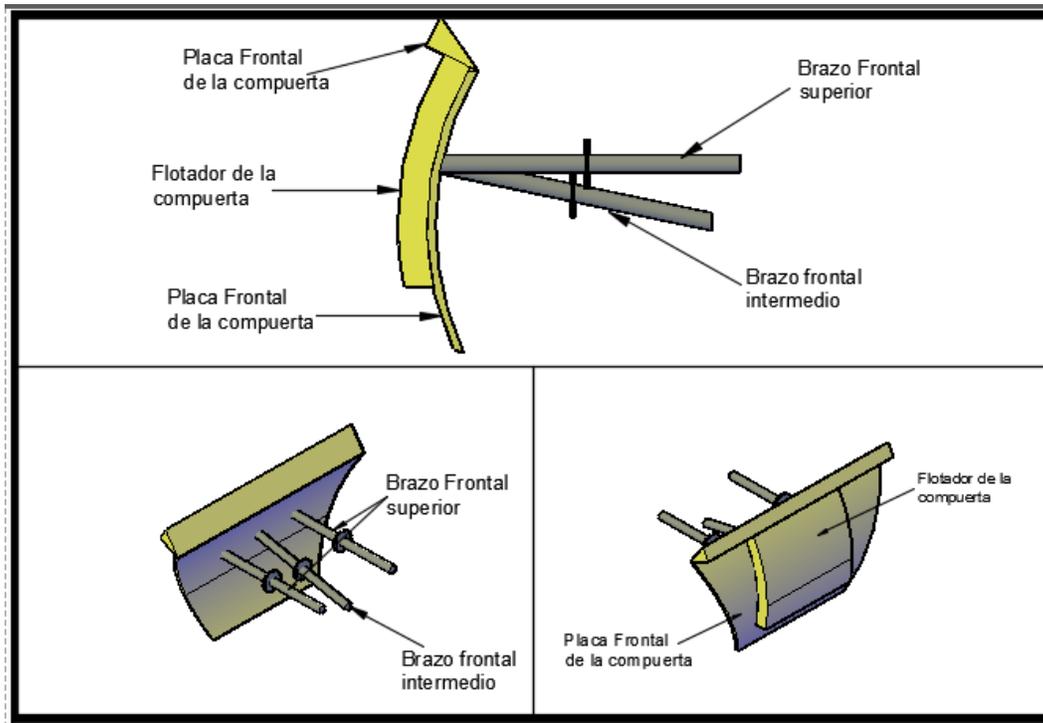


Figura 12. Partes de la placa y brazos de una compuerta AMIL

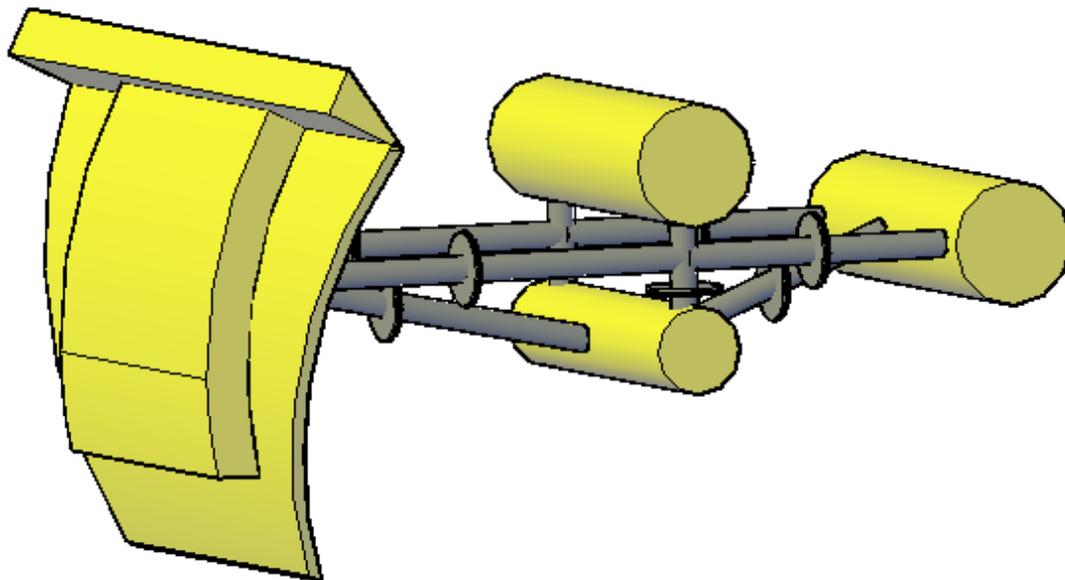


Figura 13 Modelo tridimensional de una compuerta AMIL

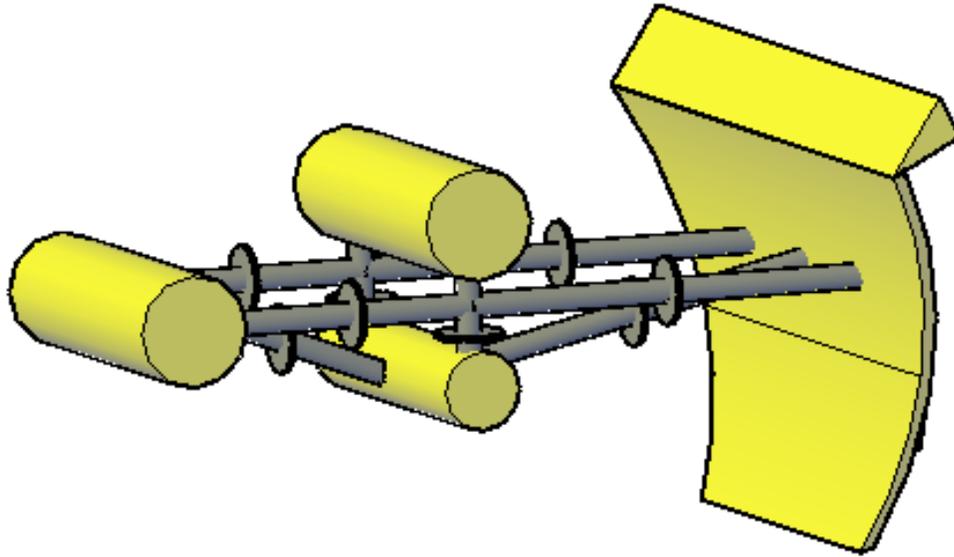


Figura 14 Modelo tridimensional de una compuerta AMIL

3.5.3 Construcción de la compuerta AMIL para el modelo

Después de obtener el dimensionamiento físico de la compuerta tipo AMIL se procedió a su construcción. Por ser tan pequeña fue necesario llevar un estricto control de los detalles en el taller de metal mecánica.



Figura 15 Placas de solera para compuerta AMIL



Figura 16. Placa frontal de la compuerta AMIL con un radio de 19.7 cm



Figura 17. Soportes para flotador frontal de la compuerta AMIL



Figura 18. Placa frontal de la compuerta con un radio de diseño de 19.7 cm



Figura 19. Bidas para uniones de brazos frontales y posteriores



Figura 20. Eje central de la compuerta AMIL



Figura 21. Unión de eje central con contrapeso central



Figura 22. Unión de contrapeso trasero al contrapeso central y eje central de la compuerta AMIL.



Figura 23. Unión de parte trasera de la compuerta a la placa frontal



Figura 24. Vista superior del modelo de la compuerta tipo AMIL

4 Pruebas experimentales

4.1 Pruebas experimentales sin compuerta AMIL

La primera etapa de las pruebas experimentales se realizó con el modelo del túnel sin la compuerta AMIL instalada y sin control del nivel aguas abajo.

Tabla 3. Datos del modelo sin la compuerta

Datos en modelo sin compuerta							
Variador de Frecuencia (%)	45	50	56	58	60	66	70
Q _{modelo} (l/s)	13.45	14.11	15.24	16.19	16.68	16.43	16.68
Q _{prototipo} (m ³ /s)	84.15	88.28	95.35	101.29	104.36	102.79	104.36
Carga vertedor triangular (cm)	15.60	15.90	16.40	16.80	17.00	16.90	17.00
Tirante a la salida del túnel (cm)	8.50	8.60	8.30	8.30	7.80	7.50	7.50
Tirante a la entrada del túnel (cm)	22.50	22.80	26.50	30.00	33.63	37.23	40.83
Carga entrada del túnel aguas arriba (cm)	2.30	3.40	5.80	7.40	7.80	8.50	8.70
Carga salida del túnel aguas abajo (cm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00



Grafica 1 Relación gasto – carga del túnel

- Δh_e = Incremento de carga a la entrada (cm)
- Δh_s = Incremento de carga a la salida (cm)

APLICACIÓN DE ESTRUCTURAS FLUÍDICAS EN CANALES PARA EL CONTROL DEL LLENADO Y VACIADO DE TÚNELES. CASO DE ESTUDIO TÚNEL EL TECORITO

Se observa que para un gasto máximo alcanzado en modelo es de 16.68 l/s que equivale a 104.36 m³/s en prototipo se obtiene una carga de cero sobre la clave o parte superior del diámetro a la salida del túnel y de 8.70 cm a la entrada del mismo, se observa que el túnel comienza a presurizarse de aguas arriba hacia aguas abajo, sin lograr presurizarse completamente ya que el tirante a la salida del túnel alcanzado por el gasto máximo fue de 7.50 cm y el diámetro de túnel es de 19.7 cm.



Figura 25. Carga aguas arriba del túnel de 8.70 cm, presurización con gasto de 16.68 l/s equivalente en prototipo a 104.36 m³/s



Figura 26. Vista del túnel aguas abajo con un gasto de 16.68 l/s equivalente en prototipo a 104.36 m³/s

APLICACIÓN DE ESTRUCTURAS FLUÍDICAS EN CANALES PARA EL CONTROL DEL LLENADO Y VACIADO DE TÚNELES. CASO DE ESTUDIO TÚNEL EL TECORITO

Para calibrar el modelo y poder contrastar con las pruebas obtenidas en el prototipo en campo, las cuales se muestran en la tabla 4 se hizo la conversión correspondiente y el ajuste de niveles aguas abajo del túnel para representar el mismo escenario en el modelo físico y observar su comportamiento. De acuerdo con las escalas se trasladaron al modelo los siguientes datos obteniendo los siguientes datos

Tabla 4. Campañas de medición en campo

CAMPAÑAS DE MEDICIÓN EN CAMPO					
Gastos en m ³ /s	34.54	65.30	76.50	79.20	85.72
Profundidad Aguas Arriba km 7+911 (m)	2.09	3.78	4.66	4.62	5.00
Profundidad Aguas Abajo km 9+200 (m)	3.17	4.66	4.95	5.06	5.15

Tabla 5. Equivalencias para el modelo de las mediciones en campo

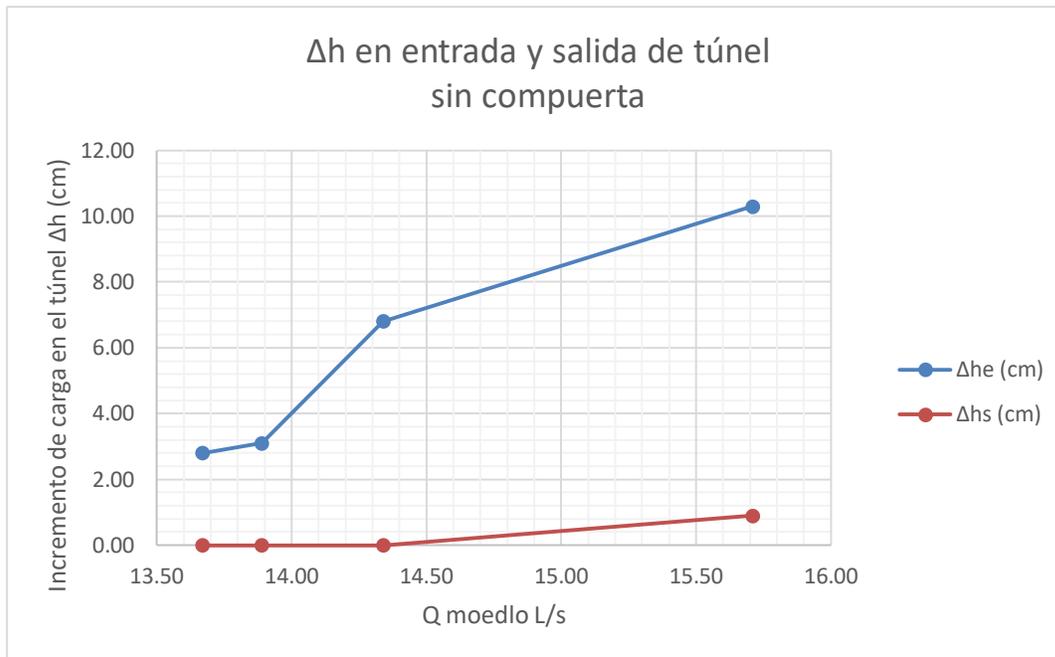
DATOS EN MODELO					
Gastos en m ³ /s	5.52	10.44	12.23	12.66	13.70
Profundidad Aguas Arriba km 7+911 (m)	0.06	0.11	0.14	0.14	0.15
Profundidad Aguas Abajo km 9+200 (m)	0.10	0.14	0.15	0.15	0.16

Una vez calibrado el modelo fue factible realizar diferentes pruebas en el modelo bajo condiciones iniciales equivalentes presentadas en las campañas de medición en campo.

La siguiente tabla muestra un resumen de los resultados obtenidos para diferentes gastos.

Tabla 6. Datos del modelo sin compuerta bajo condiciones iniciales equivalentes en la medición de campo

Datos en modelo sin compuerta					
Variador de Frecuencia (%)	54	58	62	65	
Qmodelo (l/s)	13.67	13.89	14.34	15.71	
Qprototipo (m ³ /s)	85.53	86.90	89.72	98.29	
Carga vertedor triangular (cm)	15.70	15.80	16.00	16.60	
Tirante a la salida del túnel (cm)	16.00	16.30	19.00	20.60	
Tirante a la entrada del túnel(cm)	22.50	22.80	26.50	30.00	
Carga entrada del túnel aguas arriba (cm)	2.80	3.10	6.80	10.30	
Carga salida del túnel aguas abajo (cm)	0.00	0.00	0.00	0.90	



—●— Δh_e = Incremento de carga a la entrada (cm)

—●— Δh_s = Incremento de carga a la salida (cm)

Para un gasto en modelo de 13.67 l/s equivalente a 85.53 m³/s en prototipo tenemos los siguientes datos:



Figura 27. Profundidad a la salida del túnel = 16 cm



Figura 28. Profundidad a la entrada del túnel = 22.50 cm

Para un gasto en modelo de 13.89 l/s equivalente a 86.90 m³/s en prototipo tenemos los siguientes datos:



Figura 29. Profundidad a la salida del túnel = 16.30 cm



Figura 30. Profundidad a la entrada del túnel = 22.80 cm

Para un gasto en modelo de 14.34 l/s equivalente a 89.72 m³/s en prototipo tenemos los siguientes datos:



Figura 31. Profundidad a la salida del túnel = 19.00 cm



Figura 32. Profundidad a la entrada del túnel = 26.50 cm

Para un gasto en modelo de 15.71 l/s equivalente a 98.29 m³/s en prototipo tenemos los siguientes datos:



Figura 33 Profundidad a la salida del túnel = 20.60 cm



Figura 34. Profundidad a la salida del túnel = 30.00 cm

Con estas condiciones cuando el túnel se llena de aguas arriba hacia aguas abajo el túnel se ahoga en la entrada y a la salida del túnel, pero ocurre un atrapamiento de aire dentro de este reduciendo la capacidad hidráulica. En las imágenes incluidas en la figura 34 se muestra como la burbuja de aire atrapado está a lo largo de todo el túnel.



Figura 35. Imágenes con burbuja de aire atrapado dentro del túnel



Figura 37b. Vista



Figura 36c. Vista



Figura 38d. Vista

4.2 Estudio numérico del funcionamiento hidráulico del túnel el Tecorito

Como complemento a lo anterior y con el fin de caracterizar mejor el funcionamiento del túnel a continuación se presentan los resultados obtenidos mediante modelación numérica por Millán, et al en 2014. Para tal fin utilizó el software comercial FLOW-3D TM para la simulación del comportamiento hidráulico en el túnel. Para ello se utilizó información recabada en campo (gastos - tirantes) y también datos proporcionados por el software SIC 5.3, los cuales fueron tomados a 10 m de la entrada y a 10 m de la salida del túnel.

Los resultados de las simulaciones muestran que cuando circulan por el túnel gastos alrededor de 90 m³/s el túnel funciona intermitentemente a superficie libre y a presión. Por otro lado, debido a la geometría, topografía del canal y a la existencia de obras de control adelante del túnel, el nivel del tirante aguas abajo se remansa lo que provoca que se formen una especie de "tapones" que impiden el libre flujo en el túnel. Además, debido a la gran longitud de éste último sumado a las transiciones abruptas de la entrada y salida como ya se ha mencionado, provocan que se presente un fenómeno conocido como "swirling", éste se caracteriza porque el flujo al mismo tiempo que avanza va girando.

De los datos obtenidos en este estudio se concluye que sólo es posible conducir el gasto de 120 m³/s si los taludes del canal son sobre elevados 1.70 m en la sección aguas arriba y 0.25 en la sección aguas abajo, respecto al nivel de los taludes actuales, y que el túnel funcione a presión.

Los resultados arrojados por el estudio numérico son satisfactorios ya que reproduce adecuadamente no sólo los patrones del movimiento del agua que se observan a simple vista a la entrada y a la salida del túnel, sino además los datos considerados como referencia (tabla 7). Con esta confianza, algunos resultados de este estudio se utilizan como punto de partida para la modelación física del sistema en estudio. Millán, et al (2014)

Tabla 7 Tirantes obtenidos con el software FLOW-3D™ con evaluación del error en porcentaje

Q, m³/s	h aar mod,m	h aab mod, m	error % har	error % hab
34.536	3.6262	4.1376	2.49529443	0.53846154
79	4.0533	5.037824	1.01831502	0.45793322
85	4.62411	5.1579	0.94023136	0.75235713
90	5.0527	5.3988	-0.23209681	0.22546664
91.5	5.1424	5.475369	0.55269774	-0.00673973
92.5	5.2127	5.3945	0.6158246	1.98946221

4.3 Proceso experimental con compuerta AMIL

Para poder presurizar el túnel de manera eficiente se procedió a colocar la compuerta a la salida del túnel para iniciar con las mismas pruebas, pero ahora con el nivel aguas abajo del túnel controlado a través de la compuerta tipo AMIL.



Figura 39. Nivelación de compuerta con marco de acero en modelo del túnel el Tecorito ubicado en laboratorio Enzo Levi



Figura 40. Colocación de compuerta en modelo físico

Cuando la compuerta quedo totalmente armada se procedió a colocación en el modelo del túnel ubicado en el laboratorio Enzo Levi, soportada por un marco de acero con el cual se fabricó especialmente para colocar la compuerta tipo AMIL



Figura 41. Colocación de soporte de acero para compuerta tipo AMIL

Una vez colocada la compuerta en el marco y sobre el canal del modelo se ajustó para pasar con su respectiva calibración.

4.3.1 Procedimiento de calibración

El proceso de calibración se puede resumir en dos pasos:

1.- Una vez que se ha instalado la compuerta AMIL y estando vacío el canal, se lastró el contrapeso trasero hasta que la compuerta quedó balanceada. Es importante mencionar que una vez que se ha realizado el balanceo los compartimentos deben quedar perfectamente sellados para que no entre agua para que no afecte el peso del lastre que se ha utilizado y provoque alteraciones en el balanceo

2.- Se baja la compuerta de tal manera que la hoja radial toque fondo, es decir, su piso de asiento. En esta posición se hace circular un gasto cualquiera, se recomienda que no sea menor del 20% del gasto máximo de diseño y se lastra el contrapeso del centro de tal manera que la compuerta permanezca cerrada hasta que el nivel aguas arriba alcance el nivel del eje de giro, para este caso fue de 20 cm.



Figura 42. Calibración de compuerta tipo AMIL ya instalada en el modelo físico



Figura 43. Pruebas experimentales en modelo físico

APLICACIÓN DE ESTRUCTURAS FLUÍDICAS EN CANALES PARA EL CONTROL DEL LLENADO Y VACIADO DE TÚNELES. CASO DE ESTUDIO TÚNEL EL TECORITO

Una vez que la compuerta se instaló se procedió a hacer las pruebas obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 8 Datos del modelo con la compuerta AMIL

Datos en modelo con compuerta																					
Variador de Frecuencia (%)	40	42	44	45	46	47	48	50	52	54	56	58	60	61	62	63	64	66	68	70	72
Qmodelo (l/s)	4.54	5.00	6.28	7.27	7.73	8.86	9.37	9.73	10.08	10.45	12.61	12.82	13.24	13.46	13.89	13.89	15.25	15.48	15.83	16.68	16.92
Qprototipo (m ³ /s)	28.39	31.29	39.28	45.53	48.38	55.44	58.64	60.84	63.08	65.38	78.89	80.19	82.84	84.18	86.91	86.91	95.39	96.85	99.07	104.36	105.9
Carga vertedor triangular (cm)	10.1	10.5	11.5	12.2	12.5	13.2	13.5	13.7	13.9	14.1	15.2	15.3	15.55	15.60	15.80	15.80	16.40	16.50	16.65	17.00	17.10
Carga entrada del túnel aguas arriba (cm)	0.00	0.00	0.00	0.40	0.40	1.00	1.00	2.10	3.00	3.33	3.90	4.50	5.50	5.70	7.10	7.00	7.80	9.10	9.70	10.70	11.30
Carga salida del túnel aguas abajo (cm)	0.00	0.00	0.00	0.80	0.80	1.00	1.00	1.20	1.40	0.70	0.60	0.70	0.50	0.6	1.0	0.6	0.3	0.90	0.80	0.60	0.60

Cuando se alcanzó un gasto de 7.27 l/s equivalente a 45.48 m³/s el túnel se presurizó aguas arriba alcanzando una carga de 4 mm y aguas abajo una carga de 8 mm como podemos observar la presurización fue más alta aguas abajo.

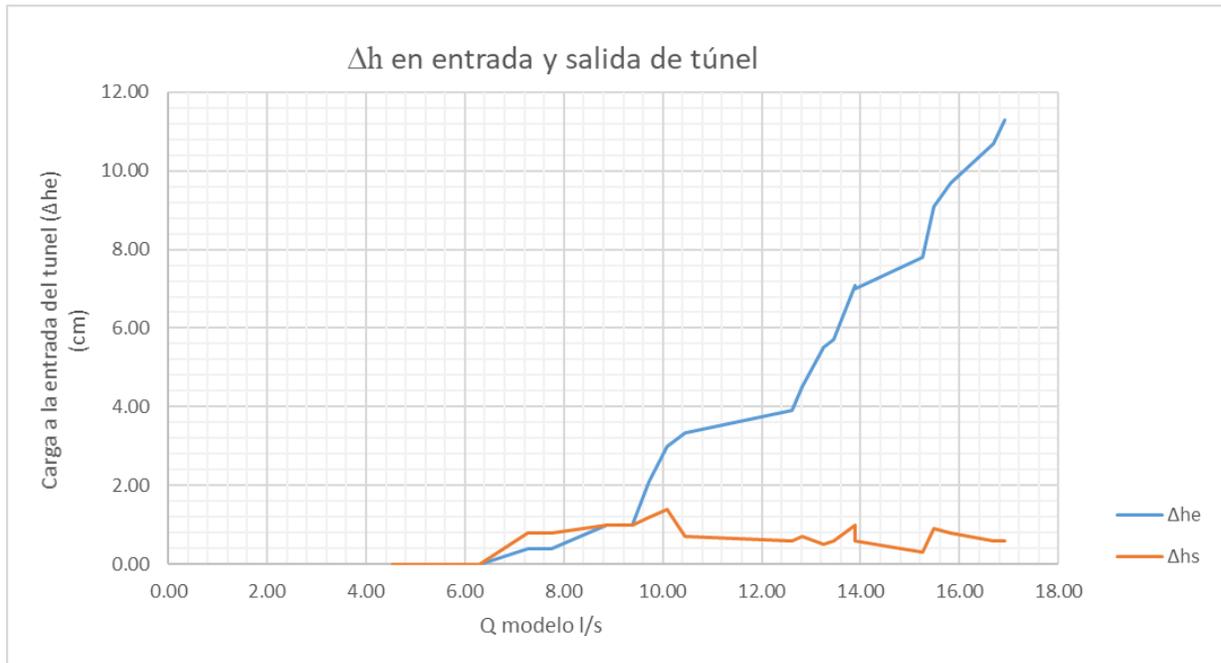


Figura 44. Carga aguas arriba (h=4mm)

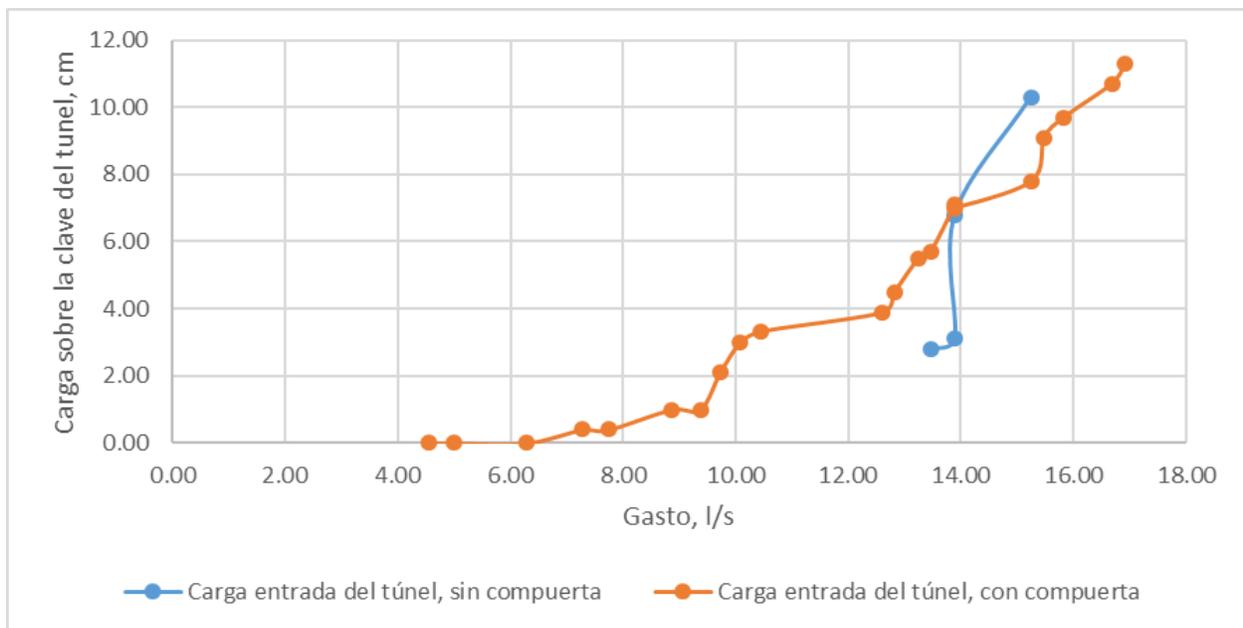


Figura 45. Carga aguas abajo (h=8 mm)

En la siguiente gráfica podemos observar como el incremento de carga a la entrada del túnel (Δh_e) se va disparando a medida que se aumenta el gasto, mientras que el incremento a la salida de túnel tiende a mantener un nivel más equilibrado dentro de un rango de 8 mm y 1 cm, teniendo como pico una carga de 1.40 cm. De esta manera la gráfica (2) nos muestra que se tiene una mayor estabilidad en el tirante a la salida del túnel, con lo que se demuestra que la compuerta está controlando el nivel a la salida del túnel y con ello garantizando su presurización desde aguas abajo hacia aguas arriba.

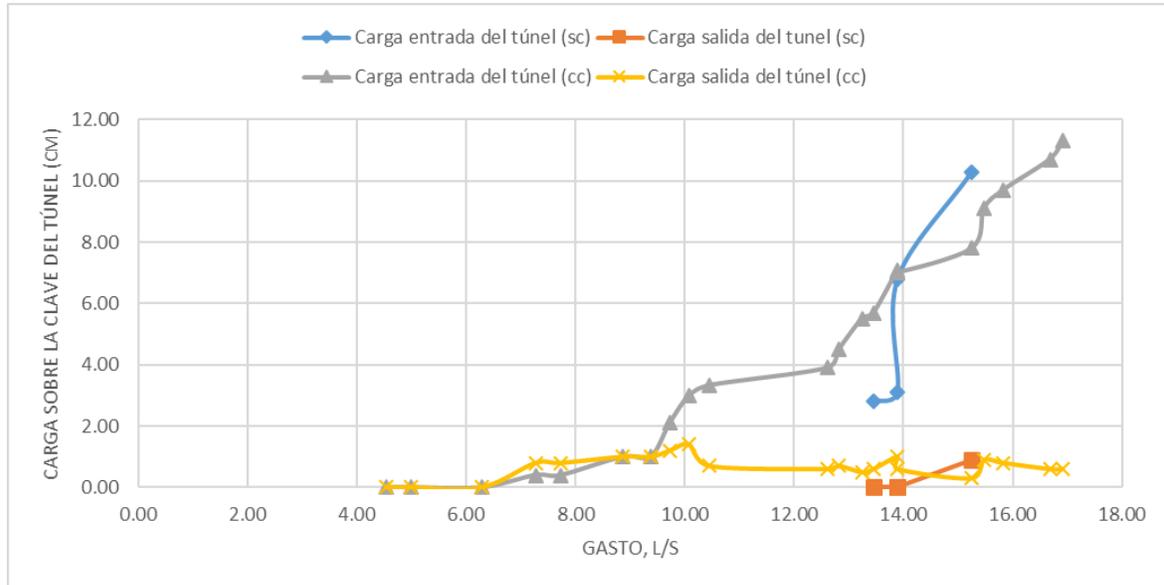


Grafica 2 Comportamiento de tirantes a la entrada y salida del túnel con compuerta



Grafica 3 Comportamiento del incremento de carga (Δh) a la entrada del túnel con compuerta y sin compuerta

APLICACIÓN DE ESTRUCTURAS FLUÍDICAS EN CANALES PARA EL CONTROL DEL LLENADO Y VACIADO DE TÚNELES. CASO DE ESTUDIO TÚNEL EL TECORITO



Gráfica 4 Comportamiento de la carga sobre el túnel a la entrada y salida con y sin compuerta

Revisando las gráficas se aprecia que ante la misma carga de ahogamiento a la salida del túnel, para un gasto del orden de 15.6 l/s, la carga de presión sobre la clave de la entrada del túnel es de 10.5 cm, esto cuando no se tiene instalada la compuerta AMIL, mientras que, con compuerta, para el mismo caudal la carga en la entrada resulta de 9.5 cm. Este diferencial de carga corresponde a 33 cm en el prototipo, por lo que la capacidad de conducción del túnel se ve mejorada con el control de llenado que aporta la compuerta AMIL.

En lo que se refiere a capacidad de conducción volumétrica también se aprecia una clara mejora con el control de la compuerta AMIL, así, por ejemplo, para el túnel con una carga de presión a la entrada de 8 cm, el gasto circulante es de 14.75 l/s (92.18 m³/s) cuando no hay compuerta de control, mientras que con compuerta resulta de 15.4 l/s (96.24 m³/s), lo que corresponde a un incremento del 4.5% que en prototipo representa un diferencial de 4 m³/s.

Diferencia del túnel sin la compuerta instalada y con la compuerta instalada en el canal



Figura 46. Canal sin compuerta, con presencia de aire atrapado dentro del túnel.



Figura 47. Canal con la compuerta AMIL instalada a la salida del túnel, con ausencia de aire atrapado.

5 Conclusiones

En este trabajo, por primera vez, se utilizó una compuerta tipo AMIL para controlar el nivel de descarga de un túnel ligado a un canal de riego, de manera particular se aplicó en el modelo físico del túnel el Tecorito, demostrando la factibilidad técnica y las mejoras que en la operación le aporta este control al funcionamiento del túnel ante el proceso de presurización y despresurización del mismo. De manera particular se logró demostrar que es factible controlar el proceso de llenado al cambiar el funcionamiento del flujo dentro del túnel al pasar de un flujo a superficie libre a un flujo presurizado; con lo que se logra un llenado y vaciado eficiente que incluye el control y expulsión gradual (hacia aguas arriba) del aire que queda en el interior del túnel durante el proceso de llenado, ver figuras 48 49 y 50.



Figura 48. En esta figura se observa una burbuja de aire muy cerca de la salida del túnel



Figura 49. Se observa que la burbuja de aire se encuentra más alejada de la salida del túnel.



Figura 50. La burbuja de aire se va expulsando gradualmente de aguas abajo hacia aguas arriba.

También en las siguientes figuras se observa que las burbujas de aire de gran tamaño se van fragmentando en pequeñas burbujas.



Entre otros aspectos se logró:

1.- Dimensionar, diseñar, construir, instalar y calibrar un pequeño modelo de una compuerta tipo AMIL, fuera de la serie estándar de las dimensiones tradicionales que normalmente se manejan y comercializan.

2.- Se logró demostrar el funcionamiento y operación de la compuerta tipo AMIL para el control del nivel a la salida de un túnel, aspecto del cual no se tiene registro en la literatura especializada.

Se puede concluir que, aunque no es la única opción de solución para este problema, el uso de compuertas AMIL es una alternativa viable para controlar el paso gradual de flujo a superficie libre a flujo presurizado en un túnel, además de que abre las expectativas para considerar este tipo de estructuras fluídicas para el control del funcionamiento hidráulico de un túnel u otra estructura presurizada inmersa dentro de un canal.

6 Bibliografía

Barrios Domínguez, N., Gaytan Bautista, R., Ortiz Gómez, R., Bautista Capetillo, C., Aguilar Hernandez, E., & Garcia Villanueva, N. H. (2001). Estudio y validación en laboratorio de una compuerta tipo AMIL.

García, N. H. (2016). *Operación de canales Conceptos generales*. México.

Millán Barrera, C., Salgado Maldonado, G., & Arroyo Correa, V. M. (2014). Estudio numerico del funcionamiento hidraulico del tunel tecorito. *XXIII ongreso Nacional de Hidraulica*.

Pedroza González, E., & Hinojosa Cuéllar, G. A. (2014). *Manejo y distribución del agua en distritos de riego*. México.