

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



***“DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DEL
COEFICIENTE DE DESCARGA EN UNA
COMPUERTA AUTOOPERANTE TIPO AMIL”.***

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

**PRESENTA
EDER NATERAS RODRÍGUEZ**

**ASESOR DE TESIS
ING. JESÚS MARTÍN CABALLERO ULAJE**

MORELIA, MICHOACÁN, ENERO 2006

AGRADECIMIENTOS:

A ti Jehová Dios:

“Lámpara es a mis pies tu palabra, y lumbrera a mi camino” Salmo 119:105

A ti, mi DIO Padre Amoroso por ser tu hijo, por todo el amor que me das y todas las Bendiciones que he recibido de ti, por que por ti, soy lo que soy. Por que en ti están mis fuerzas. Padre Gracias...

“A él sea la gloria y el imperio por los siglos de los siglos. Amén” 1ra Pedro 5:11.

A ti Madre:

Por ser mi madre y darme un gran ejemplo que eres tú, por todos tus sabios consejos que me has dado, te agradezco que me hayas hecho un hombre de bien y por dedicarme tu vida a mi... “Dios te Bendiga Madre Mía”

A mis Hermanos (Jaime, César y Cindy):

Les Agradezco todo el cariño, comprensión y el apoyo que tienen conmigo en todo momento y por que ante adversidades hemos seguido juntos apoyándonos mutuamente, Karla y Josías por traer más felicidad a esta familia.

A mi Papá:

Por haberme concebido, por los años que me dedicaste y por sus consejos.

Al Ing. J. Martín Caballero Ul.:

Ante todo gracias por su amistad y por querer ser mi asesor de tesis, por todas las enseñanzas que me ha dado, por el apoyo que me ha brindado, los consejos que me ha dado... Gracias.

Agradecer a la U.M.F.N.H por mi formación como profesionalista al igual que la Facultad de Ingeniería Civil, a los profesores que me dieron esa formación, en especial al Ing. Benjamín Pérez Morales y el Ing. Everardo Urquiza Marín por haberme apoyado en la realización de este trabajo. A todos los que cooperaron voluntariamente en el trabajo experimental. A mis amigos que me apoyaron en toda mi vida y en mi carrera (María del Bryan, Brenda, Juanchus, Ricardo, Jaime, Kochill, Óscar, Erick, Apolo, Fanny, Migue, Chucho, Rodolfo y Marco) por que les servia como conejillo de india para ir a los tacos (jaja) por todos los momentos vividos con ustedes que para mi son inolvidables y por los toquines con “The Leagens” y las Serenatas que llevamos...

“Porque mejor es la sabiduría que las piedras preciosas”. Proverbios 8:11a

CONTENIDO

	PAG.
CAPÍTULO 1.- ANTECEDENTES.	3
1.1. Obtención del coeficiente de descarga (C_d) en compuertas planas y radiales.	4
1.2. Compuertas autobasculantes tipo Amil.	5
1.3. Compuertas Amil utilizadas como aforadoras de gasto.	7
CAPITULO 2.- INTRODUCCIÓN.	9
2.1. Obtención del Coeficiente de Descarga en Compuertas Planas y Radiales.	9
2.2. Funcionamiento de la Compuerta Amil.	14
2.2.1. Descripción y Operación.	14
2.2.1.1. Descripción de la Compuerta.	14
2.2.1.2. Principio de Operación.	16
2.2.1.3. Instalación y Mantenimiento.	18
2.2.1.4. Control de Calidad.	19
2.2.1.5. Documentos y Soporte Técnico.	20
2.2.1.6. Selección y Diseño de una Compuerta.	21
2.2.1.6.1. Dimensiones Típicas de una Compuerta Amil.	23
2.2.1.6. Resumen de las Características y Datos Importantes.	26
2.2.2. Análisis de fuerzas estáticas y dinámicas.	28
2.2.2.1. Análisis de fuerzas estáticas en la compuerta Amil.	28
2.2.2.2. Análisis de fuerzas dinámicas en la compuerta Amil.	30
2.2.3. Situaciones de Uso de las Compuertas Amil.	31
2.2.3.1. Beneficios asociados al Uso de Compuertas Amil.	33
2.3. Método de regulación en canales.	35
2.3.1. Método de regulación Aguas Arriba.	35
2.3.2. Método de regulación Aguas Abajo.	36
2.3.3. Método de regulación Mixta.	37
CAPITULO 3.- INSTALACIÓN EXPERIMENTAL Y COMPUERTA AMIL.	38
3.1. Adecuación de la Instalación experimental y Compuerta Amil.	38
3.1.1. Características de la Compuerta Amil.	41
3.1.1.1. Modificaciones a la Compuerta Amil.	41
3.1.2. Verificación de las condiciones de medición en un vertedor de pared delgada Triangular	43
3.1.3. Colocación de Instrumentación.	48
CAPITULO 4.- REALIZACIÓN DE MEDICIONES.	49
4.1. Programa de Mediciones y Gráficas.	49
4.2. Procedimiento Experimental y Captura de Datos.	50

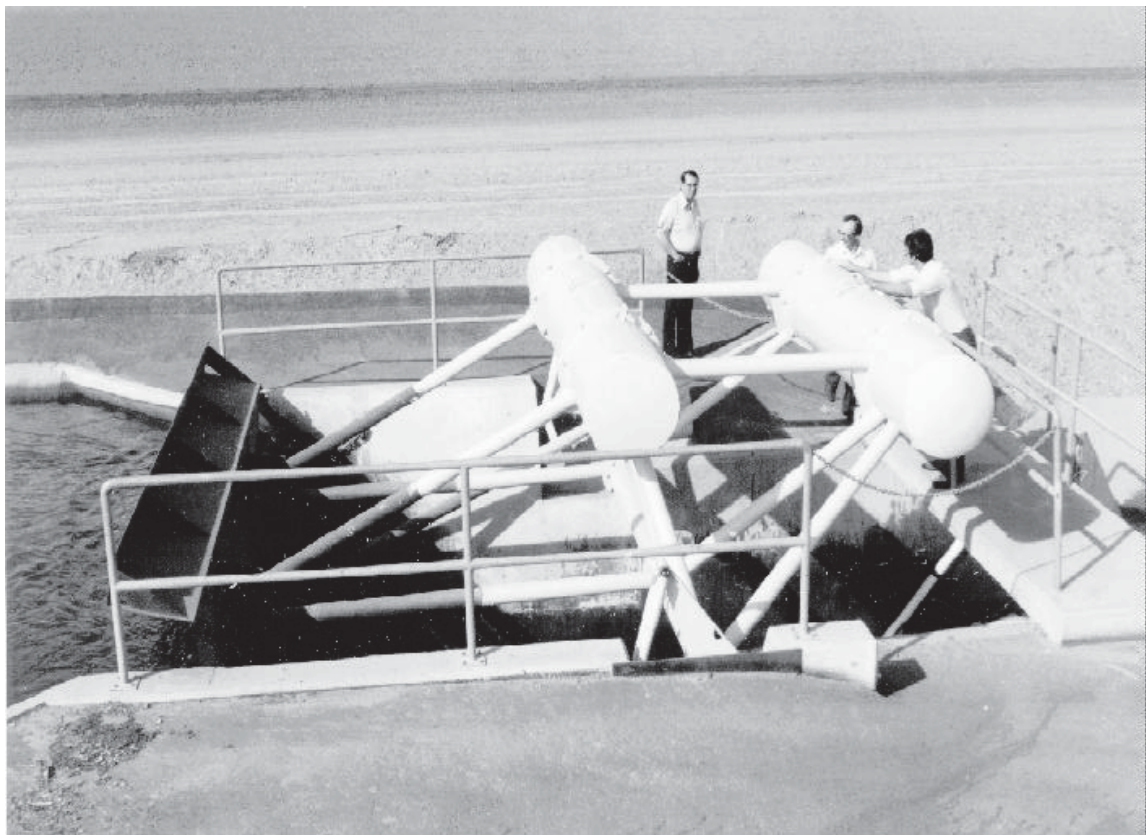
CAPÍTULO 5.- ANÁLISIS DE RESULTADOS.	51
4.1. Cuadro de Datos y Gráficas.	51
4.2. Funcionamiento de la Compuerta.	72
CAPÍTULO 6.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	75
CAPÍTULO 7.- BIBLIOGRAFÍA.	76
REFERENCIAS	79
ANEXO FOTOGRÁFICO	i

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES.

En el año de 2001 el Ing. Salvador Moreno Suárez, Residente General de Construcción del proyecto Cupatitzio – Tepalcatepec en el Estado de Michoacán, en ese entonces diseñó, construyó e instaló una compuerta radial tipo *Amil* en el Laboratorio de Hidráulica “Ing. David Hernández Huéramo” con la finalidad de conocer las causas por las cuales este tipo de compuertas no están funcionando adecuadamente en el campo. Cabe mencionar que no se tiene conocimiento de algún documento que consigne todos los resultados del trabajo del Ing. Salvador Moreno Suárez.

En el modelo de la Compuerta *Amil* se hace una descripción breve de los componentes que la forman y su función de cada una de las partes que la conforman y las fuerzas que actúan en ella (estáticas y dinámicas).

La presente Tesis tiene como objetivo principal el determinar la variación del coeficiente de descarga (C_d) en función del gasto y de su correspondiente abertura de la compuerta. Esto debido a que la determinación del coeficiente de descarga es una variable importante en el diseño hidráulico de estas compuertas autooperantes. Otro objetivo que se va a tratar en esta Tesis es la determinación del gasto que pasa a través de un vertedor de pared delgada triangular mediante un procedimiento de calibración volumétrica.



Un ejemplo de compuerta Amil que mantiene el nivel constante aguas arriba.

1.1. Obtención del Coeficiente de Descarga (C_d) en compuertas planas y radiales.

Una Compuerta consiste en una placa móvil, plana o curva, que al ser levantada permite graduar la altura del orificio que se va descubriendo, a la vez que controla la descarga producida. El orificio generalmente se hace entre el piso de un canal y el borde inferior de la compuerta, por lo que su ancho coincide con el del canal; en estas condiciones el flujo puede considerarse bidimensional.

Gentilini (Ref. 1) realizó investigaciones en compuertas planas inclinadas y radiales, con descarga libre, donde en unas gráficas se presentan los Coeficientes de Descarga (C_d) con un ángulo de inclinación.

De las experiencias de Gentilini se han ocupado varios investigadores como Jouskowsky y Vedérnikov (Ref. 2) de la Unión Soviética, Franke de Alemania (Ref.3), Henry de Estados Unidos de Norteamérica (Ref. 4) y Cofré y Buchheister de Chile (Ref. 5), Knapp (Ref. 6) y Henderson (Ref. 7) exponen una comparación interesante de algunos de estos resultados que presentan discrepancias importantes atribuibles, según Knapp (Ref. 6), al grado de agudeza de canto afilado de la compuerta. Henderson, por el contrario, concluye que esto se debe a la manera como se desarrolla la capa límite a partir del plano de la compuerta. Cofré y Buchheister (Ref. 5) comprobaron y ampliaron los resultados obtenidos por Henry. Se incluye el caso de las compuertas con descarga ahogada en el que se ha calculado el coeficiente de descarga, que depende de una relación de tirante y abertura.

Gentilini presentó sus valores del coeficiente de descarga en compuertas radiales con descarga libre, en función del ángulo y de la relación tirante- abertura que en el capítulo 2 se describe.

Las experiencias de Toch hasta ahora son las más completas en lo que se refiere a las compuertas radiales, pues incluye el caso de descarga sumergida. Toch los presenta los coeficientes de descarga por medio de unas gráficas las cuales se han relacionado con los tirantes de entrada y de salida y la altura del perno de la compuerta con el radio de giro de la compuerta. Esta forma de presentación resulta más cómoda de utilizar que la Gentilini

1.2. Compuertas Autobasculantes tipo Amil.

Generalmente el uso de compuertas automáticas obedece a la necesidad de controlar niveles en almacenamientos, tanques o canales.

Se tienen algunos antecedentes de este tipo de compuertas, denominadas automáticas, cuyas referencias datan de los años 1952-1956, desarrolladas por la Sociedad Grenobles de Estudios y Aplicaciones Hidráulicas (SOGRAH) la cual llevó a cabo numerosos estudios referentes a dispositivos de control de niveles y gastos (Ref. 9).

En la SOGREAH se han llevado a cabo muchos estudios referentes a dispositivos de control de niveles y gastos, habiéndose comprobado su eficiencia en la aplicación a sistemas de canales de riego localizados en Francia, Marruecos, Argelia y otros lugares.

Respecto a las compuertas se ha desarrollado tres tipos básicos en la SOGREAH. La primera mantiene constante el nivel aguas arriba, la segunda hace lo mismo con el nivel aguas abajo; la tercera es una compuerta mixta que mantiene el nivel aguas arriba de ella entre dos límites definidos.

Una compuerta auto-operante, en general, es aquella que no requiere de la intervención de la mano del hombre ni de la aplicación de energía externa para su funcionamiento ya que aprovecha la fuerza de gravedad y la energía disponible del agua expresada en las fuerzas hidrostáticas y dinámicas del agua. Para lograr su movimiento automático la compuerta utiliza una estructura compuesta por contrapesos y flotadores.

Es conveniente mencionar que un riesgo inherente a este tipo de compuertas es que dependen de un mecanismo balanceado el cual resulta muy vulnerable a ser alterado por la simple adición o extracción de un contrapeso y por lo tanto modifica el adecuado funcionamiento de la compuerta.

Las compuertas radiales auto-operantes típicas de acción directa sobre el nivel desarrollada en la década de los años cincuenta bajo la firma de una compañía francesa que lleva su mismo nombre, y actualmente producidas por su sucesora la compañía Alston-Fluides. Estas compuertas han sido empleadas exitosamente en distintos proyectos de irrigación alrededor del mundo y son manufacturadas en serie bajo tamaños estándar para cada uno de los tres sistemas de control más comunes.

Este tipo de estructuras auto-operantes están diseñadas para mantener constante el nivel de la superficie libre del agua inmediatamente hacia aguas arriba de la sección de control. Este tipo de compuertas responden automáticamente en función del flujo y del nivel del agua que controla, por lo que no requiere tampoco de cables, elevadores, ni de ninguna estructura complicada, utilizando únicamente, para su balanceo, un flotador sobre la cara frontal de la placa radial que conforma la compuerta.

Compuertas AMIL para mantener el control de niveles aguas arriba (figura 1.1).

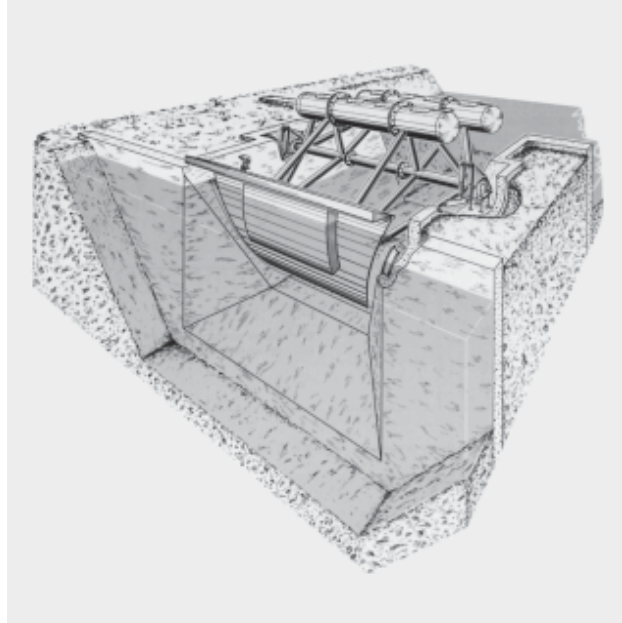


Fig.1.1 Compuerta auto-operante tipo Amil.

Estas compuertas están diseñadas para operar con el criterio de control de nivel aguas arriba (figura 1.2). 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, derivada del empuje de Arquímedes que actúa sobre el mismo, y a la fuerza que ejerce el 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.

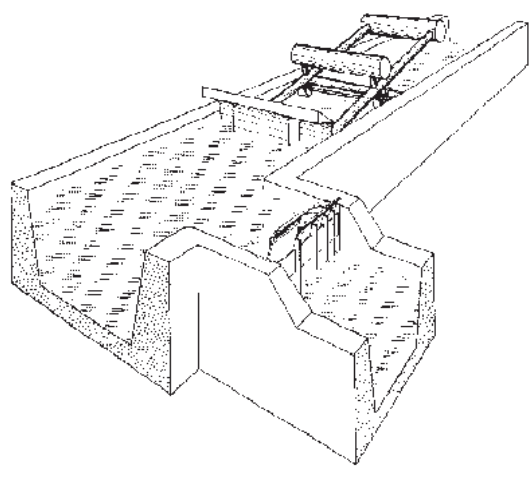


Figura 1.2. Control del nivel aguas arriba para derivar agua.

1.3. Compuertas Amil utilizadas como aforadoras de gasto.

Para que la compuerta radial sea utilizada como estructura aforadora debe localizarse de preferencia antes de caídas o rápidas, con la finalidad de que descargue libremente, sin embargo, si hay remanso de manera constante, se puede calibrar funcionando como un ahogamiento.

Debido a las diferencias en la construcción de las compuertas, es necesario realizar la calibración en campo cada una, para que puedan funcionar como estructuras aforadoras y así obtener la curva, tabla y ecuación, que relacionan la carga con el gasto.

Cuando varias compuertas tienen condiciones similares de operación y características geométricas iguales, se puede calibrar una para obtener sus coeficientes de descarga. Con un trabajo detallado de aforos, para cada condición de trabajo de descarga libre o ahogada, se pueden obtener mediante aforos. Cuando esto es posible, se reduce mucho el trabajo de calibración.

Para llevar a cabo la selección de una compuerta Amil son fundamentales el diseño mecánico e hidráulico. El diseño mecánico consiste en determinar las dimensiones del flotador y la magnitud de los contrapesos para mantener la compuerta en equilibrio para las condiciones de operación requeridas. El diseño hidráulico consiste en determinar la descarga en función de la abertura de la compuerta, de manera que esta funcione para el gasto de diseño. Retomando la idea central del diseño hidráulico, de determinar la descarga para una abertura de la compuerta, y llevándola un poco adelante, se podría considerar la posibilidad de utilizar la compuerta Amil como una estructura de aforo, para lo cual sería necesario conocer los coeficientes de descarga, el tirante aguas arriba y la abertura de la compuerta en servicio. Por otra parte cabría preguntarse si podría desprejarse la velocidad de llegada a la compuerta. Para responder a esta pregunta y avanzar de alguna manera en la determinación de los coeficientes de descarga de una compuerta Amil se llevará a cabo la determinación de estos en una compuerta Amil instalada en el laboratorio de Hidráulica de la Universidad Michoacana y se medirán las velocidades medias de llegada.

$$Q = C A \sqrt{2g \left(y_1 + \alpha \frac{v_1^2}{2g} \right)} \quad \text{ec.1.3.1.}$$

Ven Te Chow (Pág. 473) anota literalmente que para propósitos de estudios experimentales la carga de velocidad en la ecuación (1.3.1) puede omitirse y su efecto se puede incluir en el coeficiente C. Donde C será un coeficiente dependiente de la geometría de la estructura (área transversal de la descarga) y de la carga efectiva. Esta afirmación tiene validez para las compuertas planas y radiales, pero tal vez no pueda extrapolarse para las compuertas del tipo Amil en las cuales, para gastos variables la carga será casi constante aguas arriba y por lo tanto el perímetro mojado y el área hidráulica será mucho mayor que en una compuerta radial en un canal rectangular para una misma abertura de la compuerta.

En una tesis de licenciatura realizada por Maria del Carmen Ponce de León en el año de 2002 utilizando la misma compuerta Amil que utilizaremos para este estudio se puede observar claramente en una grafica en la que hace una comparación de gastos medidos en la compuerta Amil contra gastos obtenidos teóricamente para una compuerta Radial en canal rectangular que a partir de aberturas un poco menores a los 5 cms los gastos medidos se hacen cada vez mas grandes respecto de los teóricos conforme crece la abertura de la compuerta. Lo anterior de entrada nos indica que los coeficientes de descarga para la compuerta Amil serán significativamente más grandes que los obtenidos para compuertas radiales rectangulares.

CAPÍTULO 2. INTRODUCCIÓN.

2.1. Obtención del Coeficiente de Descarga en Compuertas Planas y Radiales.

Como ya se mencionó anteriormente la compuerta es una placa móvil, plana o curva, que al levantarse permite graduar el orificio que va a ser descubierto. El orificio generalmente se hace del piso del canal y el borde inferior de la compuerta, por lo que el ancho coincide con el ancho del canal; bajo estas condiciones el flujo puede considerarse bidimensional (Figuras 2.1 y 2.2).

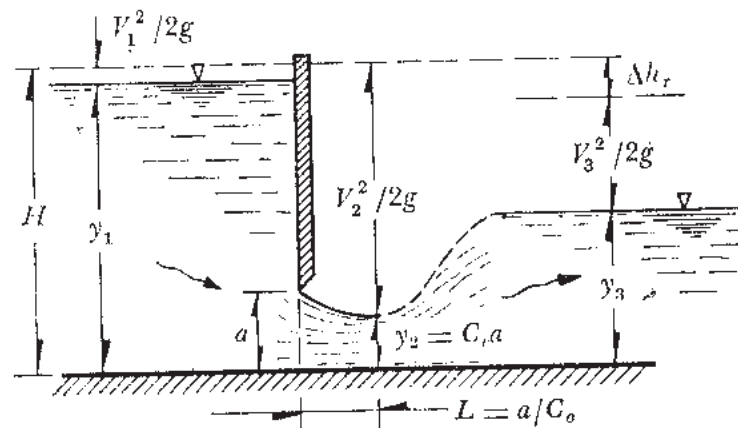


Figura 2.1. Compuerta Plana.

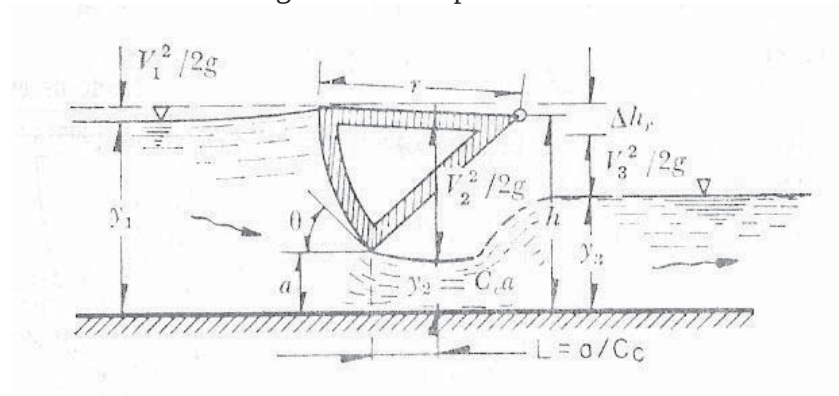


Figura 2.2. Compuerta Radial.

El gasto de una compuerta y las características hidráulicas de su descarga se pueden conocer a partir de una red de flujo (figura 2.3) permite explicar con claridad la contracción que experimenta el chorro descargado por el orificio de altura a , hasta alcanzar un valor $C_d a$ en una distancia L en la que las líneas de corriente se vuelven horizontales y tienen por ello una distribución hidrostática de presiones. Debido al fenómeno de contracción y a la fricción del piso, se produce una pérdida de carga Δh_r que influye en el cálculo del gasto. Asimismo, la carga de velocidad $V_1^2/2g$ con la que llega el agua en el canal, aguas arriba de la compuerta, tiene mayor importancia a medida que la relación y_1/a disminuye.

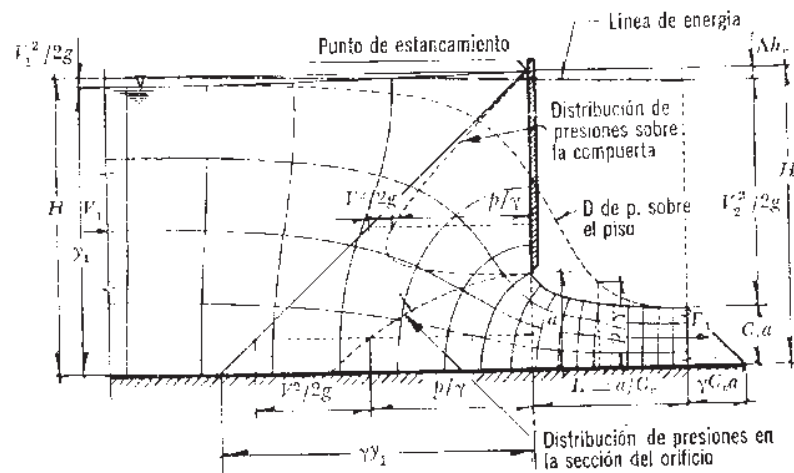


Figura 2.3. Red de Flujo para una Compuerta Plana.

En el canto inferior de la compuerta las líneas de corriente tienden a unirse y es ahí donde la velocidad adquiere su máximo valor. Debido a la curvatura de las líneas de corriente una gran presión actúa sobre la línea de intersección del plano de la compuerta, razón por la cual se tiene una velocidad pequeña.

Para obtener la ecuación que proporcione el gasto, aquí se considera el caso más general de una compuerta plana, con una inclinación θ° respecto a la horizontal (Figura 2.4) y un ancho b . La inclinación θ° es equivalente a la de la tangente en el labio de la compuerta radial de la figura 2.2, y con $\theta = 90^\circ$ incluye el caso de la compuerta vertical de la Figura 2.1. se establece la ecuación de la energía entre una sección 1, aguas arriba, de la compuerta y la sección contraída, a saber:

$$H = y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = C_c a + \frac{V_2^2}{2g} \quad (1)$$

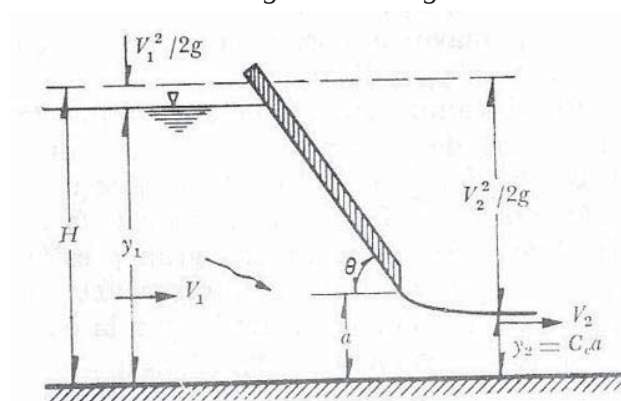


Figura 2.4. Compuerta Plana Inclinada.

Por otra parte, de la ecuación de continuidad se tiene:

$$V_1 = \frac{C_c a}{y_1} V_2 \quad (2)$$

Que sustituida en la ecuación (1) conduce a:

$$y_1 + \left(\frac{C_c a}{y_1} \right)^2 \frac{V_2^2}{2g} = C_c a + \frac{V_2^2}{2g}$$

Y de aquí tenemos que:

$$\frac{V_2^2}{2g} = \frac{\left(1 - \frac{C_c a}{y_1} \right)}{\left(1 + \frac{C_c a}{y_1} \right) \left(1 - \frac{C_c a}{y_1} \right)}$$

Por lo tanto la velocidad media real en la sección contraída es:

$$V_2 = \frac{C_v}{\sqrt{1 + \frac{C_c a}{y_1}}} \sqrt{2gy_1} \quad (3)$$

Donde C_v es el coeficiente de Velocidad.

El gasto es:

$$Q = \frac{C_c C_v b a}{\sqrt{1 + \frac{C_c a}{y_1}}} \sqrt{2gy_1}$$

$$Q = C_d b a \sqrt{2gy_1} \quad (4)$$

donde:

$$C_d = \frac{C_c C_v}{\sqrt{1 + \frac{C_c a}{y_1}}} \quad (4.a)$$

En la ecuación (4.a) $\sqrt{1 + \frac{C_c a}{y_1}}$ sirve para considerar el empleo de y_1 en lugar de H .

Si la descarga es sumergida con un tirante y_2 en el canal, aguas debajo de la compuerta se puede hacer un desarrollo análogo al anterior y obtener una expresión idéntica a la ecuación (4) para cualquier tipo de compuerta.

Los coeficientes de velocidad, de contracción y gasto los han obtenido experimentalmente muchos investigadores; sin embargo, en ningún caso se ha encontrado coincidencia en los resultados.

Los coeficientes C_c , C_v y C_d dependen, desde luego de la geometría del flujo y del número de Reynolds, en la mayoría de los problemas en la práctica, se supera el número de Reynolds a partir del cual el flujo se torna independiente de él.

Gentilini realizó investigaciones en compuertas planas inclinadas y radiales, con descarga libre. En la Figura 2.5 se presentan los coeficientes de gasto C_d obtenidos en compuertas planas con un ángulo de inclinación θ en términos de la relación y_1/a .

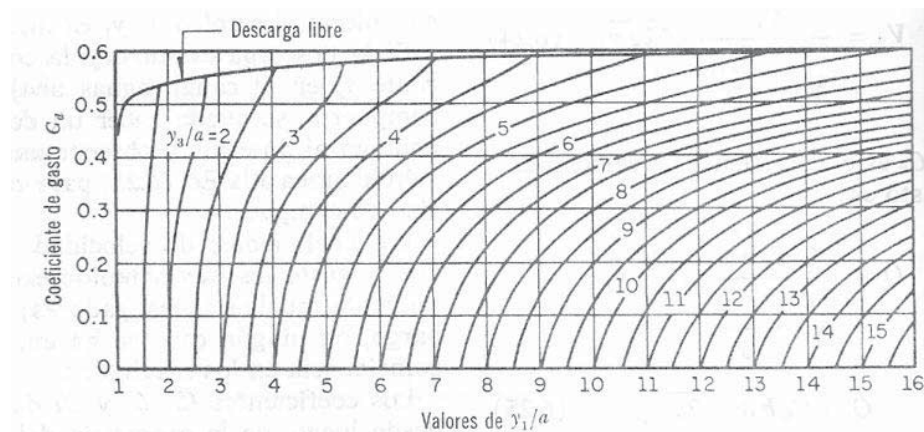


Figura 2.5. Coeficiente de Gasto de una compuerta plana vertical según Cofré y Buchheister.

Las experiencias de Gentilini incluyen el caso de la compuerta plana vertical $\theta = 90^\circ$, tipo del cual se han ocupado investigadores como Joukowski y Vedérnikov de la Unión Soviética, Franke de Alemania, Henry de los Estados Unidos de Norteamérica y Cofré y Buchheister de Chile. Knapp y Henderson exponen una comparación interesante de algunos de estos resultados que presentan discrepancias importantes atribuibles, según Knapp, al grado de agudez del canto afilado de la compuerta. Henderson, por el contrario, concluye que esto se debe a la manera como se desarrolla la capa límite a partir del plano de la compuerta.

Por los coeficientes de Gasto, Cofré y Buchheister comprobaron y ampliaron los resultados obtenidos por Henry (Fig. 2.6). Se incluye aquí el caso de las compuertas con descarga ahogada en el que se ha calculado el coeficiente de gasto C_d para que siga siendo válida la Ecuación 4. Aquí, dicho coeficiente depende de y_1/a y además de y_3/a , esto es, del tirante y_3 en el canal aguas abajo de la compuerta.

De acuerdo con la Figura 2.3 la distancia horizontal, desde el plano de una compuerta vertical hasta la sección contraída, alcanza el valor:

$$L = \frac{a}{C_c}$$

Según Joukowski y Verdérnikov, esta distancia debe ser igual a la abertura de la compuerta.

En la figura 2.6 se presentan los valores del coeficiente de gasto obtenidos por Gentilini en compuertas radiales con descarga libre y en función del ángulo θ y de la relación y_1/a , que son aplicables a la ecuación 4.

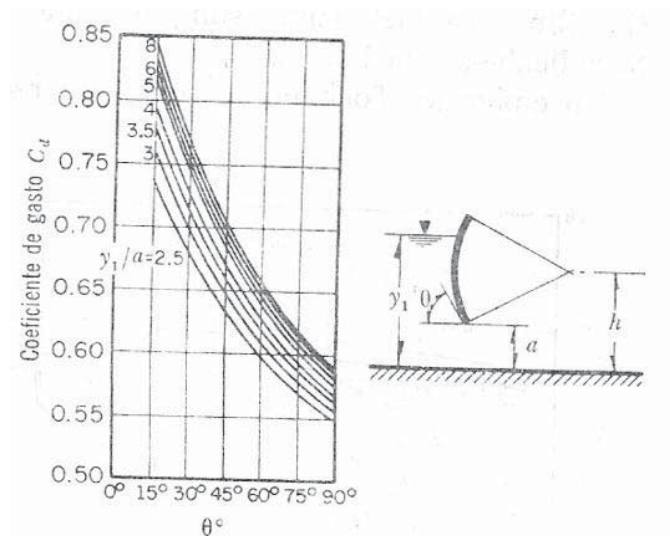


Figura 2.6. Coeficiente de gasto en compuertas radiales con descarga libre, según Gentilini.

En la Figura 2.7 se presentan los valores del coeficiente de gastos obtenidos por Toch, los cuales se han relacionado con y_1/r , a/r , y_3/r para cada valor de h/r , tanto en descarga libre como en sumergida, donde h es la altura del perno de la compuerta. Esta forma de presentación resulta más cómoda de utilizar que la de Gentilini.

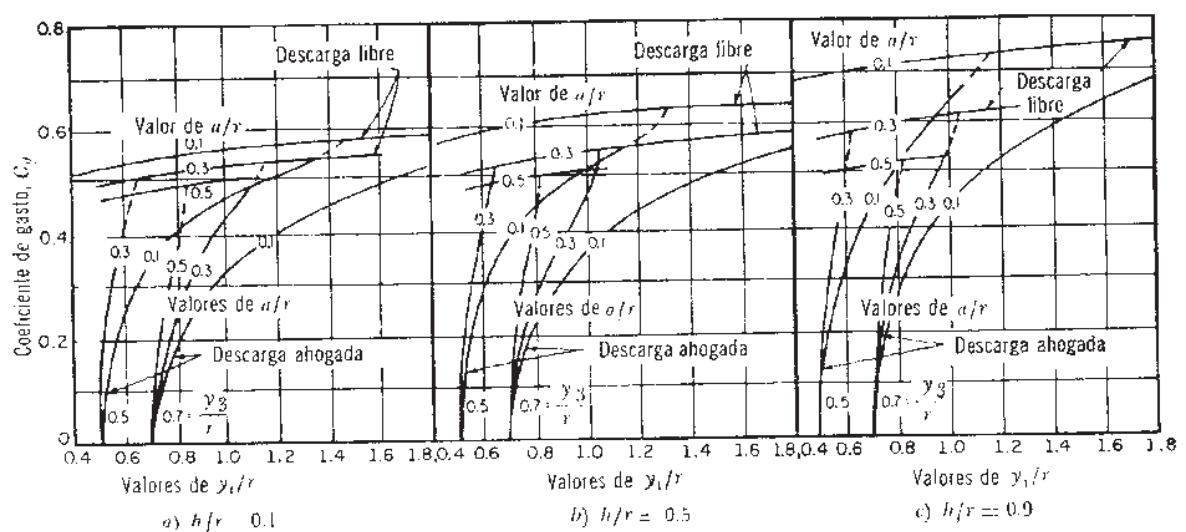


Figura 2.7. Coeficiente de gasto de una compuerta radial, según A. Toch.

2.2. Funcionamiento de la Compuerta Amil.

2.2.1. Descripción y Operación.

2.2.1.1. Descripción de la Compuerta.

Las compuertas amil son estructuras hidromecánicas que permiten manejar tirantes casi constantes aguas arriba. Estas compuertas operan con el empuje hidrostático que se ejerce sobre el flotador colocado en la hoja de la compuerta. Como estos funcionan por automatización fúidica, no requieren motores o intervención manual, ni consumen energía externa.

Este tipo de compuertas responden automáticamente en función del flujo y del propio nivel de agua que controla, por ello se han eliminado los montacargas, cables, boyas u otras estructuras complicadas y en su lugar se ha instalado un flotador que se ubica en la cara aguas arriba de la placa radial.

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, alcance rápidamente la posición de equilibrio necesaria para mantener el nivel que se desea controlar. El sistema de cojinetes en el que soporta los ejes de giro garantiza una operación prácticamente sin fricción y no adherente.

La Compuerta autooperante consta de diferentes partes que a continuación se describen para poder entender la operación de la compuerta y la función de cada una de ellas (figura 2.1):

- 1) Flotador: Este se encuentra en la parte frontal de la compuerta, su función es por medio del principio de Arquímedes produce una fuerza vertical ascendente cuando llega el agua al nivel requerido, es el elemento principal.
- 2) Placa de Acero Circular: Tiene la función de contener el agua hasta llegar el nivel que se requiera, es circular debido a que esto ayuda al flotador a abrir la compuerta con mayor facilidad.
- 3) Contrapesos: Son de forma cilíndrica y su función es de equilibrar la compuerta (3') y el otro contrapeso se utiliza como elemento auxiliar que acentúa el peso de la compuerta en el momento del cierre.
- 4) Atiesador: Se encuentra en la parte de atrás de la placa de acero circular y sirve para que tenga una rigidez suficiente para evitar alguna deformación en la placa de acero por el peso de la misma compuerta.

- 5) Eje de Giro o Eje de Rotación: Es aquí donde las fuerzas se deben de equilibrar, es la parte donde permite moverse a la compuerta.

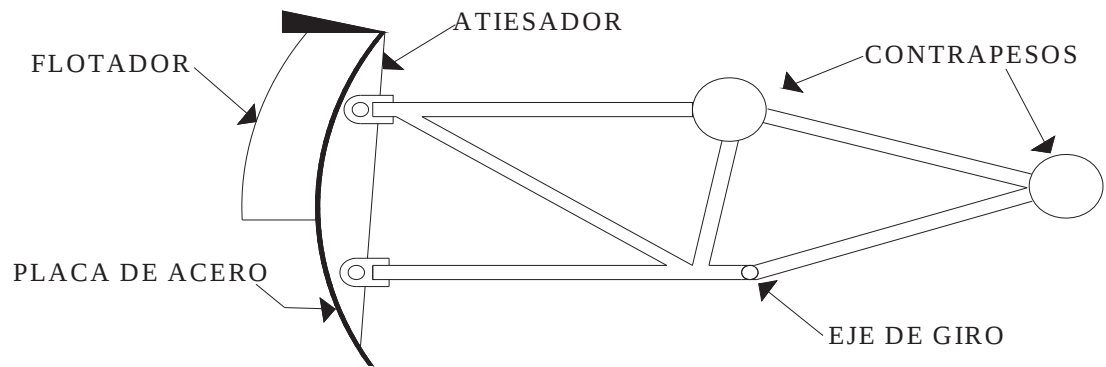


Figura 2.1. Partes de la Compuerta Amil.

2.2.1.2. Principio de Operación.

Debido a este sistema de equilibrio de momentos respecto al eje de giro, cuando el nivel del agua tiende a cambiar respecto a la elevación de operación, la compuerta entra en movimiento hasta alcanzar nuevamente su equilibrio neutral y el nivel del agua vuelve al nivel de operación ya indicado. De esta manera si el nivel inmediatamente aguas arriba de la compuerta tiende a subir, entonces la compuerta automáticamente empieza a levantarse y consecuentemente a abrir y aumentar el área hidráulica para que pase un mayor gasto y baje el nivel hasta alcanzar nuevamente el nivel de operación. Por un procedimiento semejante, cuando el nivel inmediatamente aguas arriba de la compuerta empieza a bajar, entonces la compuerta empieza a cerrar automáticamente hasta que el nivel del agua recupera su posición de operación (figura 2.2).

El control del nivel aguas arriba es un sistema en que los controladores mantienen un nivel casi constante y por consecuencia la carga en cada toma.

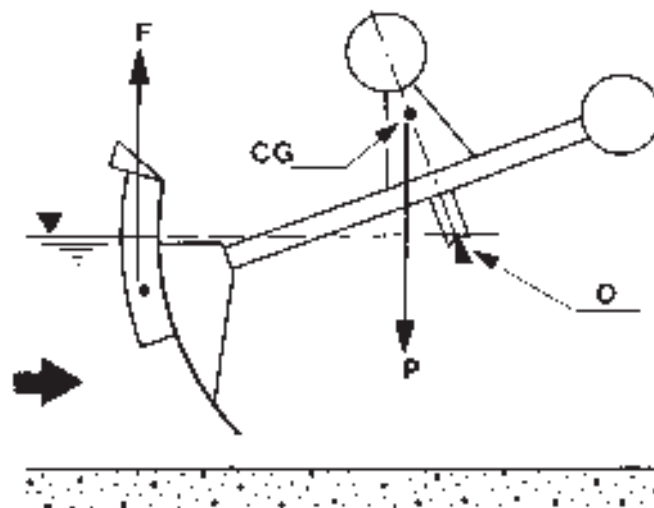
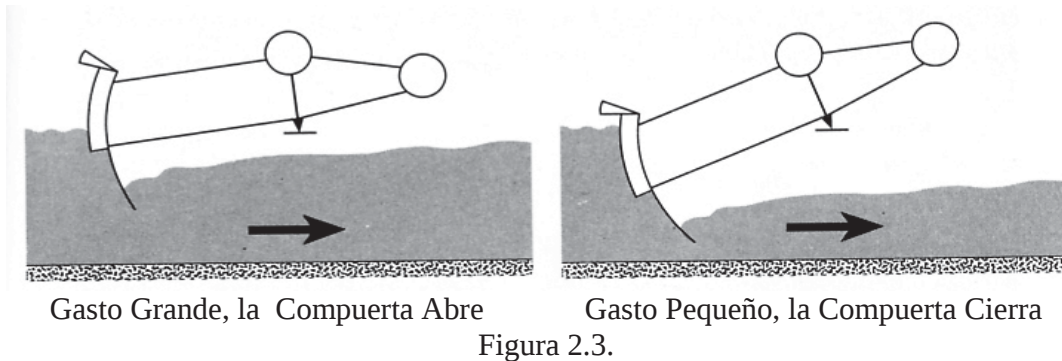


Figura 2.2. Igualación de Momentos.

La compuerta AMIL mantiene constante el nivel aguas arriba para cualquier descarga. 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, se presenta un equilibrio entre los momentos generados por el empuje hidráulico actuante en el flotador de la placa frontal y el peso de la compuerta. De aquí que, mientras se cumpla esta condición, la compuerta no removerá y permanecerá en completo equilibrio.

Cuando el flujo cambia, por un incremento o disminución de demanda, y el nivel aguas arriba tiende a subir o a 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 y cuando es un gasto grande la compuerta se abre para controlar una descarga mayor (figura 2.3.).



En este caso se pueden presentar los dos tipos de régimen, subcrítico y supercrítico. Se pueden instalar medidores de gasto en las entradas de los canales y en las tomas. Se recomienda agrupar las tomas en la vecindad aguas arriba de la estructura, puesto que es ahí donde existen las menores variaciones del nivel a gastos máximo y nulo.

En los tramos del canal la compuerta crea un efecto aguas arriba que puede propagarse hasta la siguiente compuerta. Un primer gasto en las obras de cabecera debe servir a llenar la capacidad de almacenamiento de los tramos y esto se realiza de forma sucesiva de aguas arriba hacia aguas abajo. La rapidez de almacenamiento de los tramos es función del gasto, mientras que la disponibilidad de dicho gasto es función de la distancia del tramo a la fuente de abastecimiento (Figura 2.4).



Figura 2.4. Sistema Equipado con Compuertas AMIL.

2.2.1.3. Instalación y Mantenimiento.

Los contrapesos de las compuertas se instalan en dos pasos muy simples en el sitio, se balancean las compuertas de tal manera que se instalen primero los contrapesos de la parte trasera, la compuerta AMIL requiere estar cerrada, posteriormente se coloca el contrapeso superior.

Mientras se esté derivando el gasto requerido y las variaciones del nivel aguas arriba fluctúen dentro del rango permisible, no es necesario reajustar los distribuidores, o sea, se mantiene el número de módulos que están funcionando. Esta situación permanece constante hasta que se decida cambiar la descarga en función de la demanda de los usuarios o del calendario de dotaciones previamente programado. Esta ventaja sobre equipos convencionales, que cuentan con partes móviles requieren un ajuste constante debido a que, por lo general, son muy sensibles a la variación del nivel. En general la supervisión y mantenimiento de los módulos se reduce a remover los escombros, engrasar los ejes de las partes móviles y retocar periódicamente con una capa de pintura.

Las compuertas deben fabricarse con los materiales necesarios para soportar la presión producida por el nivel máximo aguas arriba, sin descarga (y, dado el caso, por un nivel excepcional de descarga máxima).

Las compuertas consisten principalmente en una estructura de forma radial, convenientemente reforzada que embona en un canal trapezoidal; una estructura de soporte que incluya el flotador y los comportamientos del lastre; con las chumaceras en carcazas selladas, las cuales se anclarán en la estructura de concreto.

El compartimiento de flotadores y lastre debe estar protegido por un escudo diseñado especialmente para evitar cualquier depósito de sedimentos que pueda impedir el desplazamiento de la pieza móvil.

Las compuertas deben incluir cuando así se requiera un contrapeso ajustable, que permita una operación precisa, sensible y estable de la compuerta. Estando la compuerta totalmente cerrada, la fuga de agua no debe ser mayor a 85 l/s. El fabricante debe verificar y ajustar cuidadosamente la compuerta para que su ensamble en el campo ocurran sin problemas.

2.2.1.4. Control de Calidad.

De acuerdo con el Manual Práctico “Estructuras Fluídicas para la automatización de canales” del Dr. Nahum H. García V. (1998) los materiales y los equipos deben estar estandarizados por un fabricante dedicado a la construcción de este tipo de productos y que tenga los elementos para duplicar artículos que han prestado un servicio satisfactorio por más de cinco años, previos a la apertura de propuestas de una licitación. Otro fabricante puede presentar diseños alternativos que hayan sido probados y certificados por un laboratorio independiente. Todos los materiales utilizados para la construcción de la compuerta deben ser nuevos y seleccionados de acuerdo con la mejor práctica de ingeniería para este tipo de equipo. Es importante contar con un proveedor de servicios que respalde la operación y el mantenimiento del equipo y que, en opinión del ingeniero, sea conveniente para el sitio.

La compuerta debe operar en forma automática para regular el nivel sin energía eléctrica, sin motores, sin sensores de nivel y sin intervención manual.

El nivel bajo control debe ser regulado independientemente del nivel alterno, de la apertura de la compuerta y de las descargas.

Preparación de la superficie y recubrimiento. Todas las superficies deberán recibir limpieza por chorro (comercial blast cleaning. SSPC SP6). Las superficies de partes mecánicas deben ser protegidas con recubrimiento de protección en cual consistirá:

- Para superficies maquinadas, una capa de un compuesto anticorrosivo y soluble en gasolina.
- En las otras superficies, incluyendo aquellas ahogadas en concreto, se debe aplicar, en la fábrica, dos capas de pintura de poliamida o epóxica proveniente de alquitrán mineral negro o rojo oscuro (SSPC PS 11.01) para protección contra corrosión por agua y medio ambiente.

En la actualidad se están introduciendo estructuras en fibra de vidrio, en estos casos el fabricante deberá garantizar que tanto la placa de la compuerta como el resto de la estructura soporten los esfuerzos y presiones de trabajo. Para esto deberán presentar los diseños estructurales que sustentan técnicamente sus sistemas de control.

2.2.1.5. Documentación y Soporte Técnico.

El Manual Práctico “Estructuras Fluídicas para la Automatización de canales” del Dr. Nahum H. García V. (1998) señala que los Documentos que debe de entregar el Fabricante y la Ayuda a quien adquiere la Compuerta son:

Planos. Los planos deben contener la información de diseño y dimensiones así como la documentación y cláusulas especiales para su instalación. Deben acompañarse de una lista completa de los materiales y equipos, incluyendo la literatura descriptiva y técnica del fabricante, gráficas y curvas de desempeño, catálogos e instrucciones de instalación. Los planos deben mostrar la distribución y anclaje propuestos para el sistema y los accesorios, así como el diseño de las estructuras en las que se instalarán las compuertas y la relación entre el equipo y otras partes de la obra como las áreas destinadas a la operación y el mantenimiento.

Certificado de cumplimiento. Se debe proporcionar un certificado de cumplimiento en el que se deje constancia de que las compuertas suministradas corresponden a las especificaciones técnicas de los estándares de Alsthon Fluides.

Instrucciones de operación. El fabricante debe entregar seis (6) juegos completos de instrucciones y características de operación, incluyendo la descripción, paso por paso, del procedimiento para el arranque y operación del sistema, así como el nombre del fabricante, modelo, manual de servicio, lista de componentes y una breve descripción del equipo y sus características básicas de operación.

Instrucciones de mantenimiento. El fabricante debe entregar seis (6) juegos completos de instrucciones para el mantenimiento, en las cuales se listen los procedimientos de la rutina de mantenimiento, posibles fallas y reparaciones y una guía para la solución del problema.

Información sobre las piezas de repuesto. El contratista debe entregar la información sobre las piezas de repuesto correspondientes a los diferentes equipos suministrados, misma que debe incluir una lista completa de las piezas y de los consumibles, especificando los precios unitarios vigentes y los proveedores.

Servicios al fabricante. El contratista debe proporcionar los servicios de una especialista que tenga experiencia en la calibración y el balanceo del equipo en cuestión. El representante debe supervisar el calibrado y balanceo del equipo para una correcta operación.

Embarque y Entrega. En la medida de lo posible, la compuerta deben salir de la fábrica totalmente desarmadas o semiensambladas de tal forma que puedan ser armadas y atornilladas en el campo, sin tener que soldar. Las dimensiones de las partes unitarias deben ser compatibles con los espacios de los vehículos y las vías por donde se transportarán. Estos componentes más pesados deben estamparse marcas de ensamble para facilitar su armado en el campo. El embarque y la entrega de las compuertas deben hacerse con sumo cuidado con el fin de asegurar condiciones totalmente libres de daño. Se debe tener especial cuidado de no afectar el recubrimiento.

2.2.1.6. Selección y diseño de la Compuerta.

A pesar de que el diseño de la forma de las compuertas para canales de sección trapecial es estándar, la forma transversal de las compuertas puede también ser diseñadas para adaptarse a otro tipo de sección (rectangular, semicircular, ovalada, etc.) según las características del canal en que se requiere su instalación. No obstante que existe esta alternativa, debe tenerse en cuenta que por lo general es mejor aprovechar los dispositivos estándar, que ya han sido validados, que correr el riesgo de los posibles errores derivados de los diseños especiales. El rango estándar consiste en 21 medidas de compuertas con nueve diferentes radios.

Designación	Descarga Máxima (m ³ /s)	Carga mínima Requerida con la Compuerta Totalmente abierta (m)	Altura de la compuerta radial (m)
D 80 R 63	0.180	0.10	0.40
D 800 R 450	50.00	1.00	4.00

Las compuertas AMIL diseñadas en serie cubren un rango de gastos que va desde 180 l/s hasta 55 m³/s, para lo que requieren una caída o diferencial de carga disponible, entre el nivel aguas arriba y el nivel aguas abajo, de 10 cm. y 1.0 m, respectivamente.

Las compuertas se fabrican en 21 tamaños estándar; su denominación es AMIL D 80, AMIL D 90, hasta AMIL D 800. El índice D representa, aproximadamente, el ancho de la superficie libre del agua a la altura del eje de giro, y está dado en centímetros.

Para su selección se han desarrollado una serie de tablas y gráficas por medio de las cuales es factible elegir, de una manera fácil y rápida, la más apropiada. Así por ejemplo en la lámina 2.2.1. se muestra una tabla que presenta la compañía Alsthom Fluides (Gec Alsthon) en el documento de difusión denominado Compuerta AMIL identificado con el número de serie A 65 0180; 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 circula a través de la compuerta Q y la diferencia mínima de carga disponible J (diferencia de alturas mínima que se puede presentar entre el nivel inmediatamente aguas arriba de la compuerta –medido a una distancia de aproximadamente dos (2) veces D en cm. del eje de giro- y el nivel inmediatamente aguas debajo de la misma –medido a una distancia aproximadamente de cuatro (4) veces D en cm del eje de giro-(ver lámina 2.2.2.), 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 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).

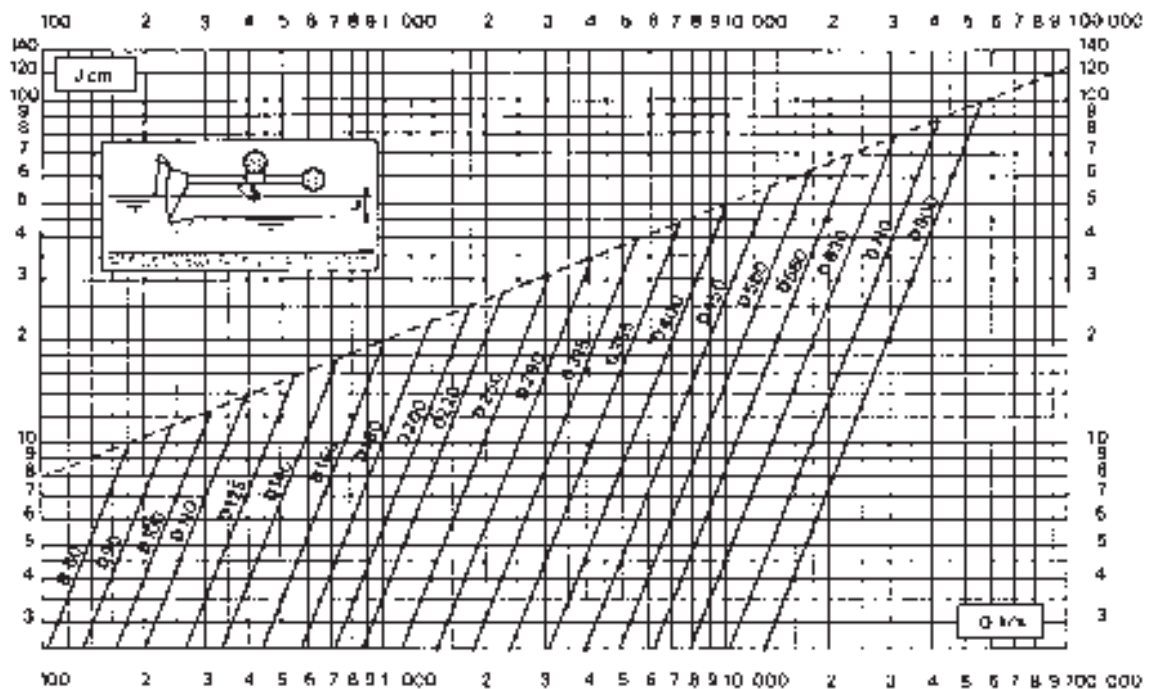
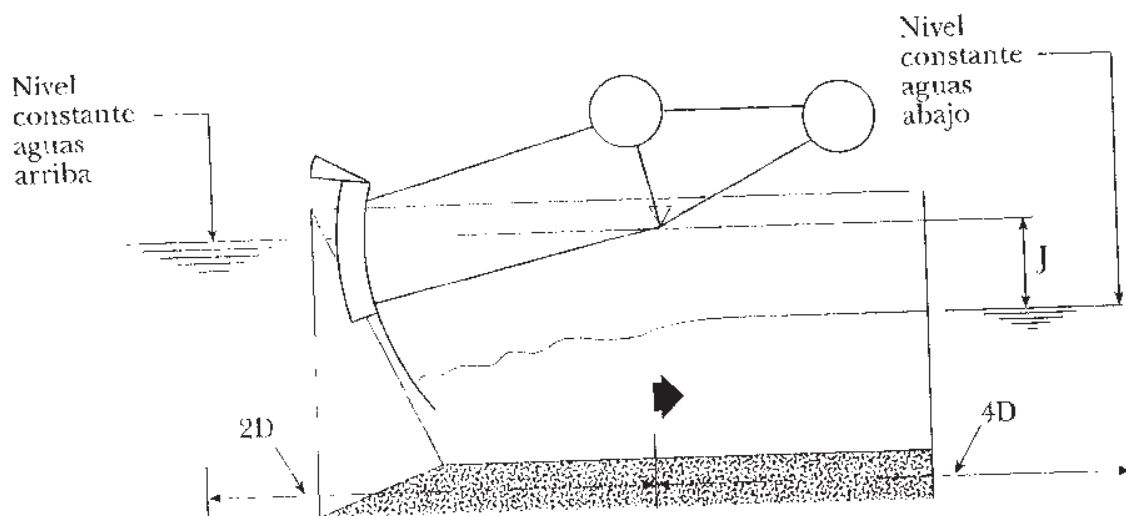


Lámina 2.2.1. Carta de Selección de Compuertas AMIL estándar.

Lámina 2.2.2. Diferencia de carga (J) disponible. Para gasto de diseño $J = J_{\text{mínima}}$.

Para la instalación de las compuertas se recomienda seguir los diagramas de instalación propuestos por las compañías especializadas, como por ejemplo el diagrama estándar de TRANOR de la compañía Waterman Industries, Inc. (propuesto en el documento de difusión denominado Automatic Level Control), de esta manera se obtendrá un excelente funcionamiento hidráulico, con costos mínimos de construcción. Se pueden usar otros diseños estructurales (por ejemplo, para cumplir con los requisitos locales) que quizá den

lugar a características hidráulicas ligeramente diferentes. En este caso, se recomienda recurrir a personal, compañías e instituciones calificadas.

En estos diagramas especializados, todas las dimensiones están dadas a partir del eje de giro 0 de la compuerta. *Hay que recordar que la elevación de este eje es también el valor nominal del nivel constante aguas arriba, mismo que controlará la compuerta.* Para corregir pequeños errores en la colocación de la compuerta o para controlar un nivel de agua diferente, después de instalada, es factible ajustar el nivel dentro de ciertos límites que se han previsto en los citados diagramas.

La descripción del principio de funcionamiento demostró como el decremento, es decir, la variación del nivel durante el curso de apertura, teóricamente puede ser nulo. En términos prácticos, la estabilidad de la regulación del nivel aguas arriba exige una pequeña elevación del nivel en caso de aumento del caudal.

La regulación se realiza de manera que exista una pequeña variación de nivel, cuando la compuerta pasa de la posición cerrada a la posición de apertura máxima. Esta variación de nivel o decremento es del orden de 2% del valor de D ($D/50$).

Una compuerta Amil normalmente es instalada con la cota del eje de articulación coincidiendo con el nivel aguas arriba máximo (posición I).

Cuando la cota del eje de articulación llega a un nivel inferior al nivel aguas arriba correspondiente a $Q = \text{máximo}$, (posición II), se produce un aumento del caudal. Así, si el nivel aguas arriba está desfasado por encima de la cota del eje de articulación con el 2,5 ó 10% del valor D , el caudal máximo aumenta respectivamente de 6, 12 ó 18% y las pérdidas de carga de 4,11 ó 20%. Estas observaciones permiten una mejor definición de los puntos a considerar en el diseño de las obras. El nivel aguas abajo real debe ser menor o igual al “nivel aguas abajo máximo” para impedir su interferencia sobre el caudal (Figura 2.5).

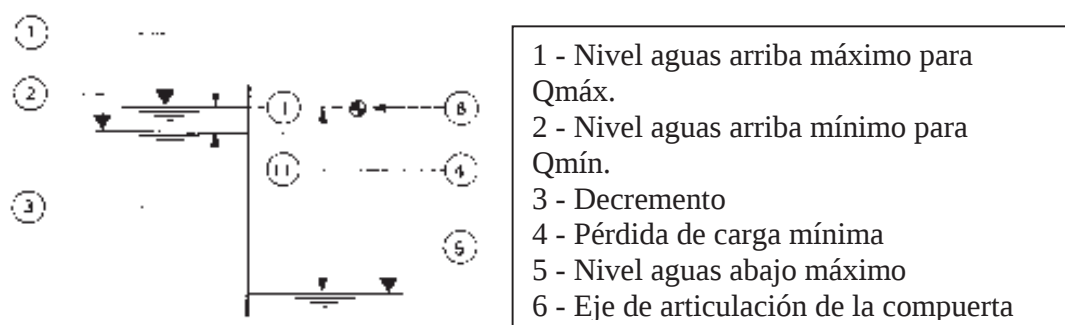
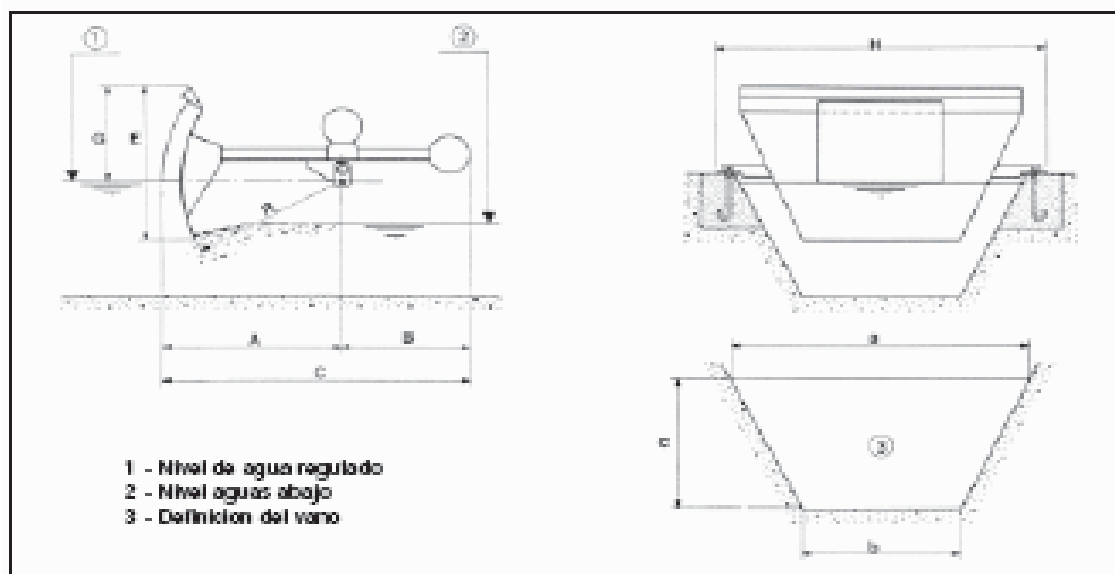


Figura 2.5. Dibujo esquemático de operación de la compuerta Amil. Decremento.

2.2.1.6.1. Dimensiones típicas de las compuertas AMIL estándar.

En las láminas 2.2.3. y 2.2.4. Se presentan dos tablas en las que se pueden consultar las dimensiones de las compuertas AMIL de acuerdo con su número de serie, y se ilustran esquemáticamente dichas dimensiones.

Compuerta AMIL® - Dimensiones



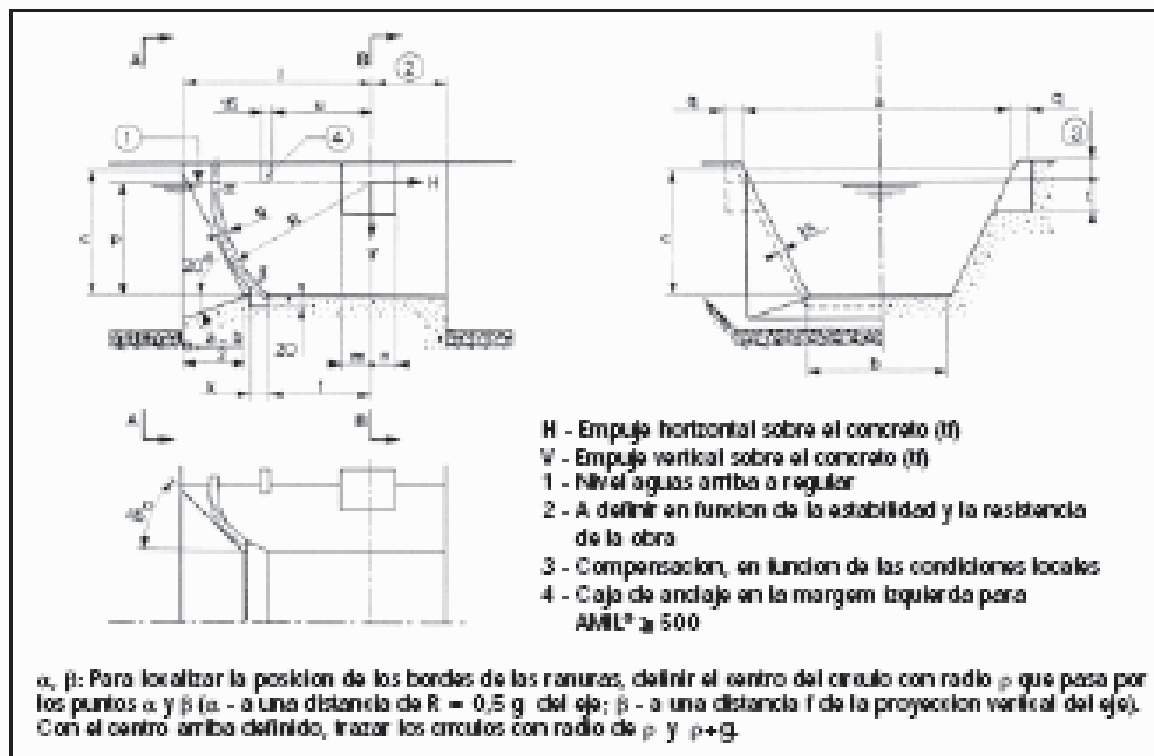
Dimensiones en cm

AMIL®		DIMENSIONES (COMPUERTA ABIERTA)						VANO		
D	R	A	B	C	E	G*	H	a	b	c
80	63	71	51	122	45	33	101	85	45	40
90	63	72	51	123	51	35	111	95	50	45
100	63	73	51	124	58	37	122	106	56	50
110	63	74	51	125	67	42	134	118	63	56
125	90	103	71	174	70	47	153	132	71	63
140	90	104	71	175	81	50	171	150	80	71
160	90	106	71	177	95	60	191	170	90	80
180	125	143	101	244	102	68	214	190	100	90
200	125	145	101	246	117	73	236	212	112	100
220	125	148	101	249	134	85	260	236	125	112
250	160	185	117	301	144	91	303	265	140	125
280	160	188	117	304	166	105	336	300	160	140
315	200	232	145	377	181	112	390	335	180	160
355	200	236	145	381	214	135	430	375	200	180
400	250	290	185	475	234	145	474	425	224	200
450	250	295	185	480	268	170	520	475	250	224
500	315	365	236	601	289	183	540	530	280	250
560	315	371	236	607	333	211	605	600	315	280
630	400	463	298	761	361	233	677	670	355	315
710	400	471	298	769	419	265	762	750	400	355
800	450	530	333	863	481	305	871	850	450	400

(*) Para algunos tipos de compuertas la altura por encima del nivel aguas arriba (o el eje de articulación) es condicionado por el contrapeso aguas abajo en posición compuerta cerrada; su valor es siempre indicado en la columna "G" de la tabla.

Lámina 2.2.3. Dimensiones de la Compuerta AMIL.

Formas de concreto



Dimensiones en cm

TIPO		VANO			DIMENSIONES												ESFUERZOS	
D	R	a	b	c	p	e	f	g	k	l	m	n	q	t	u	ρ	H	V
80	63	85	45	40	36	20	-	-	-	76	15	15	13	15	-	-	0,05	0,05
90	63	95	50	45	40	22	-	-	-	76	15	15	13	15	-	-	0,05	0,05
100	63	106	56	50	45	25	-	-	-	76	15	15	13	15	-	-	0,05	0,10
110	63	118	63	56	50	27	-	-	-	76	15	15	13	15	-	-	0,05	0,10
125	90	132	71	63	56	30	-	-	-	108	18	18	15	20	-	-	0,10	0,15
140	90	150	80	71	63	35	-	-	-	108	18	18	15	20	-	-	0,10	0,15
160	90	170	90	80	71	40	-	-	-	108	18	18	15	20	-	-	0,15	0,20
180	125	190	100	90	80	45	86	15	30	150	23	23	16	20	-	150	0,20	0,30
200	125	212	112	100	90	50	76	15	30	150	23	23	16	20	-	149	0,30	0,40
220	125	236	125	112	100	55	62	15	30	150	23	23	16	20	-	148	0,40	0,40
250	160	265	140	125	112	62	108	15	30	192	25	25	25	15	-	190	0,80	0,50
280	160	300	160	140	125	70	87	15	30	192	25	25	25	15	-	189	1	0,80
315	200	335	180	160	140	77	128	20	40	240	25	25	35	17	-	238	1,50	1
355	200	375	200	180	160	87	102	20	40	240	25	25	35	17	-	236	2	1,50
400	250	425	224	200	180	100	150	20	40	300	33	33	35	22	-	298	3	2
450	250	475	250	224	200	112	133	20	40	300	33	33	35	22	-	295	4	3
500	315	530	280	250	224	125	207	20	40	378	60	40	20	60	200	375	5	4
560	315	600	315	280	250	142	175	20	40	378	60	40	20	60	200	372	8	5
630	400	670	355	315	280	157	272	20	40	480	70	50	30	80	250	476	10	8
710	400	750	400	355	315	175	230	20	40	480	70	50	30	80	250	472	14	10
800	450	850	450	400	360	200	253	20	40	540	80	50	40	90	275	531	20	18

Lámina 2.2.4. Dimensiones Características de compuerta Amil.

2.2.1.7. Resumen de características y datos importantes.

Tamaños estándar y desempeño.

- Las compuertas AMIL se fabrican en 21 tamaños estándar. Su clasificación va de la AMIL D 80 (hasta 180l/s) a la AMIL D 800 (hasta 55,000 l/s).
- La compuerta AMIL mantiene el nivel con variaciones pequeñas aguas arriba independientemente de las fluctuaciones de descarga o de las variaciones en el nivel aguas abajo. La compuerta reacciona inmediatamente a cambios en el gasto de entrada, sin que haya variaciones en el nivel aguas arriba.

Carga y máxima descarga.

- Para un determinado tamaño de la compuerta, la carga J (diferencia entre el nivel agua arriba y el nivel aguas abajo) no tiene límite superior.
- Si la J se incrementa, la capacidad de la compuerta aumenta a un valor máximo, luego permanece constante, sin importar si hay incremento posterior en la carga J; en otras palabras, la capacidad de la compuerta no se ve afectada por descensos posteriores en el nivel aguas abajo.

Generalidades sobre su funcionamiento, operación y mantenimiento.

- La precisión con que la compuerta AMIL controla el nivel, operando con el gasto máxima, tiene una tolerancia de alrededor de ± 1.5 cm.
- La instalación de una compuerta AMIL, una vez lista la estructura de soporte de concreto, tomará uno a dos días. Las acciones se reducen a erigir la compuerta y realizar el lastrado y calibración de la misma.
- La calibración de la compuerta es relativamente sencilla y consiste en dos pasos fundamentales:
 1. Una vez que se ha instalado la compuerta y estando vacío el canal, se lastra el contrapeso de la parte de atrás hasta que la compuerta queda balanceada. Cada fabricante deberá proporcionar un dato aproximado de la cantidad de lastre que se debe colocar, este dato servirá como punto de partida para lograr el balanceo de la compuerta. Es importante hacer notar que es común utilizar arena seca como lastre, por esta razón es muy importante que una vez que se ha realizado el balanceo los compartimentos queden perfectamente sellados para que no entre humedad que afecte el peso de la arena y provoque alteraciones en el balanceo.
 2. Se baja la compuerta de tal manera que la hoja radial toque el fondo, o sea, 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. En este caso, también el fabricante deberá dar un dato aproximado de la cantidad de lastre a colocar en el compartimiento.

- La compuerta AMIL prácticamente no necesita mantenimiento. Normalmente solo se requiere engrasar las chumaceras una vez al año, y pintar la compuerta cuando sea necesario.
- Cuando el caudal que llega a la compuerta supera al caudal de diseño, la compuerta AMIL se abre en su totalidad y permanece en esta posición hasta que el caudal baje nuevamente. Mientras prevalezca esta situación, el nivel aguas arriba se estabilizará en un punto más alto que el normal.
- Es importante tener en cuenta que las compuertas AMIL no cierran herméticamente, esto es debido a que no usan empaques. Por esta razón es normal que se presente un escurrimiento o fuga no mayor del 0.2 % de la capacidad máxima, mismo que se puede reducir a menos de 0.1 % si es necesario.
- Con la instalación de compuertas AMIL es posible incrementar la capacidad del embalse para almacenar más agua. Esto se debe a que la compuerta puede mantener, con un adecuado grado de seguridad, la superficie del agua en un nivel superior al nivel que normalmente se maneja durante la operación.

2.2.2. Análisis de las Fuerzas Estáticas y Dinámicas.

2.2.2.1. Análisis de Fuerzas Estáticas en la Compuerta Amil.

Las fuerzas que actúan sobre la compuerta y que pueden producir giro de ésta alrededor de su eje de rotación son:

- 1.- El propio peso de la compuerta. La magnitud de esta fuerza es el peso de toda la estructura y su punto de aplicación es el centro de gravedad de la compuerta. Tiene sólo componente vertical y su sentido es hacia abajo.
- 2.- La componente vertical del empuje hidrostático sobre el flotador. La componente vertical está representada por el empuje de Arquímedes. Su magnitud es igual al peso del volumen del líquido desalojado, su punto de aplicación es la base del flotador y su sentido es hacia arriba (ver figura 2.6).

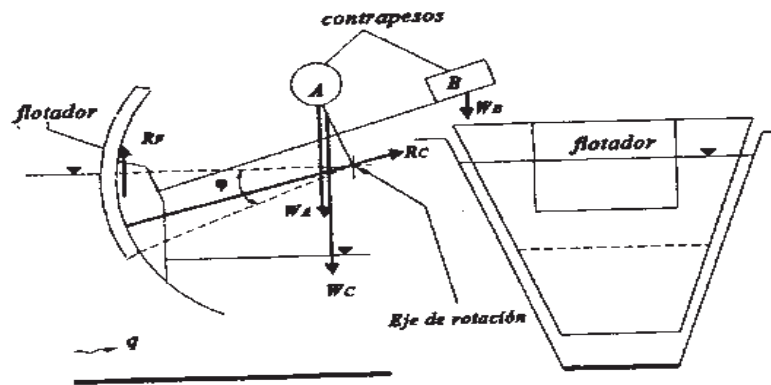


Figura 2.6. Representación de las fuerzas que actúan en la compuerta Amil.

La fuerza resultante que actúa sobre la hoja de la compuerta radial, pasa por el eje de rotación y no origina giro ni momento alguno (ver figura 2.7).

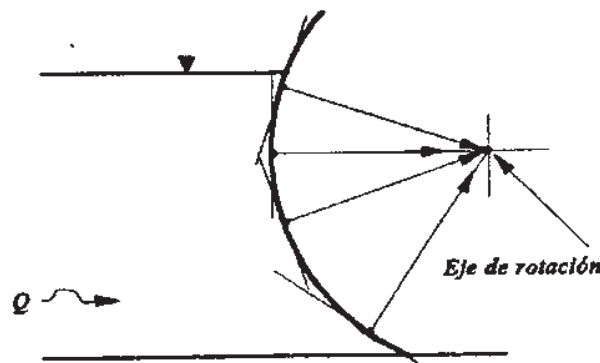


Figura 2.7. Esquema de las Fuerzas que actúan sobre una compuerta radial.

Cuando el tirante de operación aguas arriba de la compuerta coincide con la altura del eje de rotación de la compuerta, ésta se encuentra en equilibrio.

La fuerza de atracción ejercida por la Tierra sobre un cuerpo rígido puede representarse por una fuerza única W . Esta fuerza, llamada gravedad (peso del cuerpo), debe aplicarse en el centro de gravedad del cuerpo.

Las fuerzas que actúan sobre la compuerta son:

- 1.- El empuje hidrostático sobre la cara aguas arriba de la hoja cilíndrica, cuya resultante pasa por el eje de rotación y por lo tanto, no genera momento alguno. Una de las propiedades de los líquidos expresa que la fuerza de presión de un líquido estará siempre actuando normal al área de acción y empujando la superficie mojada, de tal manera que todas las fuerzas puntuales que actúan sobre la cara circular de la compuerta son perpendiculares a las tangentes de cada punto y por lo tanto, pasan por el centro del círculo, es decir, por el eje de rotación de la compuerta, como se puede apreciar en la figura 2.6.
- 2.- El empuje hidrostático sobre la porción sumergida del flotador que tiende a levantar la compuerta.
- 3.- El peso de la compuerta y de los dos contrapesos.

El nivel controlado aguas arriba, coincide con la elevación del eje de rotación de la compuerta. Para lograr esto, el momento respecto al eje de rotación debido al contrapeso contenido en B, se equilibra con el peso de la compuerta y el momento generado por el contrapeso A, se equilibra con el empuje hidrostático (ver Figura 2.6).

En conclusión, los momentos generados por el empuje hidrostático sobre el flotador y por el peso de la compuerta y contrapesos, son iguales en magnitud y de direcciones opuestas para cualquiera posición de la hoja de la compuerta sólo cuando el nivel de tirante aguas arriba coincide con la elevación del eje de rotación.

2.2.2.2. Análisis de Fuerzas Dinámicas en la Compuerta Amil.

En la Tesis “Análisis Dinámico de una Compuerta Hidromecánica tipo Amil” de M.I. Laura Berenice Medina Bocanegra (1997), se pueden definir las fuerzas dinámicas en una ecuación dinámica de la compuerta que es:

$$C_p(t) - C_f(t) = J \frac{d^2\phi(t)}{dt^2} + F \frac{d\phi(t)}{dt}$$

Donde:

C_p = Momento debido al peso de la compuerta.

C_f = Momento debido al empuje hidrostático sobre el flotador.

J = Momento de inercia de la parte móvil con respecto al eje de rotación.

F = Coeficiente de Amortiguamiento.

Φ = Ángulo que mide la sumergencia del flotador (figura 2.8).

En la figura 2.9, ϕ es el ángulo que mide la sumergencia del flotador; R_1 es el radio interno de la compuerta radial; R_2 es el radio interno de la compuerta radial; β es el ángulo entre la base del flotador y la base de la compuerta, constante; δ es la distancia a la que se mide el tirante aguas arriba; L es la abertura vertical de la compuerta; B es la base de la compuerta; T es el ancho de la superficie libre del agua a la distancia δ ; α_1 es el ángulo del trapecio de la compuerta, q_1 es el gasto en la sección 1, h_0 es la altura del eje de rotación; h_1 es el tirante aguas arriba y h_2 es el tirante aguas debajo de la compuerta.

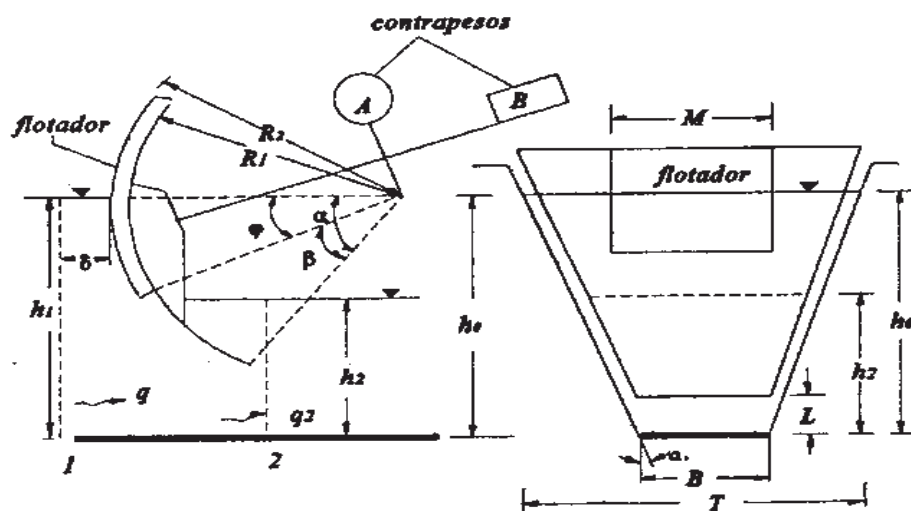


Figura 2.8. Variables que intervienen en las fuerzas dinámicas.

Podemos decir en conclusión, que las fuerzas dinámicas que actúan en la Compuerta Amil es una relación temporal del estado de los momentos generados por las fuerzas hidrodinámicas y fuerzas mecánicas.

2.2.3. Situaciones de Uso de las Compuertas Amil.

Por sus características y versatilidad, las compuertas AMIL se pueden utilizar en una gran cantidad de aprovechamientos hidráulicos:

- 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 abastecimientos de agua. Permite incrementar considerablemente la capacidad de almacenamiento sin tener que sacrificar la capacidad o la confiabilidad de los vertedores. El uso de compuertas AMIL en la entrada del sistema de control de avenidas, protege automáticamente zonas inundables.
- 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 sumamente bajos. Las compuertas del sistema son de verificación automática para un control confiable de derivación, cualquiera que sea el flujo.
- 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 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 recreación.



Figura 2.9. Vista posterior de una compuerta Amil y control de nivel aguas arriba.



Figura 2.10. Vista lateral de una compuerta Amil para el control de Tratamiento de Aguas Residuales.

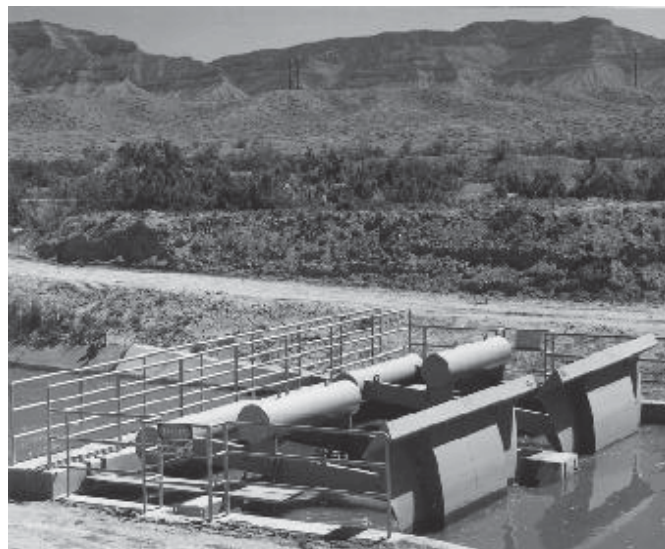


Figura 2.11. Vista lateral de una Sección de Control con Compuertas Amil.

2.2.3.1. Beneficios asociados al uso de compuertas AMIL.

Ahorros en costos de operación. Una vez instalada y calibrada la compuerta AMIL normalmente no volverá a requerir ajustes posteriores, ni será necesario manipularla, y tampoco requerirá del suministro de energía externa ya que funciona por automatización fluidica.

Ahorros en inversiones para la construcción de canales y estructuras. Con la instalación de este tipo de compuerta, es posible optar por reducir el bordo libre, sin el riesgo de derrames, por lo que:

- En canales nuevos, se puede alcanzar la capacidad de diseño con secciones transversales más pequeñas, reduciendo así los costos de construcción.
- En canales viejos, la capacidad en las secciones transversales pueden incrementarse; mejorando con esto la capacidad de respuesta del canal.
- Tanto para canales nuevos como para canales viejos, es posible tener cargas más altas en las compuertas derivadoras, y consecuentemente incrementar la flexibilidad en la satisfacción de la demanda.

Ahorros en reparaciones urgentes en los canales. Gracias a las estructuras y elementos de regulación que acompañan a la compuerta AMIL, los daños por desbordamientos se eliminan, ya que están siempre listas para operar en el instante en que se requiera, y no dependen de la operación manual o del suministro de energía eléctrica.

Es posible, además, evitar otros gastos no programados ya que los taludes no están sujetos a variaciones de presión causadas por la fluctuaciones en los niveles de agua. Asimismo, el revestimiento húmedo no se expone al sol periódicamente con lo que se evitan problemas de agrietamiento.

Ahorros en mantenimiento. La compuerta AMIL tiene sólo una parte móvil hecha de placa de acero de grueso calibre; el marco y los soportes permaneces fuera del agua. Su diseño permite un fácil acceso a todas las superficies que requieran mantenimiento (pintura principalmente).

El flujo que pasa por debajo de la compuerta reduce el depósito de sedimentos, y el lateral evita la acumulación de basura en la estructura de regulación.

Ahorros de agua en redes de distribución. Debido a que no se requiere de la intervención manual en las estructuras de regulación, la operación de los canales es mucho más sencilla. Permite además tener un sistema de distribución más preciso y mucho más flexible, así como reducir el desperdicio de agua.

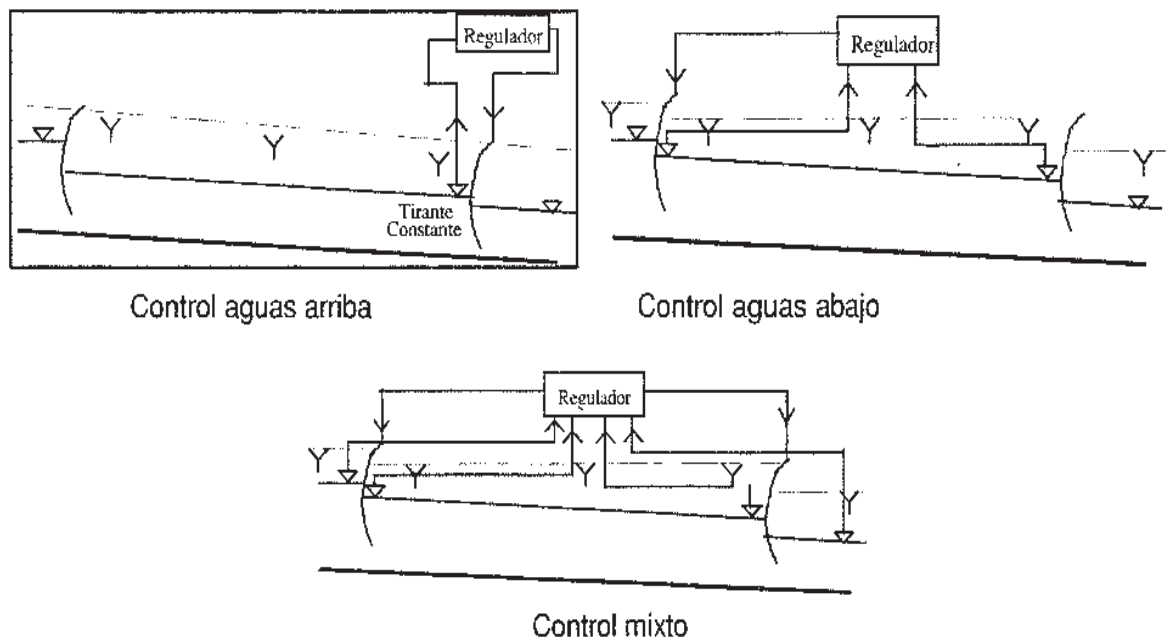
Se trata de un sistema que se ajusta instantáneamente a las variaciones de flujo. Es silencioso, rápido, automático, eficiente, confiable, preciso y con una operación sin gastos.

Cuando se incorpora una compuerta AMIL a un sistema, se deben tomar en cuenta los ahorros que esto implica:

- Ahorro en salarios, en tanto que reduce el número de canaleros y operadores.
- Ahorro en energía eléctrica, en reparación de mecanismos de control, motores, relevadores, etc., que son partes constitutivas de un equipo convencional “automatizado”. El equipo no requiere prácticamente de mantenimiento, por lo que:
 - No se invierte tiempo en reparaciones complicadas e inadecuadas.
 - La operación no es a base de prueba y error.
 - Se reducen al mínimo las contingencias ya que el agua es la que opera hasta nuestro más complejo equipo.
- En un sistema equipado con nuestras compuertas Amil el nivel del agua está perfectamente definido. Por lo que el diseño de los canales se puede hacer con gran precisión, para así alcanzar su capacidad máxima, reducir el bordo libre al mínimo, y eliminar los márgenes de seguridad para los errores de operación.
- Costos mínimos de operación y de mantenimientos.

2.3. Métodos de regulación en Canales.

Una parte fundamental en la operación de un sistema de Riego por medio de canales, es la regulación del agua, la cual se puede hacer bajo las siguientes condiciones (Figura 2.12):



- Método de Regulación Aguas Arriba.
- Método de Regulación Aguas Abajo.
- Método de Regulación Mixta.

Como premisa se puede decir que el objetivo de la regulación es el de contribuir al mejoramiento de la eficiencia de la red, es decir, suministrar, en el transcurso de cada periodo de tiempo, el volumen de agua necesaria conforme a las necesidades de las plantas, a cada usuario y con el mínimo posible de pérdidas de agua, ya sean por sobreconsumo o derrames en vertedores de seguridad.

De acuerdo a lo anterior se puede decir que existen básicamente dos variables hidráulicas al controlar que son el gasto y el nivel del agua en los canales, existiendo los métodos de regulación que anteriormente se mencionaron y que a continuación se describen:

2.3.1. Método de Regulación Aguas Arriba.

Las estructuras de control mantienen el nivel aguas arriba, independientemente del gasto que pasa a través de ellas. Esta denominación se debe a que el régimen de funcionamiento hidráulico depende del caudal que se introduce aguas arriba del canal.

Las estructuras de control pueden ser manuales o automáticas. Para que este método funcione correctamente, se debe tener conocimiento en la fuente de abastecimiento de las necesidades futuras de la red de distribución. Es decir, se requiere de una adecuada predicción de la demanda de agua.

Los efectos de regulación con este método se manifiestan aguas abajo de la estructura de control; si la demanda de gasto derivado por la toma aumenta, se tendrá que cerrar la compuerta, el gasto aguas abajo disminuye y ocasiona carencias de agua; si la demanda disminuye, la compuerta se tiene que abrir, aumenta el gasto aguas abajo y el agua se desperdicia.

El costo inicial de la infraestructura para este método de regulación puede ser muy bajo, sin embargo, la flexibilidad de operación se ve restringida drásticamente.

Este método de regulación requiere del conocimiento del gasto derivado en cada toma. El gasto que entra a la red de distribución debe igualarse con el gasto que sale por las tomas. No obstante, es difícil medir los gastos. Además, debido a la fluctuación natural de los niveles de agua en los canales, los gastos derivados por las tomas varían continuamente. Estas variaciones repercuten aguas abajo, en los últimos tramos del canal.

Las ventajas de este método de regulación son:

- Control de gastos mediante un organismo responsable.
- Excavaciones limitadas, ya que los bordos de los canales son paralelos al fondo.
- Pérdidas de agua mínimas en los canales por infiltración y evaporación.

Las desventajas de este método de regulación son:

- Hay que conocer los tiempos de propagación de caudales a lo largo del canal para programar los riegos.
- Los errores en la programación del riego ocasionarán desperdicio o escasez de agua e inconformidad de los usuarios.
- El riego debe ser continuo.
- La distribución está sujeta al turno de riego.

Las estructuras que se utilizan para el control de regulación aguas arriba son las compuertas deslizantes, las radiales y los vertedores de agujas.

Las compuertas hidromecánicas de nivel constante tipo Amil también son estructuras que se regulan automáticamente y mantienen constante el tirante aguas arriba.

2.3.2. Método de Regulación Aguas Abajo.

El objetivo de esta forma de regulación, es mantener constante el tirante aguas abajo de las estructuras de control. El nombre de regulación aguas abajo se debe a que los gastos en el canal están determinados por las demandas aguas abajo. Cualquier cambio en el gasto dentro del sistema causa ajuste automático en las compuertas de aguas arriba, hasta llegar a la primera compuerta. Esto se logra gracias a que el régimen hidráulico es subcrítico. Este método es relativamente nuevo, empezó a utilizarse en Europa en los años 60's.

Las ventajas de este método son:

- Se reducen las pérdidas de operación porque sólo se incrementa el gasto cuando existen extracciones.
- No es necesario hacer una muy exacta predicción de las extracciones.
- Los cambios de régimen hidráulico son más rápidos porque existe un almacenamiento positivo en los tramos.
- No se requiere elaborar la programación de los riegos.

Las estructuras de control que utiliza este método de regulación consisten en sistemas automáticos que cuentan con sensores que miden el tirante aguas abajo y transmiten una señal al mecanismo que abre y cierra la compuerta.

Las compuertas hidromecánicas de nivel constante aguas abajo AVIS y AVIO también son sistemas de regulación automáticos que no emplean motores ni sensores eléctricos, ya que funcionan con el principio de Arquímedes que se ejerce sobre un flotador y unos contrapesos que la equilibran.

2.3.3. Método de Regulación Mixta.

Las estructuras de control de gasto aguas arriba y aguas debajo de represo son usadas para regular la evolución de los tirantes y gasto a lo largo del mismo. Los tirantes a regular están ubicados aguas arriba y aguas abajo de la estructura de control. Las compuertas se operan simultáneamente. También se le conoce como el método BIVAL.

CAPÍTULO 3. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL Y COMPUERTA AMIL.

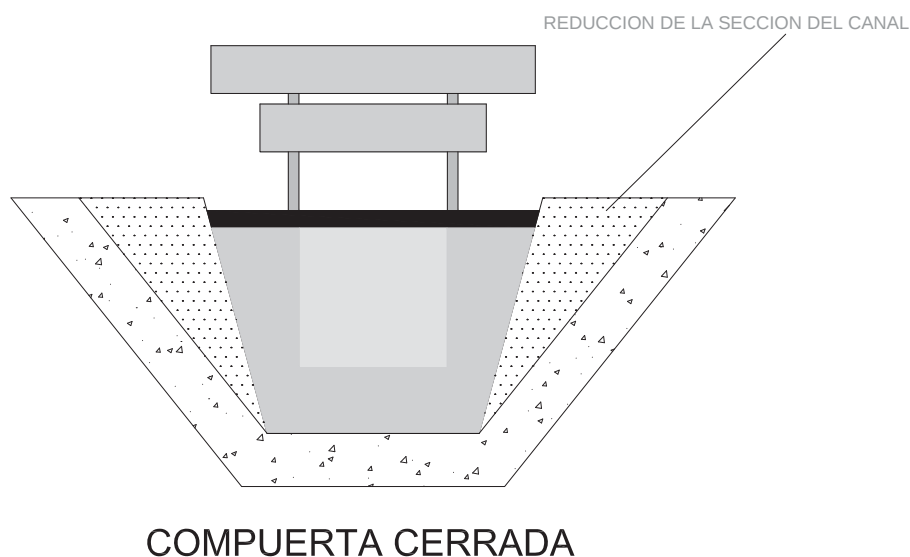
3.1. Adecuación de la Instalación Experimental y Compuerta Amil.

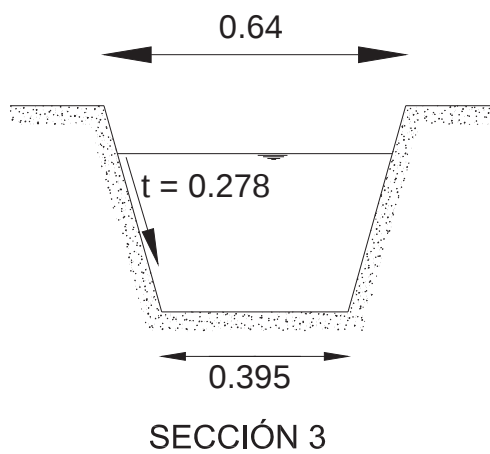
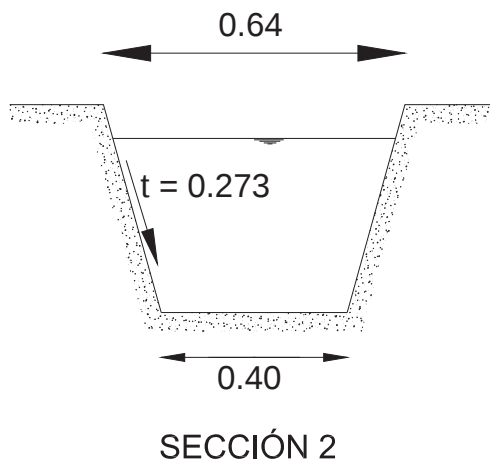
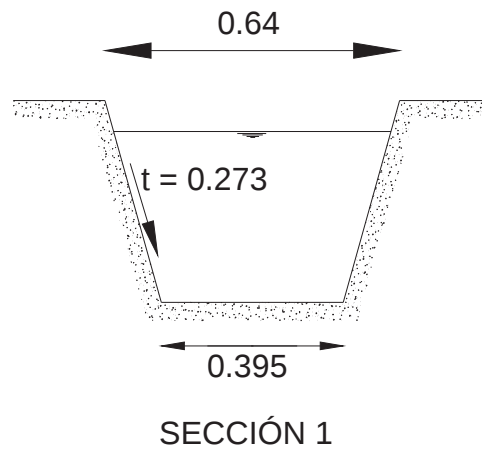
La instalación experimental se ubica en el laboratorio de Hidráulica “Ing. David Hernández Hueramo” de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo en la ciudad de Morelia, Michoacán.

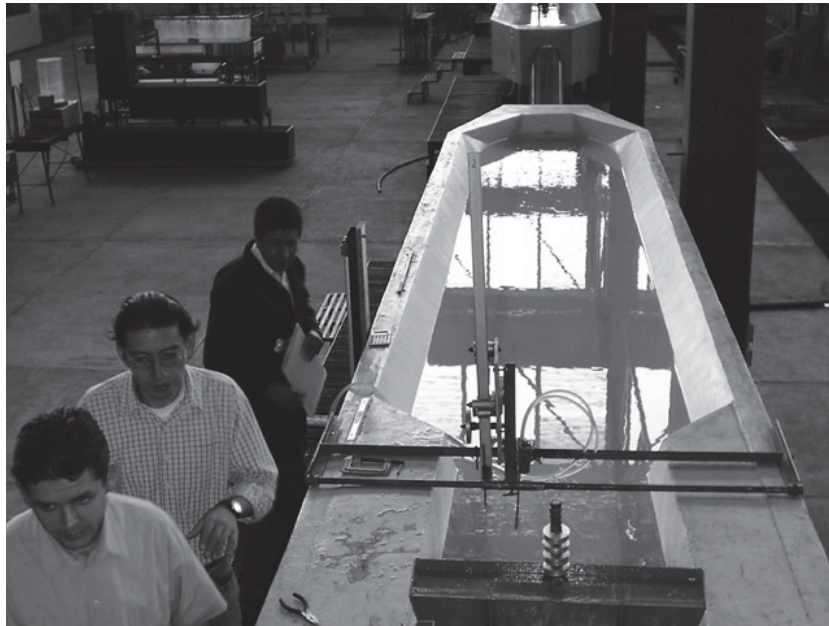
La compuerta Amil en estudio se localiza en un canal largo al cual se ha denominado como de flujo lento. Este canal es alimentado por una tubería de acero la cual tiene una válvula de compuerta que permite regular el gasto que llega a la compuerta Amil, después de ésta hay una contrapendiente que sobre eleva el nivel de la plantilla en 17 cm., luego una caída y al final del canal se localiza un vertedor de pared delgada triangular el cual será utilizado para aforar los gastos descargados por la compuerta. Este vertedor fue previamente calibrado mediante un aforo volumétrico obteniéndose para el mismo la grafica y la ecuación de gasto.

Dado que a 2.8 m aguas abajo de la compuerta Amil se ubica una caída se construyó un tranquilizador de flujo, el cual se colocó en el canal para obtener la condición del flujo sin la afectación de la caída. Pero también se llevaron a cabo mediciones sin tranquilizador para conocer el comportamiento del flujo descargado afectado por la caída.

Como ya se mencionó se utilizó una compuerta ya construida e instalada y no fue necesario para este estudio realizar modificaciones al canal, salvo limpieza y pintura. Se realizaron modificaciones menores a la compuerta las cuales se comentaran en el inciso 2.2.







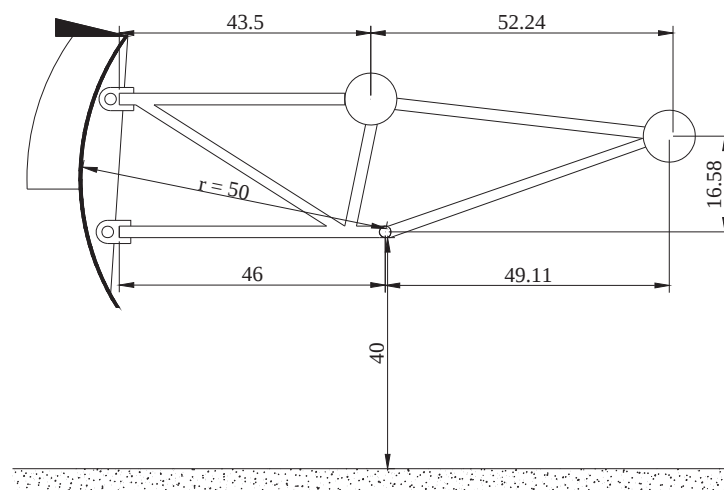
Fotografía 3.1.1 Vista panorámica del canal denominado de flujo lento

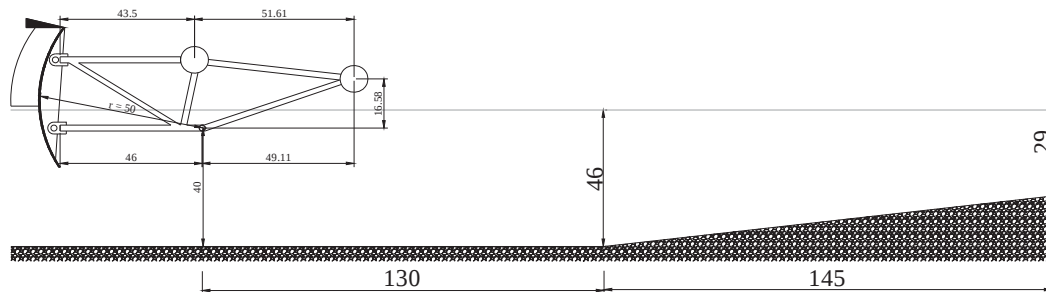
3.1.1. Características de la Compuerta Amil.

La compuerta Amil utilizada no se ajusta a ningún tamaño de las compuertas Amil estándar que se encuentran en la carta de selección de la compañía Alsthom Fluides (Gec Alshton) ni en el cuadro de dimensiones que presenta la compañía Waterman Industries (diagrama estándar TRANOR). Para seleccionar una compuerta estándar utilizando los recursos anteriores se utiliza la dimensión D, que representa el ancho de la superficie libre del agua a la altura del eje de giro en centímetros. La compuerta estandarizada mas pequeña tiene una dimensión $D = 80$ cms. Y, sin embargo la compuerta utilizada tiene una $D = 52$ cms. Desconozco cual fue el modelo utilizado para construir la compuerta experimental y no encontré algún plano ni información documental.

3.1.1.1. Modificaciones a la compuerta Amil.

La compuerta Amil que se utilizó en el estudio ya estaba construida e instalada en el mismo sitio donde se ubica actualmente pero tenía el inconveniente de que no cumplía el requisito de mantenerse balanceada al aire, es decir, fuera del agua, por lo que fue necesario extender los elementos de soporte, acero redondo, que sostienen el contrapeso mas alejado de la compuerta hasta encontrar el mencionado balance. Por lo demás no se le realizó ninguna otra modificación ni a la compuerta ni a la base que lo sostiene. Cabe mencionar que el eje horizontal de la compuerta, ya instalada ésta, está bien nivelado sobre la horizontal por lo que no fue necesario hacer modificación alguna.

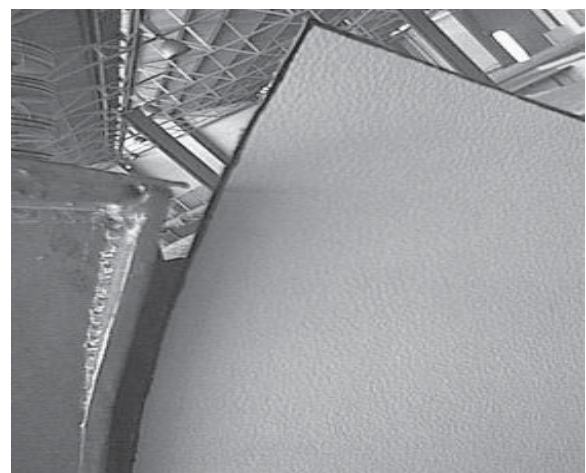
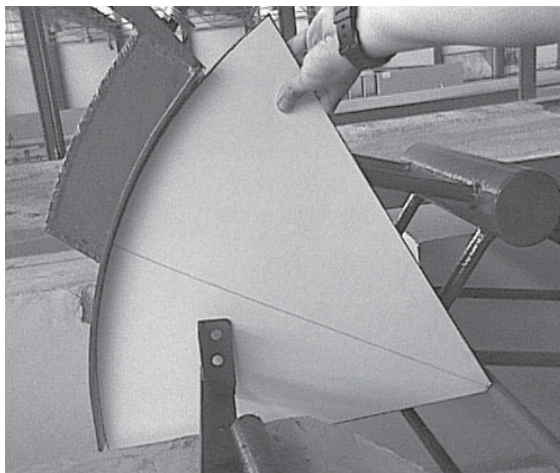




Croquis 3.2.1 Dimensiones de la compuerta experimental y de la pendiente longitudinal del canal. La sobre elevación del canal por la contra pendiente es de 17 cms.

Observaciones a la compuerta experimental

1. Tal y como se observa en la siguientes fotografías la curvatura que se le dio a la placa que conforma la parte frontal de la compuerta no es completa.



2. Sin embargo tal y como se observa en la fotografía de arriba a la izquierda la posición del centro de giro de la placa frontal si coincide con el eje de soporte de la compuerta.
3. Para balancear la compuerta se le colocaron pesas a la parte frontal de la compuerta sobre la placa de acero. Hasta que quedó balanceada al aire, es decir sin flujo de agua.

3.1.2. Verificación de las condiciones de medición en un vertedor de pared delgada triangular.

Este vertedor de pared delgada triangular se encuentra instalado en el mismo canal sobre el que se encuentra instalada la compuerta Auto basculante Tipo Amil, en estudio, y al cual se le ha denominado de flujo lento. Este canal se ubica en el laboratorio de Hidráulica “Ing. David Hernández Hueramo” de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Este vertedor se utilizará para aforar los gastos que transitan bajo la compuerta Amil.

1. Los vertedores triangulares se recomiendan para gastos inferiores a 30 lts/seg y cargas superiores a 6 cms y hasta 60 cms. Su precisión es mejor que la del rectangular, para gastos pequeños, e incluso para gastos comprendidos entre 40 y 300 lts/seg. (Sotelo, 1999). El gasto máximo esperado es aproximadamente 50 lps.
2. El vertedor debe colocarse perpendicularmente a la dirección del flujo en el canal: Cumple
3. La cresta del vertedor debe ser recta y afilada. (con chaflán): Cumple
4. El vertedor debe tener contracciones laterales completas y descarga libre: Cumple.
5. Aguas abajo del canal no debe haber obstáculos que provoquen ahogamiento o inmersión de la descarga del vertedor: Cumple.
6. La carga (h) de la corriente se debe medir en una zona de régimen tranquilo colocando la escala o entrada al limnómetro a una distancia mínima de $4h$ hacia aguas arriba del vertedor. Distancia medida = 2m. $h = 0.22$ m, $4 \times h = 4 \times 0.22 = 0.88$ m, $2\text{m} > 0.88$ m y por lo tanto: Cumple
7. Es conveniente que la corriente llegue a la estructura con una velocidad muy pequeña, como máximo $v = 0.4$ m/s, en caso contrario se realizarán los ajustes necesarios. Cumple.
8. En esta clase de vertedores tiene poca importancia la altura del vértice de la cresta vertedora sobre el piso, en cambio tiene mayor influencia el ancho del canal de acceso en el coeficiente “C”. (Trejo, 1964)
9. Influencia del ancho del canal de llegada en el coeficiente “C”:

Si $B \geq 5h$: no tiene influencia sobre “C”.

Si $B < 5h$: tiene influencia sobre “C”.

En nuestro caso: $B = 1.20$ m, ancho del canal de llegada, $\phi = 2\alpha = 90^\circ$ y $h = 0.22$ m. $5h = 5(0.22) = 1.10$ m; $1.20 > 1.10$ m, y por lo tanto, el ancho del canal de llegada no tiene influencia sobre el valor del coeficiente “C”.

La ecuación de gasto para vertedores triangulares de pared delgada es la siguiente:

$$Q = \frac{8}{15} \operatorname{tg} \alpha C \sqrt{2g} h^{5/2}$$

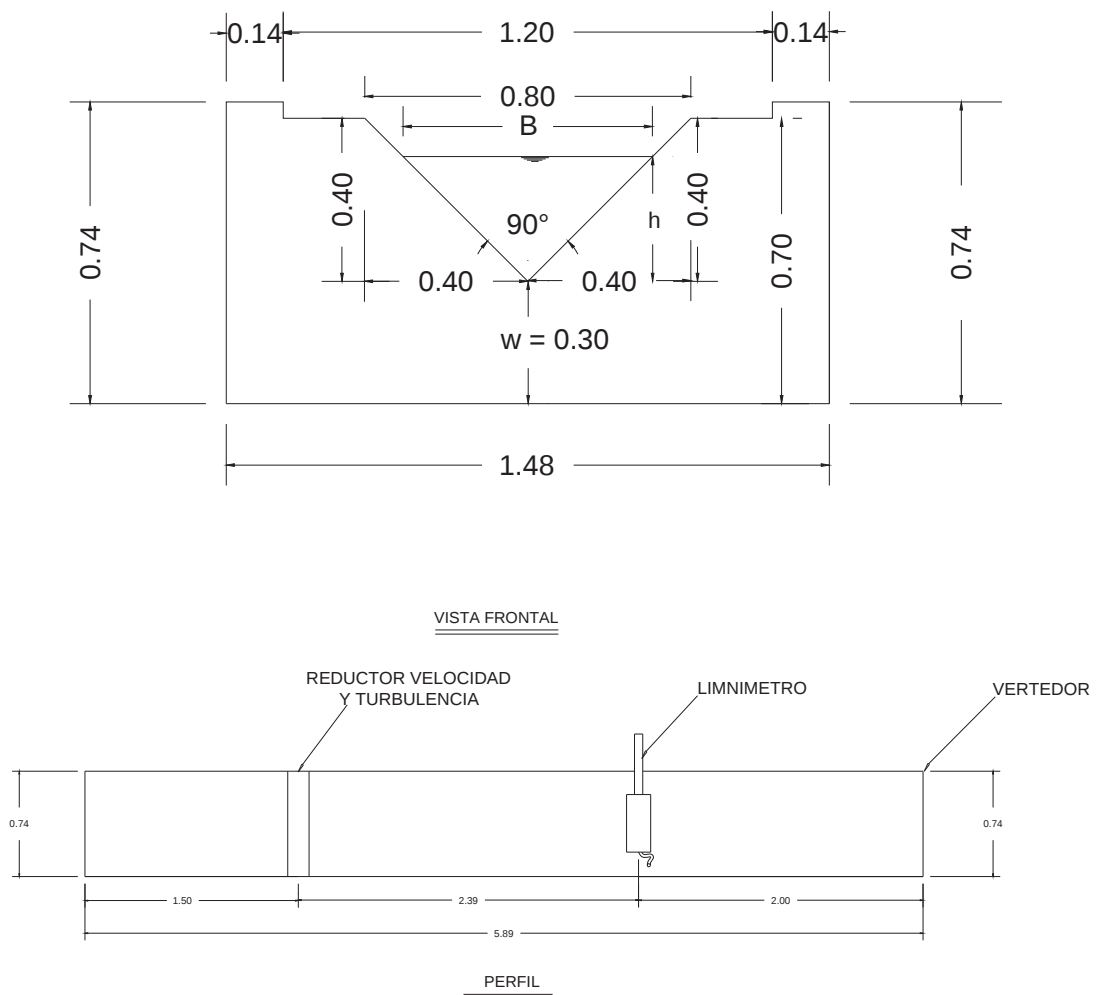
Para nuestro caso, dado que $h > 0.14$ m: $C = 0.587$ utilizando la tabla de la pág. 237 del libro del Ing. Octavio Trejo (1964):

$$Q = \frac{8}{15} \operatorname{tg} 45^\circ 0.587 \sqrt{2g} h^{5/2}$$

$$Q = 1.3867 h^{2.5}; \text{ gasto teórico.}$$

Se concluye que el vertedor de pared delgada triangular cumple la totalidad de las condiciones físicas y de medición por lo que podrá ser utilizado con confianza como aforador de los gastos que se descargan bajo la compuerta Amil en estudio.

FIGURA 1

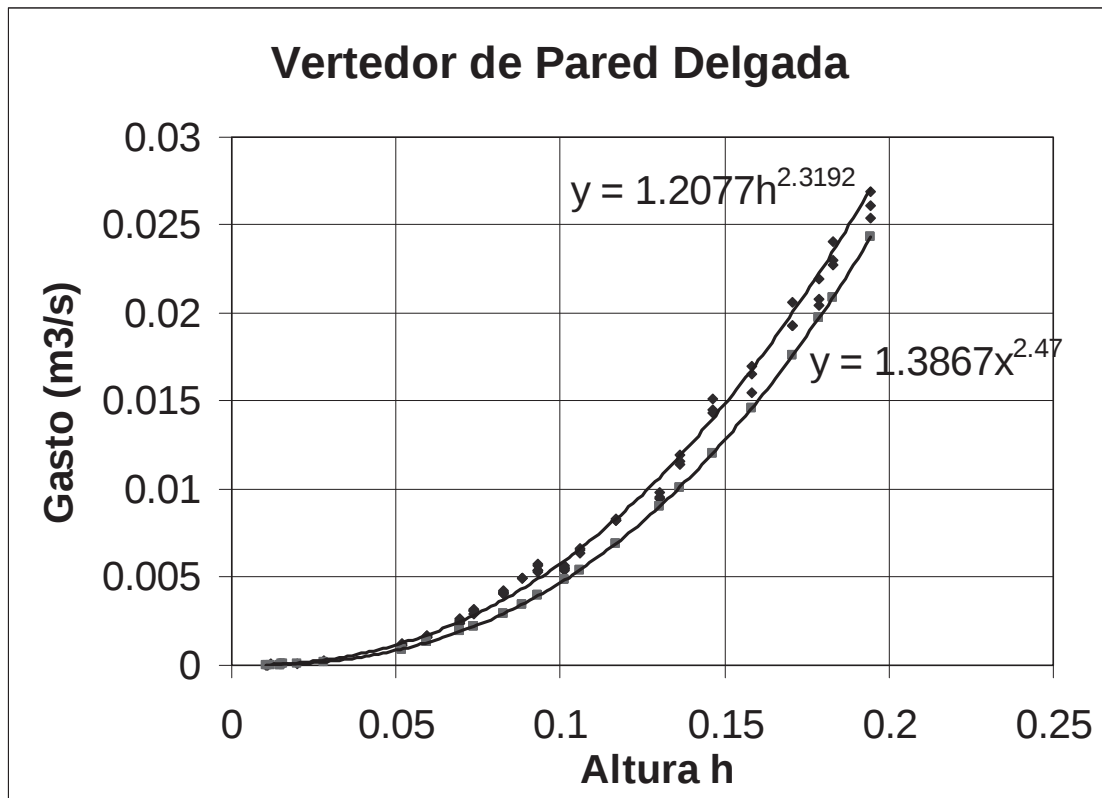


Pero como la ecuación anterior es teórica, se realizó la calibración del vertedor de pared delgada por medio de mediciones volumétricas, obteniendo estos valores en la siguiente tabla:

H vertedor	Q (medido)	Q(teórico)
0.0199	0.00012601	8.71264E-05
0.0149	6.3573E-05	4.26337E-05
0.0119	4.5924E-05	2.44672E-05
0.0108	3.3136E-05	1.92548E-05
0.0104	2.7695E-05	1.7541E-05
0.0147	6.6997E-05	4.12341E-05
0.0154	7.7982E-05	4.6255E-05
0.0158	8.094E-05	4.92794E-05
0.028	0.00029152	0.000202518
0.0518	0.00123259	0.000925501
0.0518	0.00110902	0.000925501
0.0518	0.00113753	0.000925501
0.0694	0.00264179	0.001906077
0.0694	0.00256522	0.001906077
0.0694	0.00241144	0.001906077
0.0694	0.00239189	0.001906077
0.0694	0.00250708	0.001906077
0.0596	0.00168571	0.001308702
0.0596	0.00162385	0.001308702
0.0596	0.00160909	0.001308702
0.0596	0.0016573	0.001308702
0.0736	0.00295	0.002203793
0.0736	0.00306228	0.002203793
0.0736	0.00314947	0.002203793
0.0736	0.00308362	0.002203793
0.0883	0.00497191	0.003455457
0.0883	0.005	0.003455457
0.0883	0.0049775	0.003455457
0.0827	0.00405963	0.002939146
0.0827	0.00423445	0.002939146
0.0827	0.00417453	0.002939146
0.0827	0.00413551	0.002939146
0.0827	0.00407834	0.002939146
0.0933	0.00526786	0.003959043
0.0933	0.00567308	0.003959043
0.0933	0.00536364	0.003959043
0.0933	0.00578431	0.003959043
0.0933	0.00539634	0.003959043
0.1014	0.00540444	0.00486291
0.1014	0.005452	0.00486291
0.1014	0.0054827	0.00486291
0.1014	0.00566972	0.00486291
0.1014	0.00560905	0.00486291
0.1059	0.00635135	0.005413468

0.1059	0.00659729	0.005413468
0.1059	0.00659091	0.005413468
0.1167	0.00823068	0.006880936
0.1167	0.00834149	0.006880936
0.1167	0.00826061	0.006880936
0.1304	0.00945215	0.00905145
0.1304	0.00979167	0.00905145
0.1304	0.00953147	0.00905145
0.1364	0.01157046	0.010115189
0.1364	0.0119352	0.010115189
0.1364	0.01143456	0.010115189
0.1465	0.01514444	0.012067059
0.1465	0.01434737	0.012067059
0.1465	0.0145	0.012067059
0.1581	0.01695274	0.014566132
0.1581	0.01548864	0.014566132
0.1581	0.01658151	0.014566132
0.1707	0.01930595	0.017603512
0.1707	0.01930595	0.017603512
0.1707	0.02058912	0.017603512
0.1787	0.02046547	0.019711976
0.1787	0.02077744	0.019711976
0.1787	0.02191318	0.019711976
0.1829	0.02302365	0.020876148
0.1829	0.02271667	0.020876148
0.1829	0.02408127	0.020876148
0.1945	0.02611111	0.024300429
0.1945	0.0254291	0.024300429
0.1945	0.02693676	0.024300429

En la gráfica que a continuación se presenta se observa la comparación de las fórmulas para obtener el gasto:



Por lo cual para el trabajo experimental de la compuerta Amil se va utilizar la siguiente fórmula:

$$Q = 1.2077h^{2.3192}$$

Donde:

Q= Gasto (m³/seg).

h = altura en el vertedor (m).

3.1.3. Colocación de Instrumentación.

En las cercanías de la compuerta Amil la instrumentación que se colocó fue la siguiente: un limnómetro a 2D hacia aguas arriba de la compuerta y en la misma sección sobre la base del limnómetro se fijó la punta de un tubo de Prandtl, después de la compuerta se instaló otro limnómetro también a 2D. Siendo D la distancia horizontal de la superficie libre del agua en el canal a la altura del eje, siendo en este caso de 52 cms. La punta del tubo de Prandtl se colocó a una profundidad fija de $0.6y_1$, o sea a 24 cms de la superficie considerando un tirante de llegada y_1 de 40 cms. El tubo de Prandtl conectado a un manómetro se utilizó para medir la velocidad de llegada a la compuerta, tomando como la velocidad media del flujo en el canal como la obtenida de manera puntual a 0.6 del tirante de llegada.

Para medir la abertura en la compuerta se colocó una escala sobre el hombro del canal y utilizando un punto de referencia en el flotador mas alejado de la hoja radial se logró medir las aberturas de la compuerta para operación normal de esta o fijar las aberturas requeridas.



Fotografía 3.1.3.1. Instrumentación en la compuerta Amil

CAPÍTULO 4. REALIZACIÓN DE MEDICIONES.

4.1. Programa de Mediciones Y Gráficas.

Para llevar a cabo el trabajo experimental se consideraron dentro del Programa de mediciones seis condiciones de trabajo de la compuerta Amil y que son las siguientes:

1. Gasto constante y aberturas fijas con tranquilizador, $Q_{prom} = 18.865$ l/s
2. Gasto constante y aberturas fijas sin tranquilizador, $Q_{prom} = 29.324$ l/s
3. Gasto constante y aberturas fijas con tranquilizador, $Q_{prom} = 13.907$ l/s
4. Gasto constante y aberturas fijas sin tranquilizador, $Q_{prom} = 26.670$ l/s
5. Operación normal de la compuerta con tranquilizador
6. Operación normal de la compuerta sin tranquilizador

Y se realizaran las siguientes gráficas:

1. Grafica No 1.- Tirante de entrada y salida vs. Abertura de la compuerta, para las cuatro primeras condiciones de trabajo anteriores.
2. Grafica No 2.- Tirante de entrada y salida vs. Abertura de la compuerta, para las condiciones de operación normal.
3. Grafica No 3.- Abertura vs. Coeficiente de descarga C_d , para las cuatro primeras condiciones.
4. Grafica No 4.- Abertura de la compuerta vs. Coeficiente de descarga C_d , para las condiciones de operación normal.
5. Grafica No 5.- Coeficiente de descarga C_d vs. Aberturas fijas, para las cuatro primeras condiciones.
6. Grafica No 6.- Tirante de entrada vs. Coeficiente de descarga C_d , para las condiciones de operación normal.
7. Grafica No 7.- Tirante de entrada vs. Coeficiente de descarga C_d , para las cuatro primeras condiciones y adimensionalizado con el radio de la compuerta.
8. Grafica No 8.- Tirante de entrada vs. Gasto descargado, para las cuatro primeras condiciones.

4.2 Procedimiento experimental y captura de datos.

Para llevar a cabo el programa de mediciones del inciso anterior y la elaboración de sus respectivas graficas se llevaron a cabo los siguientes procedimientos experimentales:

1. Primer procedimiento. Para construir las graficas No 1, 3, 5 y 7. El procedimiento experimental consistió en proporcionar un gasto constante en el canal, fijar la compuerta a la abertura deseada y esperar a que se regularizara el flujo en el canal, aproximadamente 7 min., y entonces realizar las mediciones de tirante aguas arriba y aguas abajo de la compuerta, tomar la lectura en la escala del piezómetro conectado al tubo de Prandtl y finalmente tomar la lectura en la escala del limnómetro del vertedor de pared delgada triangular. Y repetir el procedimiento para un gasto mayor.
2. Segundo procedimiento. Para construir las graficas No 2, 4, 6, 8. La condición de operación normal consiste en el funcionamiento de la compuerta en auto balance hídrico. El procedimiento consistió, al igual que en el caso anterior, en dar incrementos graduales del gasto hasta el límite de la capacidad del canal aguas arriba, tanto en operación con tranquilizador como sin el. Para cada gasto se esperaba a que se auto balanceara la compuerta y se regularizara el gasto en el canal, posteriormente se procedió a tomar las mismas lecturas de profundidad del flujo, de velocidad y de tirante en el vertedor de pared delgada triangular que en caso anterior.

CAPÍTULO 5. ANALISIS DE RESULTADOS

Para el cálculo del C_d se utilizaron las siguientes fórmulas:

El área del trapecio es:

$$A = \frac{(B + b)y_1}{2} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

A = Área del trapecio.

B = Ancho de la superficie libre.

b = Ancho de la base.

y_1 = Tirante de entrada.

El área de bajo la compuerta es:

$$A = Bw - \frac{1}{2} \left(\frac{B - b}{L} \right) w^2 \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

A = Área del orificio para cualquier abertura (m^2).

b = Ancho de la base de la compuerta Amil (m).

B = Ancho de la superficie libre para el tirante de diseño (m).

L = Tirante de diseño de la compuerta (m).

w = Abertura de la compuerta (m).

Área de la sección de tirante de entrada:

$$A = by_1 + ty_1^2 \quad \text{Ec. 3}$$

Donde:

t = Talud del canal.

Se requiere calcular B para el tirante medido y_1 , despejando de la Ec. 1 tenemos:

$$B = \frac{A - \frac{by_1}{2}}{\frac{y_1}{2}} \quad \text{Ec. 4}$$

Por ejemplo si $y_1 = 0.4054$, $y_3 = 0.2372$, $t = 0.273$, $b = 0.395$ tenemos:

Haciendo $w = a$ y $L = y_1$

$$A = Ba - \frac{1}{2} \left(\frac{B-b}{y_1} \right) a^2$$

$$A = 0.0018 \text{ m}^2$$

Como tenemos condición de descarga ahogada tenemos que:
Calculando el Coeficiente de Descarga con la siguiente ecuación:

$$Cd = \frac{Q}{A\sqrt{2gJ}}$$

Donde:

Cd = Coeficiente de Descarga.

Q = Gasto (m³/seg.).

A = Área del Orificio (m²).

g = Gravedad (m/seg²).

J = Carga efectiva (y₁-y₃).

$$Cd = 1.5327$$

Y tomando la velocidad de llegada:

$$Cd = \frac{Q}{A\sqrt{2gJ + \frac{v_1^2}{2g}}}$$

$$Cd = 1.5282$$

Donde:

$v_1^2/2g$ = Carga de Velocidades de llegada

5.1 Cuadro de datos y graficas.

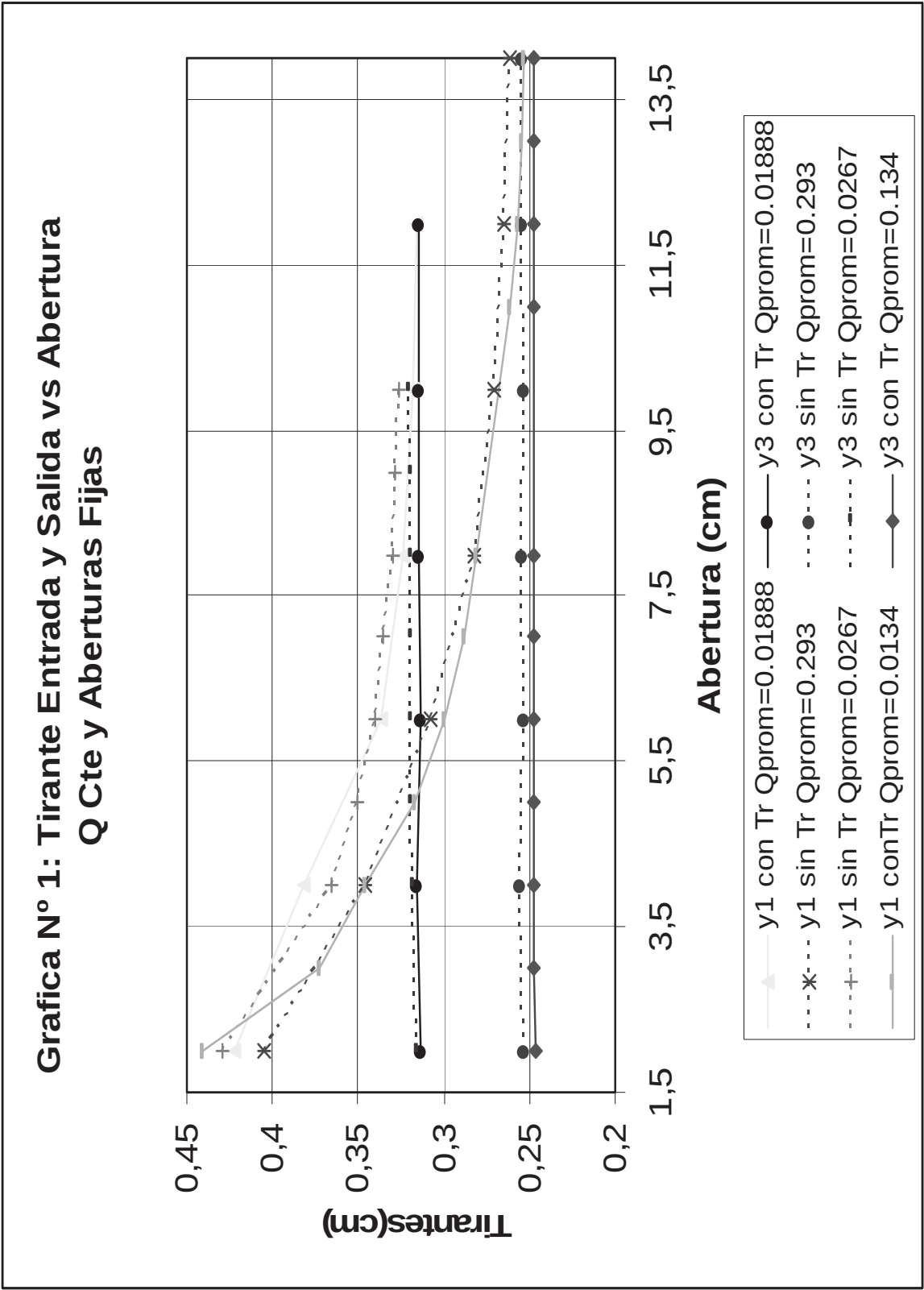
Análisis de la Grafica No 1.- Al observar el comportamiento de la grafica donde se muestran las curvas de los tirantes de llegada y_1 y de salida y_2 vs. Abertura de la compuerta, bajo la condición de gasto constante, aberturas de la compuerta fijas y descarga ahogada, se pueden hacer las siguientes observaciones:

Tirante de Entrada (m)	Tirante Salida (m)	Tirante sobre Vertedor (cm)	Abertura de Compuerta (cm)	Vel Llegada (m/s)	Gasto (m ³ /seg.)
0.4218	0.313	16.64	2	0.1981	0.0189
0.3812	0.3152	16.64	4	0.4429	0.0189
0.3367	0.314	16.64	6	0.3705	0.0189
0.3237	0.3143	16.64	8	0.2426	0.0189
0.3182	0.3142	16.64	10	0.1401	0.0189
0.3152	0.3142	16.64	12	0.1401	0.0189
				Promedio	0.0189

Tirante de Entrada (m)	Tirante Salida (m)	Tirante sobre Vertedor (cm)	Abertura de Compuerta (cm)	Vel Llegada (m/s)	Gasto (m ³ /seg)
0.4047	0.2528	20.14	2	0.1401	0.0294
0.3457	0.255	21.04	4	0.3431	0.0297
0.3077	0.2537	20.14	6	0.1401	0.0294
0.2827	0.254	20.24	8	0.1401	0.0294
0.2707	0.2538	20.14	10	0.1401	0.0290
0.2647	0.254	20.14	12	0.1401	0.0294
0.2617	0.254	20.04	14	0.1401	0.0290
				Promedio	0.0293

Tirante de Entrada (cm)	Tirante Salida (cm)	Tirante sobre Vertedor (cm)	Abertura de Compuerta (cm)	Vel Llegada (m/s)	Gasto (m ³ /seg)
0.4295	0.3156	14.59	2	0.2426	0.0139
0.3655	0.3177	14.59	4	0.2426	0.0139
0.3509	0.3193	14.59	5	0.2426	0.0139
0.34	0.3193	14.59	6	0.1981	0.0139
0.3354	0.3193	14.59	7	0.1981	0.0139
0.33	0.3193	14.59	8	0.1981	0.0139
0.328	0.3194	14.59	9	0.1981	0.0139
0.3257	0.3204	14.59	10	0.1981	0.0139
				Promedio	0.0139

Tirante de Entrada (cm)	Tirante Salida (cm)	Tirante sobre Vertedor (cm)	Abertura de Compuerta (cm)	Vel Llegada (m/s)	Gasto (m ³ /seg)
0.441	0.246	19.32	2	0.3962	0.0267
0.373	0.2469	19.32	3	0.2426	0.0267
0.3454	0.2472	19.32	4	0.1981	0.0267
0.3165	0.2472	19.32	5	0.1981	0.0267
0.2998	0.2472	19.32	6	0.1981	0.0267
0.2877	0.2472	19.32	7	0.1981	0.0267
0.2806	0.2472	19.32	8	0.1981	0.0267
0.261	0.2478	19.32	11	0.1401	0.0267
0.2569	0.2478	19.32	12	0.1401	0.0267
0.2543	0.2478	19.32	13	0.1401	0.0267
0.2535	0.2478	19.32	14	0.1401	0.0267
				Promedio	0.0267



En los cuatro pares de curvas de la gráfica No 1 al comparar la curva de los tirantes de llegada y la curva de los tirantes de salida para el mismo gasto, con y sin tranquilizador, se puede observar que al crecer la abertura los tirantes de llegada van disminuyendo gradualmente hasta alcanzar la curva de los tirantes de salida y hacerse asintótico con el eje de las x . La curva de los tirantes de salida es una línea recta horizontal lo cual nos muestra que los tirantes de salida son independientes de la abertura de la compuerta para un gasto constante. En la misma grafica, también se puede observar que las curvas de los tirantes de llegada y salida en las que se usó tranquilizador aguas abajo quedan por arriba de las mismas curvas sin tranquilizador. Lo cual nos muestra que al disminuir la carga disponible J , con el uso del tranquilizador, los tirantes de entrada y salida crecen proporcionalmente.

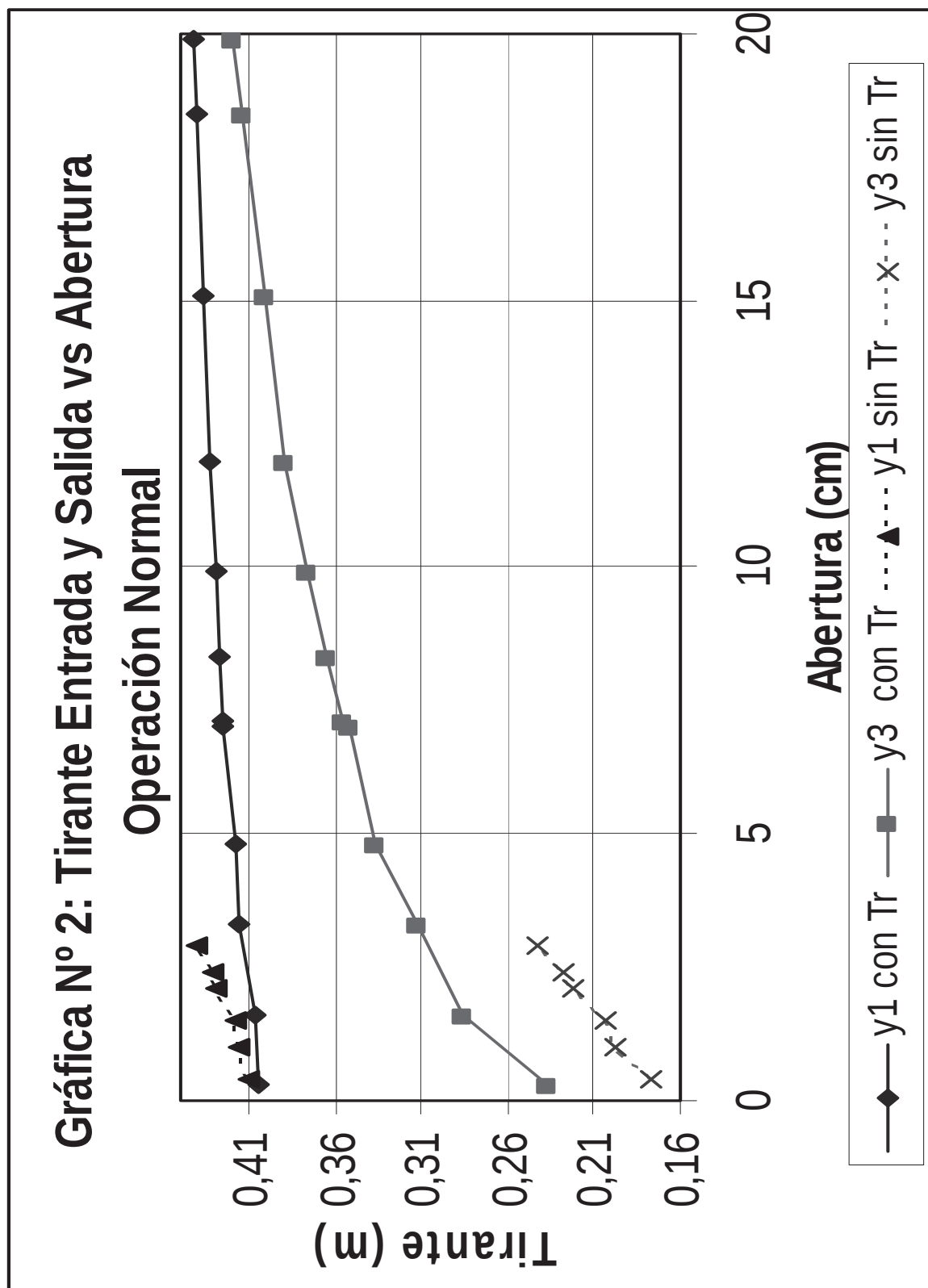
Conclusiones:

- Para un gasto constante en el canal, al crecer la abertura, los tirantes de entrada disminuyen gradualmente y los tirantes de salida son constantes e independientes de la abertura de la compuerta para una descarga ahogada.
- Para un gasto constante en el canal, aberturas fijas y descarga ahogada, los tirantes de entrada y salida crecen proporcionalmente al disminuir la carga disponible J .

Análisis de la Grafica No 2.- En la que se muestran las curvas de Abertura de la compuerta vs. Tirantes de llegada y de salida para diferentes gastos y operación normal de la compuerta, es decir, en auto balance hídrico. El procedimiento consistió en dar incrementos graduales del gasto hasta el límite de la capacidad del canal aguas arriba, tanto en operación con tranquilizador como sin el, teniéndose en todos los casos descarga ahogada.

Tirante de Entrada (m)	Tirante Salida (m)	Tirante sobre Vertedor (cm)	Abertura de Compuerta (cm)	Vel Llegada (m/s)	Gasto (m ³ /seg)
0.4054	0.2372	9.5	0.3	0.1401	0.0051
0.4066	0.2855	14.41	1.6	0.1401	0.0135
0.4155	0.3128	17.41	3.3	0.1401	0.0210
0.4174	0.3374	19.49	4.8	0.1401	0.0272
0.425	0.3518	21.82	7	0.1401	0.0354
0.4263	0.3552	22.21	7.1	0.1401	0.0369
0.428	0.3656	23.5	8.3	0.1401	0.0420
0.4293	0.3768	24.18	9.9	0.1401	0.0449
0.4331	0.3903	25.4	12	0.1401	0.0503
0.4365	0.4019	26.36	15.1	0.1401	0.0548
0.4411	0.4142	27.25	18.5	0.1401	0.0592
0.442	0.419	27.44	19.9	0.1401	0.0602

Tirante de Entrada (m)	Tirante Salida (m)	Tirante sobre Vertedor (cm)	Abertura de Compuerta (cm)	Vel Llegada (m/s)	Gasto (m ³ /seg)
0.4097	0.1762	10.04	0.4	0.1401	0.0058
0.4168	0.1977	13.59	1	0.1401	0.0118
0.4188	0.2036	14.62	1.5	0.1401	0.0140
0.4284	0.2226	17.33	2.1	0.1401	0.0207
0.4311	0.2272	18.01	2.4	0.1401	0.0227
0.4405	0.2425	20.34	2.9	0.1401	0.0301



En esta grafica se pueden observar dos curvas largas, una superior y otra inferior, para la condición de operación normal y tranquilizador aguas abajo. Estas curvas largas muestran un crecimiento gradual del tirante al incrementarse el gasto y, automáticamente, la abertura de la compuerta. La curva superior, tirantes de llegada, crece dentro de un rango y gradiente bastante menor que el rango y gradiente de la curva inferior, tirantes de salida, lo cual nos indica que la variación del tirante de llegada a la compuerta es pequeña, tal y como se espera sea el comportamiento de una compuerta Amil en operación normal. Cabe mencionar que se incrementó el gasto hasta el límite de la capacidad del canal y que la compuerta, en esa condición, continuó en auto balance hídrico.

En la misma gráfica se observan dos curvas cortas, una superior y una inferior, para la condición de operación normal y sin tranquilizador aguas abajo lo cual crece notablemente el valor de J , es decir, de la carga disponible detrás de la compuerta, respecto de la operación normal con tranquilizador. La curva superior crece rápidamente hasta un valor del tirante de llegada que alcanza la capacidad del canal.

Para la condición de trabajo sin tranquilizador, al incrementarse el gasto y llegarse al limite de abertura de la compuerta y de capacidad del canal hacia aguas arriba, $y_1 = 0.4405 \text{ m}$, el agua empezó a derramarse sobre los hombros del canal y en ese momento la compuerta empezó a salir de auto balance hídrico. Al inicio de la perdida de balance, la compuerta se balanceó levemente y el balanceo creció gradual pero rápidamente, generando ondas en el flujo proporcionales al balanceo de la compuerta. En este punto se detuvo la prueba.

Conclusiones:

- En operación normal de la compuerta y descarga ahogada, para valores “pequeños” de la carga disponible J la abertura máxima que se puede dar a la compuerta es de casi 20 cms y para valores “grandes” de la carga disponible J , la abertura máxima que se puede dar a la compuerta es de casi 3 cms. Es decir, que al disminuir el valor de la carga disponible J crece notablemente el valor máximo de abertura en la compuerta.
- Para cualquier condición de trabajo, con tranquilizador y si el, al rebasarse la capacidad del canal y derramarse el agua, la compuerta sale de auto balance hídrico. Condición de campo inaceptable.

Análisis de la Grafica No 3.- Abertura vs. Coeficiente de descarga, para $Q = \text{cte}$, aberturas fijas, descarga ahogada, con y sin tranquilizador.

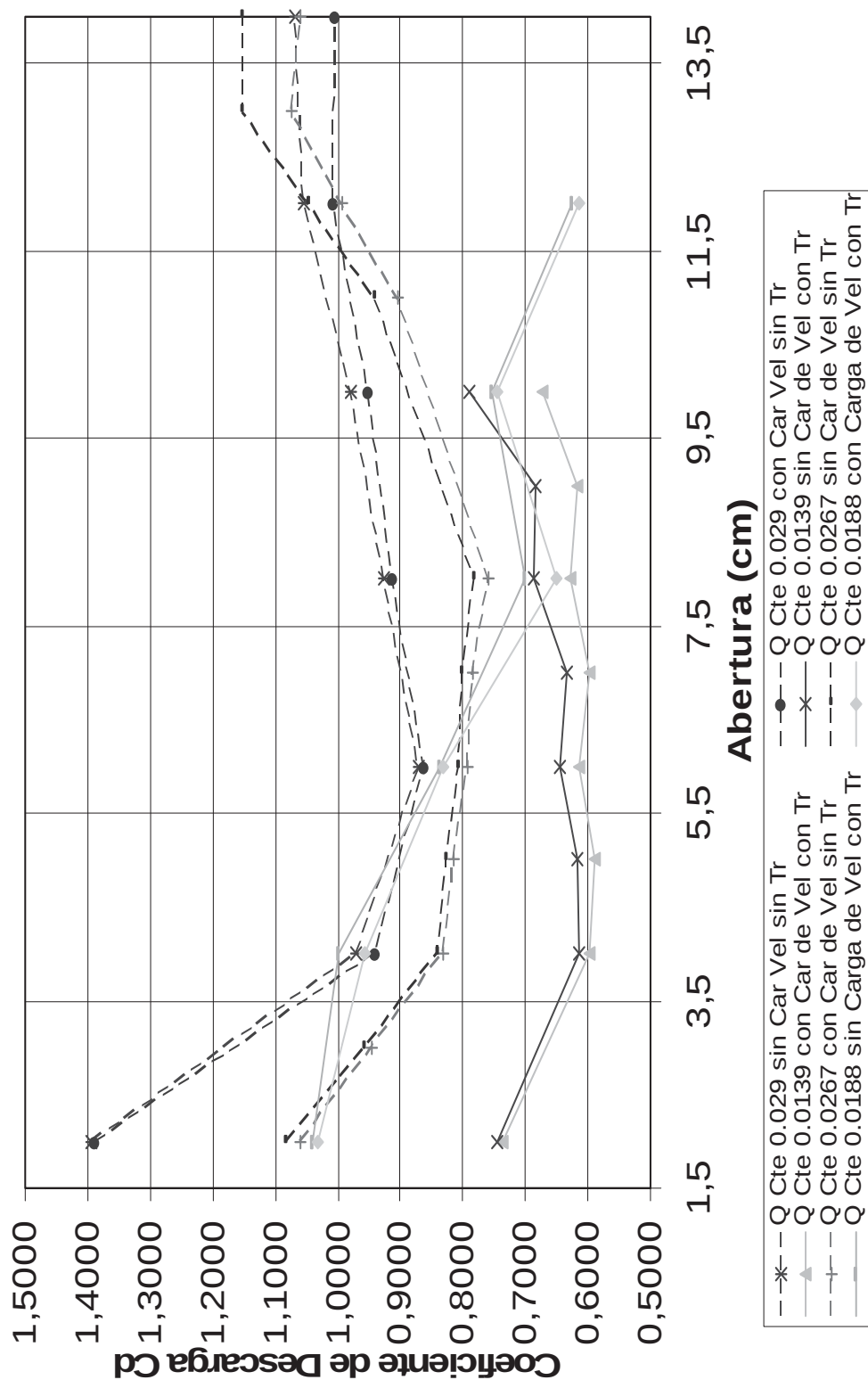
Área Llegada (m ²)	B	Área Abertura (m ²)	Cd sin Carga de Vel	Cd con Carga de Vel
0.2152	0.6253	0.0124	1.0416	1.0321
0.1902	0.6031	0.0237	0.9985	0.9569
0.1639	0.5788	0.0337	0.8376	0.8322
0.1565	0.5717	0.0440	0.6995	0.6495
0.1533	0.5687	0.0541	0.7541	0.7458
0.1516	0.5671	0.0641	0.6258	0.6155

Área Llegada (m ²)	B	Área Abertura (m ²)	Cd sin Carga de Vel	Cd con Carga de Vel
0.2046	0.6160	0.0122	1.3934	1.3889
0.1692	0.5838	0.0229	0.9720	0.9414
0.1474	0.5630	0.0328	0.8701	0.8621
0.1335	0.5494	0.0422	0.9275	0.9118
0.1269	0.5428	0.0516	0.9781	0.9504
0.1237	0.5395	0.0608	1.0542	1.0081
0.1221	0.5379	0.0700	1.0679	1.0046

Área Llegada (m ²)	B	Área Abertura (m ²)	Cd sin Carga de Vel	Cd con Carga de Vel
0.2200	0.6295	0.0125	0.7454	0.7358
0.1808	0.5946	0.0233	0.6151	0.5967
0.1722	0.5866	0.0286	0.6165	0.5892
0.1659	0.5806	0.0339	0.6446	0.6155
0.1632	0.5781	0.0391	0.6323	0.5964
0.1601	0.5752	0.0443	0.6857	0.6294
0.1589	0.5741	0.0495	0.6846	0.6166
0.1576	0.5728	0.0546	0.7905	0.6736

Área Llegada (m ²)	B	Área Abertura (m ²)	Cd sin Carga de Vel	Cd con Carga de Vel
0.2273	0.6358	0.0126	1.0817	1.0602
0.1853	0.5987	0.0177	0.9573	0.9461
0.1690	0.5836	0.0229	0.8389	0.8305
0.1524	0.5678	0.0277	0.8256	0.8139
0.1430	0.5587	0.0325	0.8069	0.7920
0.1362	0.5521	0.0373	0.8020	0.7829
0.1323	0.5482	0.0421	0.7825	0.7600
0.1217	0.5375	0.0558	0.9389	0.9052
0.1195	0.5353	0.0603	1.0468	0.9936
0.1181	0.5338	0.0648	1.1529	1.0733
0.1177	0.5334	0.0693	1.1505	1.0612

**Gráfica N° 3: Abertura vs Cd
Q Cte y Aberturas Fijas**



Como se puede observar en la grafica, se tienen cuatro pares de curvas; en todos los casos, la curva inferior fue construida tomando en cuenta la carga de velocidad y se dibujó para ilustrar gráficamente el peso que tiene el considerar, o no, la carga de velocidad sobre el coeficiente de descarga. Lo cual pudiera ser útil para calcular de manera mas precisa los gastos que escurren bajo la compuerta. La reducción del C_d en cada par de curvas es de la siguiente manera: Para $Q = 29.32$ l/s; 2.745%, $Q = 26.67$ l/s; 3.745%, $Q = 18.881$ l/s; 2.602% y para $Q = 13.91$ l/s; 6.48%, obteniéndose un promedio de reducción en el C_d de 3.775%.

En general se pudiera considerar el tomar en cuenta la carga de velocidad como una constante, menor que la unidad, en la ecuación de gasto. Los valores de coeficiente de descarga serían aprox. 4 % menores en el caso de considerar la carga de velocidad. En esta compuerta en particular sería del 3.775 %.

En los cuatro casos se observa un valor muy alto del C_d (1.4 - 0.75) para la abertura mas pequeña que se dio en las pruebas (2 cms) y se observa una caída muy pronunciada del C_d (0.95-0.62) hasta una abertura de 4 cms, después en todas las curvas, con tranquilizador y sin el, se formaron curvas cóncavas en las que se puede observar un valor mínimo del C_d , después la curva vuelve a subir. Estos valores mínimos se localizan dentro de un rango de aberturas de entre los 4 y 8 cms. Conviene recordar aquí que para un gasto constante, descarga ahogada y para cualquier valor fijado de abertura en la compuerta el tirante de salida y_3 fue casi constante. Y por aquí se pudiera encontrar la explicación de que se presente un valor mínimo del C_d . Téngase en cuenta que existe una contra pendiente en el canal con una altura de 16.9 cms lo que provoca un ahogamiento.

Conclusiones:

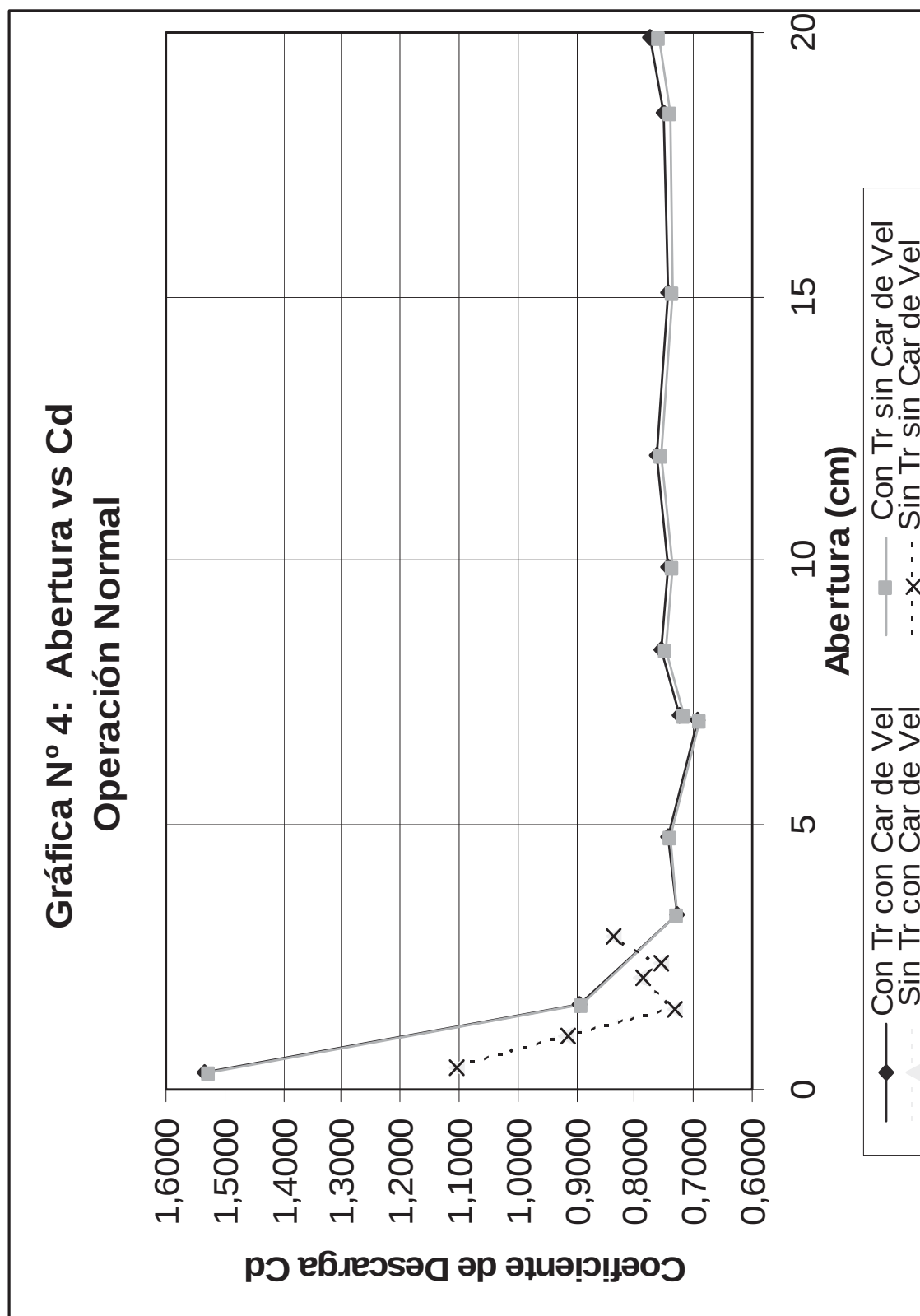
Para la condición de trabajo de gasto constante, aberturas fijas , con y sin tranquilizador:

- En el caso de tomar en cuenta la carga de velocidad de llegada a la compuerta los valores del C_d se podrían reducir en aproximadamente un 4%. Es esta compuerta en particular la reducción sería de 3.775%.
- Los valores del C_d (1.4 - 0.75) son “grandes” para aberturas “pequeñas” (2 cms) y estos valores caen rápidamente (0.95-0.62) hasta, aproximadamente, los 4cms de abertura.
- En los cuatro casos, con tranquilizador y sin el, se formaron curvas cóncavas en las que se encontraron valores mínimos entre los 4 y los 8 cms de abertura en la compuerta, después las curvas volvieron a subir hasta las aberturas máximas de la compuerta.

Análisis de la Grafica No 4.- Abertura vs. Coeficiente de descarga, para la condición de operación normal.

Área Llegada (m ²)	B	Área Abertura (m ²)	Cd sin Carga de Vel	Cd con Carga de Vel
0.2050	0.6163	0.0018	1.5327	1.5282
0.2057	0.6170	0.0098	0.8943	0.8906
0.2113	0.6219	0.0202	0.7298	0.7263
0.2124	0.6229	0.0293	0.7423	0.7377
0.2172	0.6271	0.0426	0.6935	0.6888
0.2180	0.6278	0.0432	0.7224	0.7173
0.2191	0.6287	0.0503	0.7548	0.7488
0.2199	0.6294	0.0596	0.7416	0.7346
0.2223	0.6315	0.0718	0.7641	0.7554
0.2244	0.6333	0.0894	0.7443	0.7338
0.2274	0.6358	0.1083	0.7528	0.7392
0.2279	0.6363	0.1158	0.7735	0.7572

Área Llegada (m ²)	B	Área Abertura (m ²)	Cd sin Carga de Vel	Cd con Carga de Vel
0.2077	0.6187	0.0025	1.1054E+00	1.1030
0.2121	0.6226	0.0062	9.1785E-01	0.9158
0.2133	0.6237	0.0093	7.3173E-01	0.7300
0.2193	0.6289	0.0131	7.8828E-01	0.7864
0.2210	0.6304	0.0150	7.5685E-01	0.7550
0.2270	0.6355	0.0182	8.3777E-01	0.8357



En la grafica se pueden ver dos pares de curvas, de las cuales se pueden extraer las siguientes observaciones:

En ambos casos las curvas en las que se tomó en cuenta la carga de velocidad se encuentran empalmadas sobre aquellas en las que no se hizo, por lo que se puede concluir que, en este caso, de operación normal, la carga de velocidad no tiene peso alguno en el coeficiente de descarga. Diferente del caso de operación con gasto constante y aberturas fijadas en el que la carga de velocidad tiene peso sobre los valores del C_d .

En ambos pares de curvas el valor del C_d cae rápidamente al incrementarse la abertura en la compuerta. En el par superior, con tranquilizador, el C_d cae aproximadamente 44.4 % en apenas 1.3 cms de abertura y en el par inferior cae aproximadamente 33.64 % en 1.1 cms de abertura. Después el par superior disminuye el valor de la pendiente hasta hacerse casi asintótica con el eje de las X en un valor del C_d de aproximadamente 0.75 a partir de una abertura de 3.3 cms y hasta casi los 20 cms. En el caso del par inferior, sin tranquilizador, la curva disminuye hasta un mínimo de $C_d = 0.73$; a = 1.5 cms y después sube hasta un valor máximo del $C_d = 0.84$; a = 2.9 cms.

Como se puede observar en la grafica el valor máximo de abertura en la compuerta, hasta los 20 cms, es mucho mayor para una carga disponible J “pequeña” (con tranquilizador), y mucho menor para una carga disponible J “grande” (sin tranquilizador) hasta los 3 cms de abertura. Este comportamiento ya se había visto en la grafica No 2.

Conclusiones:

- Para la condición de operación normal, es decir en auto balance hídrico, la carga de velocidad no tiene peso alguno sobre el valor calculado del coeficiente de descarga.
- En ambos casos, con tranquilizador y sin el, el valor del C_d es máximo (1.6-1.1) para aberturas pequeñas (0.3-0.4 cms) y después cae rápidamente dentro de los siguientes 1.6 cms de abertura.
- Para el caso de operación con tranquilizador después de la abertura de 3 cms el valor del C_d se hace casi constante en 0.75. Y en el caso de operación sin tranquilizador la curva es cóncava con un mínimo del $C_d = 0.73$ para 1.5 cms de abertura, después crece hasta un valor del $C_d = 0.84$, para una abertura de 2.9 cms en la que alcanzó el limite de capacidad del canal.
- Al disminuir la carga disponible J, se incrementa proporcional y significativamente la abertura máxima que se puede dar a la compuerta hasta el limite de la capacidad del canal.

Análisis de la Grafica No 5.- Tirante de llegada y_1 vs. Coeficiente de descarga C_d . Para la condición de trabajo de gasto constante, aberturas fijas, con y sin tranquilizador.

Las cuatro curvas trazadas forman curvas cóncavas, con tranquilizador y sin el, en las cuales se localiza un valor mínimo del C_d , al crecer el tirante, y disminuir la abertura, los valores del C_d crecen, hasta la capacidad del canal.

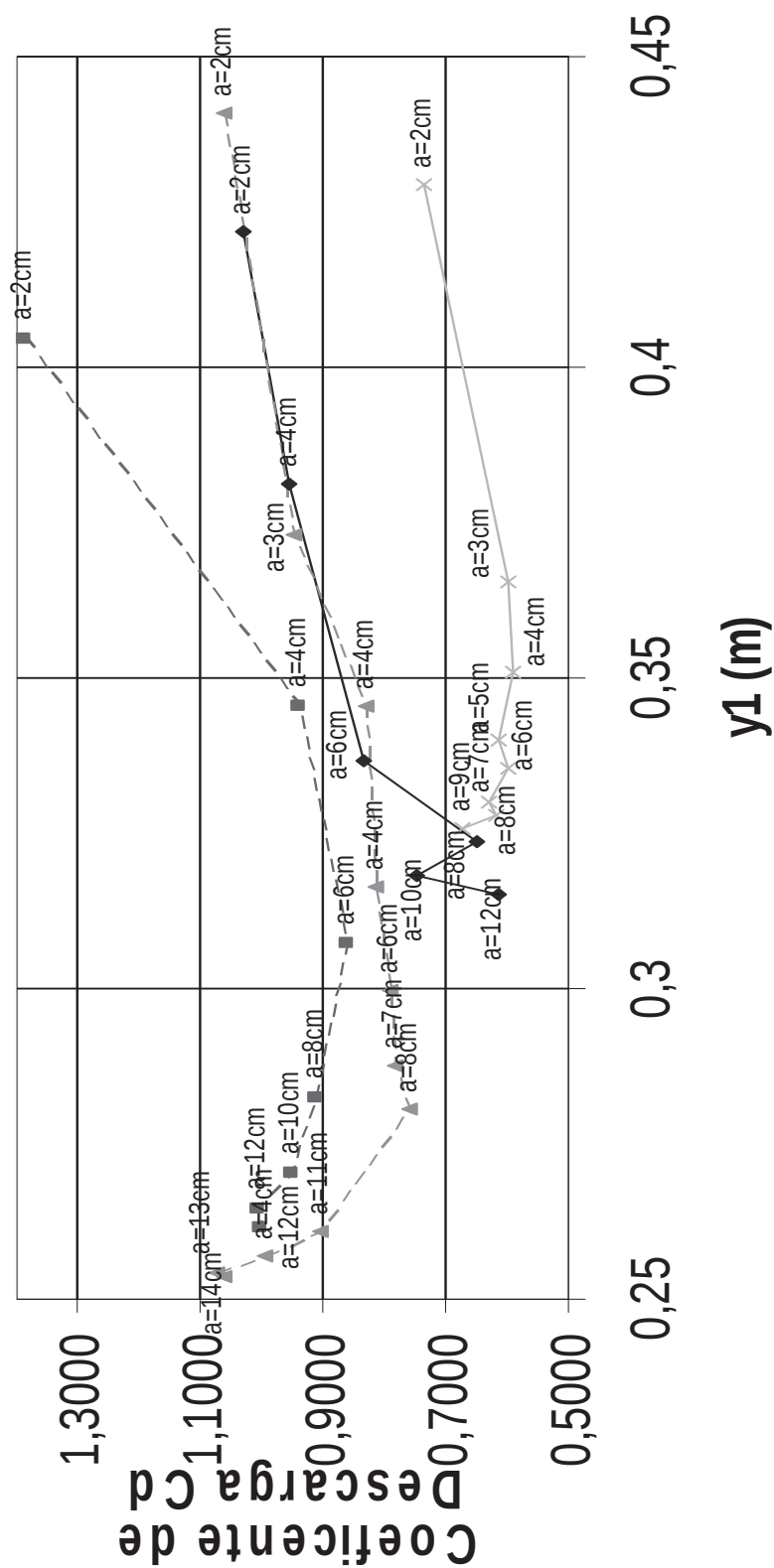
En el caso de operación con tranquilizador, al crecer la abertura los tirantes fueron disminuyendo hasta valores del orden de los 32 cms, pero, para la condición sin tranquilizador estos valores de los tirantes y_1 disminuyeron hasta valores del orden de los 25 cms, aun cuando los gastos en el canal eran mayores.

Los valores mínimos del C_d respecto del tirante y_1 , observados en la grafica No 5 coinciden exactamente con los mínimos de la grafica No 3, respecto de la abertura. Lo que se puede interpretar como que existe un valor mínimo del C_d para un gasto determinado, el cual existe para un valor del tirante y_1 y su correspondiente abertura o viceversa.

Conclusiones:

- En todos los casos, con tranquilizador y sin el, al crecer la abertura de la compuerta los valores del tirante de llegada fueron disminuyendo.
- También en todos los casos se formaron curvas cóncavas en las se que encontró un mínimo del C_d , después la curva vuelve a levantarse hasta los tirantes máximos que soporta el canal.
- Para un gasto determinado existe un valor mínimo del C_d , el cual se da para un valor del tirante y_1 y uno y solo uno, valor de la abertura, o viceversa.

**Gráfica N° 5: Cd vs Tirante Entrada
Q Cte y Aberturas Fijas**



—◆— Cfija2 con Tr Qprom= 18.86 - -■- - Cfija3 sin Tr Qprom= 29.32
 - -▲- - Cfija4 sin Tr Qprom= 26.67 —×— Cfija5 con Tr Qprom= 13.90

Análisis de la grafica No 6.- Coeficiente de descarga vs. Tirante de llegada. Para la condición de operación normal, con y sin tranquilizador.

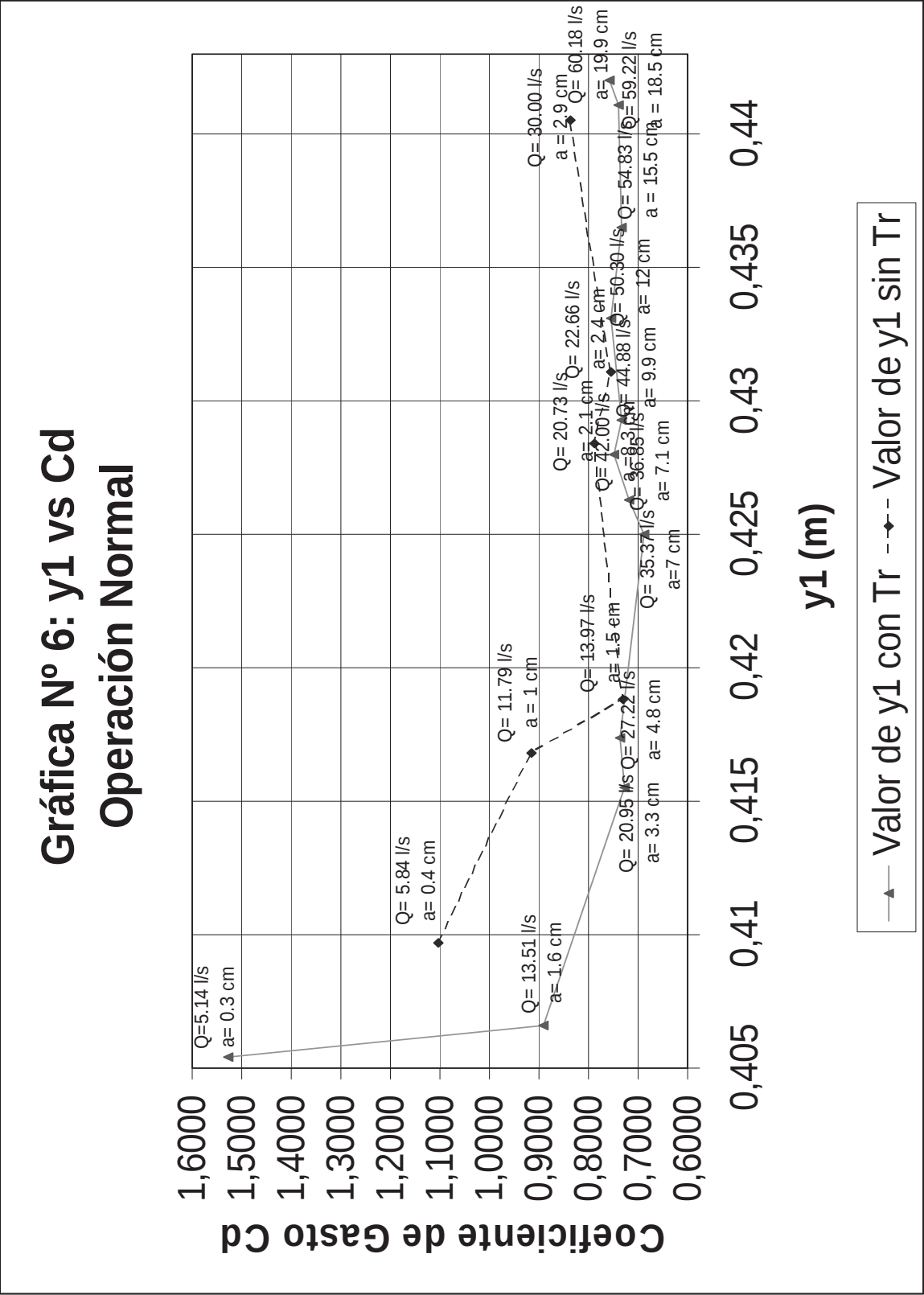
En esta grafica se puede observar para la curva inferior, con tranquilizador, una caída muy pronunciada del C_d , que va desde una valor de 1.54 para un tirante $y_1 = 0.4054$ cm y abertura de 0.3 cms, hasta un valor de $C_d = 0.89$ para $y_1 = 0.4065$ cms y $a = 1.6$ cms; aproximadamente el 63.57% en 1.1 mm de diferencia en la carga. Lo cual significa una perdida muy grande de energía para aberturas pequeñas de la compuerta y variación insignificante del tirante aguas arriba. Obsérvese que el comportamiento de esta curva es muy similar al de la curva No 4: abertura vs. C_d , en la que para aberturas mayores a 3.3 cms el $C_d = 0.75$ se hace constante, lo mismo pasa en la curva No 6 pero a partir de un tirante $y_1 = 0.414$ cms; se hace constante en $C_d = 0.75$.

La curva superior de la grafica No 6 en operación sin tranquilizador tiene una valor máximo del $C_d = 1.1$ para $a = 0.4$ cms y $y_1 = 0.409$; cayó hasta un valor mínimo del $C_d = 0.726$ para $a = 1.5$ cms y $y_1 = 0.419$ cms. A partir de este punto la curva sube suavemente, si se quiere linealmente, hasta un valor máximo de $C_d = 0.84$, $a = 2.9$ cms y $y_1 = 0.441$ cms, lo pudiera llevarnos a considerar, para efectos prácticos, un valor constante del C_d de entre 0.75 y 0.80 para aberturas ≥ 1.5 cms y tirantes y_1 también ≥ 0.419 cms.

Conclusiones:

Para la condición de operación normal, con y sin tranquilizador:

- Para la condición de operación normal y carga disponible “pequeña”, con tranquilizador, la perdida de energía, reflejada en el valor del C_d , es muy grande (1.54) para aberturas pequeñas en la compuerta y diferencias insignificantes de la carga hidráulica aguas arriba.
- Para la misma condición de trabajo anterior: A partir de un cierto valor, en este caso de: $a = 3.3$ cms y $y_1 = 0.414$, el $C_d = 0.75$ permanece constante hasta la capacidad máxima del canal.
- Para la condición de trabajo de operación normal, carga disponible “grande”, sin tranquilizador, la curva cae de $C_d = 1.1$ hasta un mínimo $C_d = 0.726$. A partir de este punto: para aberturas ≥ 1.5 cms y tirantes $y_1 \geq 0.419$ cms, el $C_d = 0.75-0.80$.



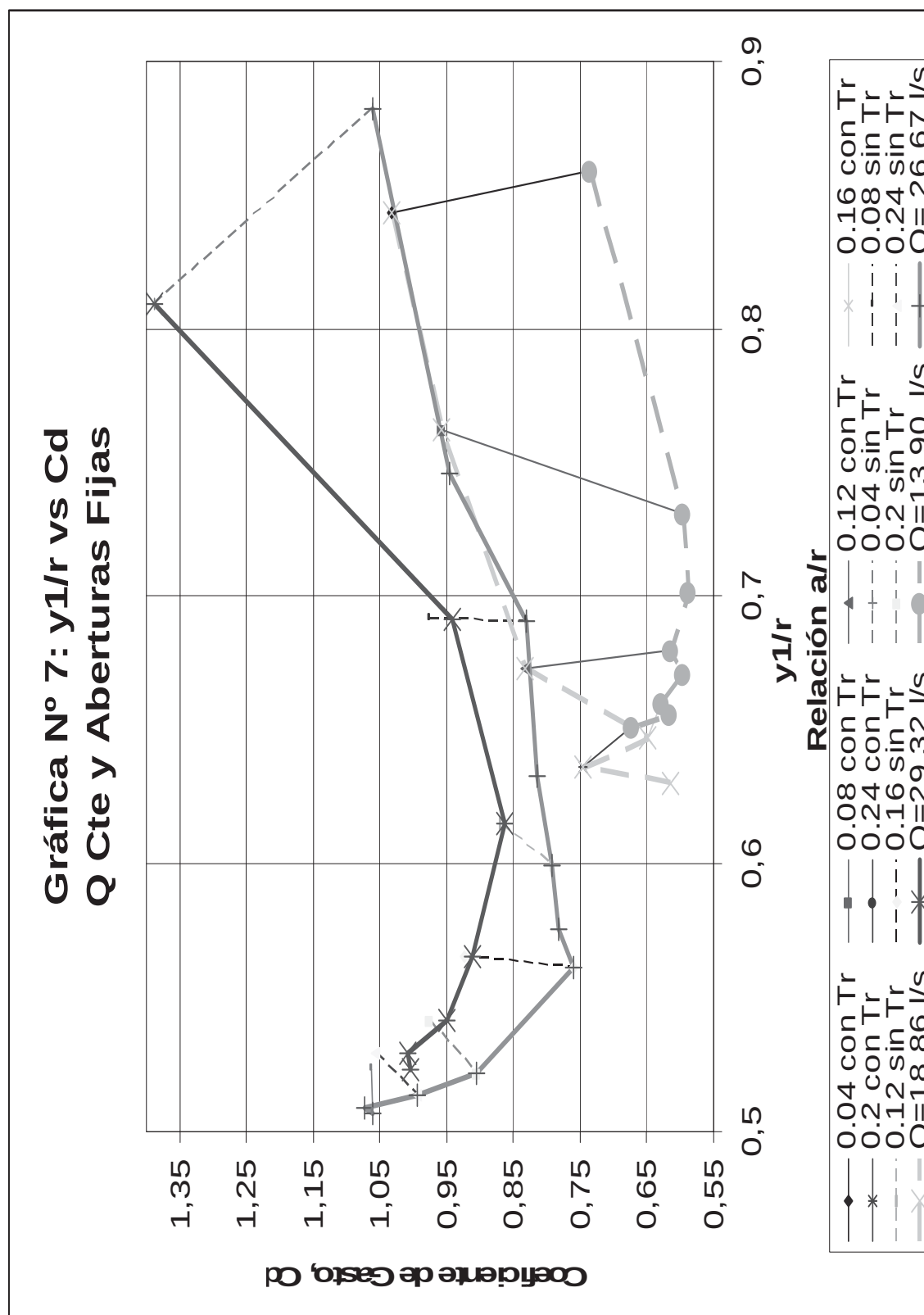
Análisis de la grafica No 7.- Tirante de llegada y_1 vs. Coeficiente de descarga C_d , para gasto constante y aberturas fijas, con y sin tranquilizador.

En la grafica se observan dos regiones. La primera trazada con líneas discontinuas que van desde el cociente $a/r = 0.04$ hasta $a/r = 0.24$, delimitada arriba por la curva que une los puntos de igual gasto $Q = 29.32$ l/s y delimitada abajo por la curva que une los puntos de gasto $Q = 26.97$ l/s. La abertura máxima que se dio a la compuerta fue de 12 cms; ($a/r = 0.24$) porque al observarla físicamente, la afectación sobre el flujo era mínima. El tirante de aguas arriba era prácticamente igual al de aguas abajo.

En ambas regiones se puede observar que para las aberturas mínimas ($a/r = 0.04$) y tirantes de llegada grandes (aprox. $y_1/r = 0.85$) la diferencia de los coeficientes de descarga obtenidos para la misma condición, con tranquilizador y sin el, es máxima. Esta diferencia se hace menor al ir creciendo las aberturas y reduciéndose los tirantes de llegada.

Conclusiones:

- Se comprueba que el comportamiento del flujo bajo la compuerta es muy diferente con tranquilizador que sin el. Es decir que la carga disponible J tiene una influencia importante sobre el flujo y la compuerta.
- En ambas regiones se puede observar que para las aberturas mínimas ($a/r = 0.04$) y tirantes de llegada altos (aprox. $y_1/r = 0.85$) la diferencia de los coeficientes de descarga obtenidos para la misma condición, con tranquilizador y sin el, es máxima.



Análisis de la grafica No 8.- Tirante de llegada y_1 vs. Gasto descargado. Para la condición de operación normal.

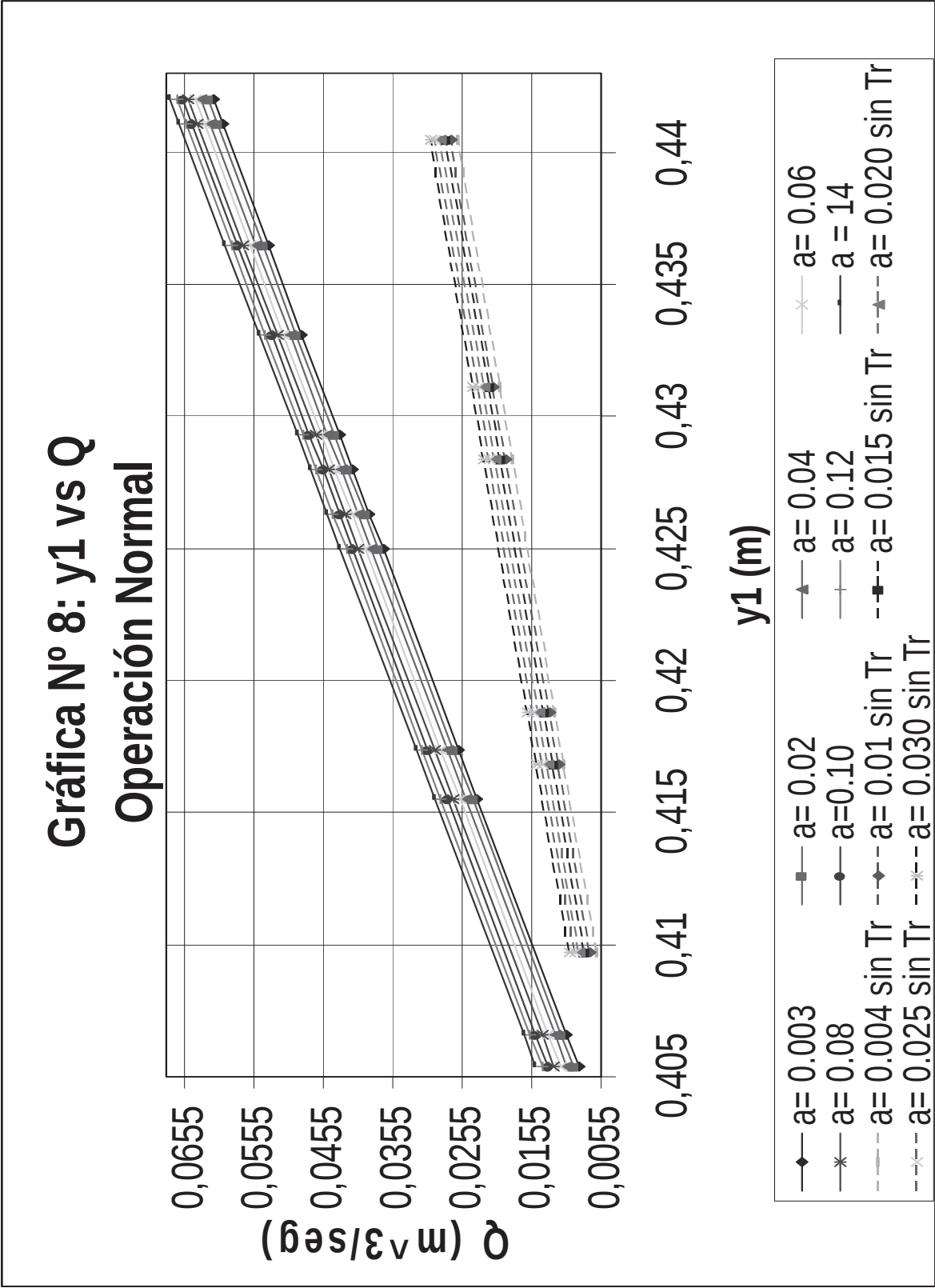
En esta grafica se observa que la familia de curvas generada para la condición sin tranquilizador es bastante mas limitada en el rango de tirantes y gastos que puede descargar la compuerta, respecto de la condición con tranquilizador. Los puntos en la curva significan valores experimentales. En este caso para conocer el gasto basta entrar a la grafica con el valor del tirante de llegada y_1 , interceptar la curva para la abertura deseada y luego horizontalmente encontrar el gasto que descarga la compuerta. El gasto obtenido lleva implícito un coeficiente de descarga variable. Para linealizar las ecuaciones se utilizó un programa de computo denominado Regresión lineal múltiple-CGG-1.0-ES. Inspector R y r CCG- Soft. Y las ecuaciones encontradas son:

$$Q = -0.2602 + a(0.154) + y_1(0.6484) \text{ Sin tranquilizador}$$

$$Q = -0.5731 + a(0.044) + y_1(1.4349) \text{ Con tranquilizador}$$

Conclusiones:

- La carga disponible J es una variable que tiene una fuerte influencia sobre el flujo y el funcionamiento de la compuerta. Al incrementarse el ahogamiento, y disminuir la carga disponible J, se incrementa el rango de tirantes de llegada y de gastos que puede descargar la compuerta.



5.2 Funcionamiento de compuerta.

Comportamiento físico de la compuerta bajo las siguientes condiciones de operación:

1. Apertura de la compuerta sin intervención, con y sin tranquilizador.
2. Comportamiento de la compuerta ante una perturbación en el flujo.

1ª Condición. Apertura de la compuerta sin intervención, con y sin tranquilizador. Estando la compuerta cerrada el flujo abrió la compuerta y esta logró estabilizarse en un tiempo corto.

2ª condición. Comportamiento de la compuerta ante una perturbación en el flujo.

1. Caso. Perturbación menor y tranquilizador aguas abajo. Estando la compuerta equilibrada se generó una perturbación en la superficie la cual no logró sacar de balance a la compuerta. Esta perturbación se realizó con la palma de la mano sobre a superficie del agua y, obviamente, no tiene ningún control.
2. Caso. Perturbación menor y sin tranquilizador aguas abajo. Se observó en este caso que la compuerta tenía una mayor oscilación que en el caso anterior y sin embargo logró balancearse bien para la misma perturbación que en el caso anterior. Esta oscilación mayor en la compuerta se debe a que la carga disponible J es mayor que en el caso anterior.
3. Caso. Perturbación mayor y sin tranquilizador aguas abajo. En este caso la perturbación generada fue mayor y la compuerta no logró balancearse incluso fue incrementándose el balanceo hasta que el agua derramó sobre el canal. En este punto intervenimos manualmente y paramos la prueba. De lo anterior pudiera concluirse que habría un tamaño o dimensión de perturbación, la cual genera unas ondas en el flujo, la cual sería el límite con el que la compuerta lograra alcanzar el balance, y dicho de otra manera, habría un tamaño de onda que logra desequilibrar la compuerta.

Lo anterior son únicamente observaciones físicas del comportamiento de la compuerta que no tienen ningún tipo de medición ni control y solo nos dan por resultado una descripción cualitativa del funcionamiento de la misma.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES:

Para la condición de Gasto Constante, Aberturas fijas y Descarga ahogada: con tranquilizador y sin el.

1. Al crecer la abertura de la compuerta los tirantes de entrada disminuyen gradualmente hasta casi igualarse con el tirante de salida. Los tirantes de salida son constantes e independientes de la abertura de la compuerta. (Grafica No 1).
2. Los tirantes de entrada y salida varían proporcional y significativamente al variar la carga disponible J . Por ejemplo: Al utilizarse un tranquilizador, y disminuir la carga disponible J , las curvas de los tirantes de entrada y salida suben proporcionalmente. (Grafica No 1).
3. También en todos los casos se formaron curvas cóncavas en las se que encontró un mínimo del C_d después la curva vuelve a levantarse hasta los tirantes máximos que soporta el canal. (Grafica No 3).
4. Para un gasto determinado existe un valor mínimo del C_d el cual se da para un valor del tirante y_1 y uno y solo uno, valor de la abertura, o viceversa. (Graficas No 3 y 5).
5. En ambas regiones de la gráfica No 7 se puede observar que para las aberturas mínimas ($a/r=0.04$) y tirantes de llegada altos (aprox. $y_1/r=0.85$) la diferencia de los coeficientes de descarga obtenidos para la misma condición, con tranquilizador y sin el, es máxima.

Para la condición de Operación Normal, es decir en auto balance hídrico, con tranquilizador y sin el.

1. La carga de velocidad no tiene peso alguno sobre el valor calculado del coeficiente de descarga. Diferente del caso de operación con gasto constante y aberturas fijadas en el que la carga de velocidad tiene peso sobre los valores del C_d . En este caso en particular la reducción sería en promedio de 3.775 %. (Grafica No 3 y 4).
2. Para cualquier condición de trabajo, con tranquilizador y si el, al rebasarse la capacidad del canal y derramarse el agua, la compuerta sale de auto balance hídrico. Condición de campo inaceptable. (Grafica No 2)
3. Para la condición de operación normal y tranquilizador, carga disponible “pequeña”, a partir de un cierto valor, en este caso de: $a = 3.3$ cms y $y_1 = 0.414$, el $C_d = 0.75$ permanece constante hasta la capacidad máxima del canal. (Graficas No 4 y 6).

4. Para la condición de trabajo de operación normal y sin tranquilizador, carga disponible “grande”, la curva cae de $C_d = 1.1$ hasta un mínimo $C_d = 0.726$. A partir de este punto: para aberturas ≥ 1.5 cms y tirantes $y_1 \geq 0.419$ cms, el $C_d = 0.75-0.80$. (Grafica No 6).
5. En el caso de operación normal la carga disponible J es una variable que tiene una fuerte influencia sobre el flujo y el funcionamiento de la compuerta. Al incrementarse el ahogamiento, y disminuir la carga disponible J, se incrementa el rango de tirantes de llegada y de gastos que puede descargar la compuerta. (Grafica No 8)

CONCLUSIONES GENERALES:

Para ambas condiciones de trabajo anteriores:

1. En todas las condiciones de trabajo de la compuerta, con tranquilizador y sin el, se presentó una descarga ahogada. Tómese en cuenta que existe, aguas debajo de la compuerta, una contra pendiente del canal que provoca una sobre elevación de 17.0 cms.
2. Para todas las condiciones de trabajo, es decir, para gasto constante y aberturas fijas, así como en operación normal, la carga disponible J tiene una influencia muy importante sobre el comportamiento del flujo bajo la compuerta Amil. Es decir, que al disminuir el valor de la carga disponible J crece notablemente el valor máximo de abertura en la compuerta, del tirante de llegada y del gasto en el canal.
3. Para todas las condiciones de trabajo el Coeficiente de descarga es “grande” para aberturas “pequeñas” y variaciones del tirante de llegada insignificantes. Lo cual significa una pérdida muy grande de energía para aberturas pequeñas de la compuerta y tirante casi constante aguas arriba.
4. La compuerta es más sensible a salir de autobalance hídrico ante perturbaciones en el flujo y en la compuerta misma, para cargas disponibles J “grandes”.
5. Al incrementarse el ahogamiento y, por lo tanto, reducir la carga disponible J, se incrementa la posibilidad de que la compuerta mantenga su autobalance hídrico. Lo anterior es producto de la observación física del fenómeno, sin mediciones del mismo.

RECOMENDACIONES:

1. Dado que la influencia de la carga disponible J es bastante grande sobre el flujo y el funcionamiento de la compuerta se propone en un proyecto futuro, realizar pruebas para diferentes condiciones controladas de ahogamiento mediante la colocación de una compuerta abatible, colocación de tranquilizadores de diferentes tamaños, eliminar cualquier ahogamiento y trabajar a descarga libre.
2. Se propone también realizar las pruebas necesarias para probar que efectivamente al aumentarse el ahogamiento se incrementa la probabilidad de que la compuerta salga de

auto balance hídrico, lo que de resultar cierto, incrementaría la seguridad de operación de las compuertas.

3. Se propone realizar mas pruebas en Operación normal, como una continuación de este trabajo, para más condiciones de ahogamiento y su correspondiente carga disponible J, con la finalidad de construir más familias de curvas en la grafica No 8.
4. Dado que la carga se velocidad bajo la condición de trabajo con gasto constantes y aberturas de la compuerta fijas, reduce en este caso el 3.775 % el valor del coeficiente de descarga, se propone obtener este dato para otras compuertas, antes de hacer una generalización a priori del mismo.

BIBLIOGRAFÍA.

- Leví, Enzo y Álvaro Aldama (1978). “Diseño Hidrodinámico y Automatización Fluídica en Obras hidráulicas”. Instituto de Ingeniería, UNAM. México.
- García, Villanueva Nahum Hamed (1998). “Estructuras fluídicas para la Automatización de Canales”. Manual Práctico. SEMARNAP, CNA, IMTA. México.
- García, Villanueva Nahum Hamed (2000). “Operación de la Red Principal”. Material Tecnológico. CNA, IMTA, CECEX. México.
- Fuentes, Ruiz Carlos, *et al.* (1977). “Manual para Diseño de Zonas de Riego Pequeñas”. CNA, IMTA. México.
- Espinoza, Méndez Rafael (2000). “Operación y Selección de Estructuras Hidráulicas en Canales”. CNA, IMTA, ANUR. México.
- Sotelo, Ávila Gilberto (1974). “Hidráulica General”. Vol. I. Fundamentos. Ed. Noriega y Ed. Limusa. UNAM. México.
- Ponce, de la Cruz María del Carmen (2002). “Análisis del Funcionamiento Hidráulico de una Compuerta Radial tipo Amil con un modelo físico”. Tesis, UMSNH. México.

REFERENCIAS.

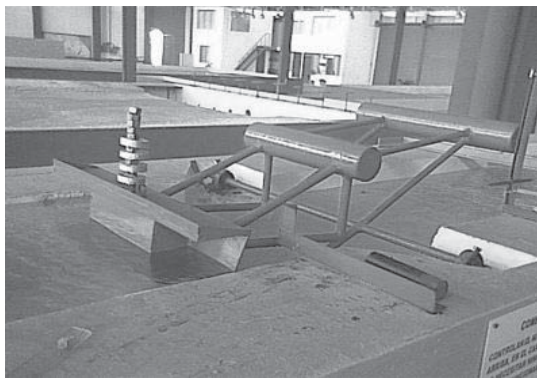
1. - U. Puppini: *Hydraulique*; Incola Zanichelli, Boloña (1947).
2. - P. G. Kisieliev: *Manual del Cálculos Hidráulicos*; GEIL, Moscú (1961).
3. - H. Press y R. Schröder: *Hydromechanik im Wasserbau*; Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlín (1960).
4. - Ven Te Chow: *Open Channel Hydraulics*; McGraw-Hill Book, Co., Nueva York (1959).
5. - F. J. Domínguez: *Hidráulica*, Editorial Universitaria, S. A.; Santiago de Chile (1959).
6. - F. H. Knapp: *Ausfluss Überfall und Durchfluss im Wasserbau*; Verlag G. Graun, Karlsruhe (1960).
7. - F. M. Henderson: *Open Channel Flow*; The MacMillan Company, Nueva York (1966).
8. - A. Toch: *Discharge Characteristics of Tainter Gates*; Trans, ASCE, Vol. 120 (1955).

Anexo I. Informe fotográfico.

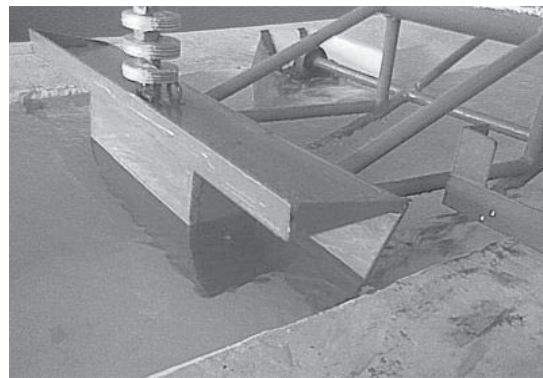
Compuerta en Taller buscando equilibrio
En el aire.



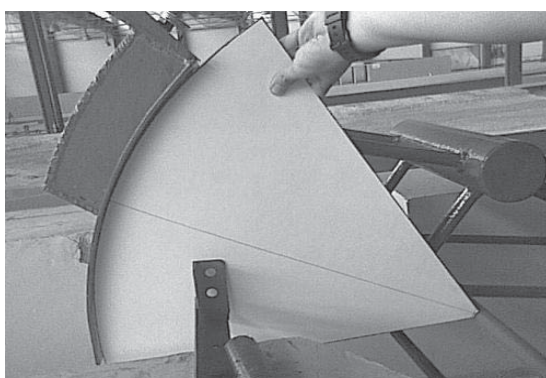
Tranquilizador puesto en el inicio de la
Caída.



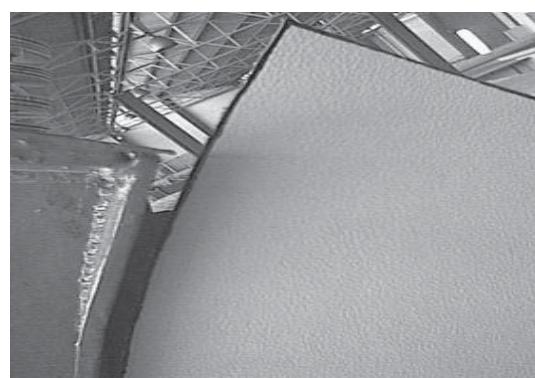
Compuerta Amil en equilibrio.



Acercamiento de la Compuerta Amil.



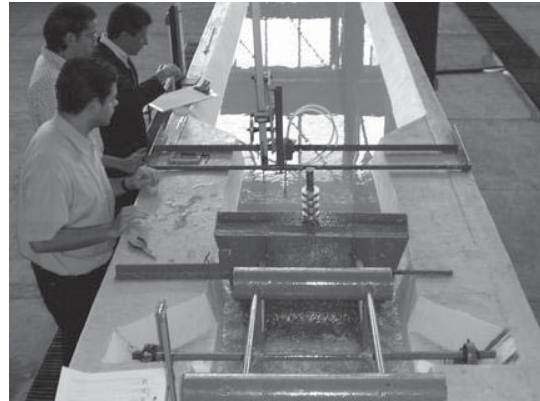
Muestra de la curvatura de la Compuerta
Amil.



Detalle donde se muestra que no está
Bien la curvatura.



Medición de la abertura de la Compuerta Amil.



Mediciones del tirante de entrada y la velocidad de llegada.



Medición del Tirante de Salida.



Vista panorámica de la Caída después de La Compuerta Amil.



Medición del Gasto que pasa por la Compuerta por medio de un vertedor de Pared Delgada.

