

Artículo publicado en el Repositorio Institucional del IMTA

<i>Título</i>	Estudio experimental del flujo ocasionado por la ruptura de una cortina.
<i>Autor / Adscripción</i>	Polioproto Martínez Austria Carlos Patiño Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
<i>Publicación</i>	Ingeniería Hidráulica en México, 12(1): 65-75
<i>Fecha de publicación</i>	1997
<i>Resumen</i>	Se presentan los resultados de un estudio experimental del comportamiento de la onda de inundación, bajo condiciones con y sin tirante aguas abajo, debida a la ruptura de una cortina. Los experimentos se llevaron a cabo en un canal recto, de pendiente nula y fondo y paredes lisas, de sección rectangular y de 60 m de longitud. Una innovación en este tipo de experimentos es que los datos fueron obtenidos y posprocesados mediante la utilización de un equipo de video de alta velocidad, con grabación y análisis digital de imágenes. La técnica de medición aplicada resultó muy satisfactoria y los resultados son de utilidad para la validación de modelos numéricos. Otra contribución son los experimentos con varios niveles de agua abajo de la cortina.
<i>Identificador</i>	<a href="http://hdl.handle.net/123456789/1224">http://hdl.handle.net/123456789/1224</a>

## Estudio experimental del flujo ocasionado por la ruptura de una cortina

Poliopetro Martínez Austria  
Carlos Patiño

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

*Se presentan los resultados de un estudio experimental del comportamiento de la onda de inundación, bajo condiciones con y sin tirante aguas abajo, debida a la ruptura de una cortina. Los experimentos se llevaron a cabo en un canal recto, de pendiente nula y fondo y paredes lisas, de sección rectangular y de 60 m de longitud. Para simular la ruptura instantánea de la cortina se utilizó una compuerta vertical, la cual era elevada súbitamente. Una innovación en este tipo de experimentos es que los datos fueron obtenidos y posprocesados mediante la utilización de un equipo de video de alta velocidad, con grabación y análisis digital de imágenes. La técnica de medición aplicada resultó muy satisfactoria y los resultados son de utilidad para la validación de modelos numéricos. Otra contribución son los experimentos con varios niveles de agua abajo de la cortina.*

**Palabras clave:** falla en presas, flujo, onda de inundación, ruptura de cortina, compuerta vertical, validación de modelos numéricos, hidráulica computacional.

### Introducción

Las fallas en algunas cortinas de presas han hecho patente la necesidad de un mejor conocimiento técnico de la onda de inundación y sus efectos en la ruptura de presas. En varios países han ocurrido desastres de este tipo y de diferente magnitud que, debido a la mala ubicación de nuevos asentamientos humanos, se vuelven potencialmente más peligrosos. En México son varias las presas cuya falla pondría en peligro zonas pobladas (cuadro 1).

Dentro de los desastres mas recientes y conocidos provocados por la falla de presas podemos mencionar los ocurridos en los Estados Unidos de América, en la presa Teton en Idaho, la presa South Fork Johnstown en Pennsylvania y la presa Buffalo Creek en el oeste de Virginia (Bellos y Sakkas, 1987).

En México también se han presentado casos de fallas en cortinas, afortunadamente de menor magnitud, como el ocurrido en octubre de 1969 en la presa La Laguna, Puebla, que presentó filtraciones a través de la cimentación de la cortina, lo que a su vez provocó tubificaciones y posteriormente la falla de la estructura. No hubo pérdidas humanas (SARH, 1979).

El flujo producido por la falla de una cortina puede ocasionar graves inundaciones que dañen severamente propiedades e incluso cobren vidas humanas. Por ello, es de suma importancia determinar el alcance de los daños que ocurrirían en caso de la ruptura de la cortina de alguna del gran número de presas que existen en nuestro país.

En muchas ocasiones las presas fallan por el derrame de agua sobre su estructura, producido por una capacidad inadecuada del vertedor de demasías. También el problema se presenta por la filtración o tubificación a través de la cortina, las fallas del talud en el vaso, o los daños por terremotos, entre otras circunstancias. El caso más desfavorable, considerado para la presente investigación, es que la estructura completa falle en forma instantánea. No obstante que esta situación es poco probable, puesto que se trata de una condición extrema, ha sido empleada por varios investigadores (Stoker, 1957; Su y Barnes, 1970; y Sakkas y Strelkoff, 1973). Otros han considerado más probable la formación de un boquete o abertura de la presa, que es una falla parcial cuya gravedad depende también del tiempo. Las cortinas de tierra o enrocamiento, que con mucho son las más numerosas, no fallan usual-

**1. Clasificación de presas por su potencial de daños**

Categoría	Potencial de peligro del almacenamiento		Potencial de daños de la falla (a)		Avenida de diseño para la obra de excedencias
	Almacenamiento en millones de m <sup>3</sup>	Altitud de cortina (m)	Pérdida de vidas	Daños	
1	2	3	4	5	6
Mayor no se tolera falla	60	18	Considerable	Excesivos o como mat. de política establecida	Máx. prob., la más severa avenida que pueda considerarse razonablemente posible
Intermedia	1.2 a 60	12 a 60	Posible, pero pocas	Dentro de la capacidad financiera del propietario	Proyectos comunes, basados en la tormenta más severa ó condiciones metereológicas de la región específica
Pequeña	1.2	15	Ninguna	De igual magnitud que el costo de la presa	Basada en estudios de frecuencias; 50 a 100 años de intervalo de ocurrencias

mente en forma completa ni instantánea. La formación de la ruptura requiere una cantidad finita de tiempo que puede variar desde unos minutos hasta algunas horas; dependiendo de la altura de la cortina, los materiales empleados en su construcción, el grado de compactación y la magnitud y duración del flujo que se derrama.

La falla por tubificación se presenta en algún punto por debajo de la corona, y es el resultado de canales internos que se forman dentro de la cortina y que son producto del agua que fluye a través de ella. A medida que el proceso de erosión acarrea materiales, se forma un boquete cada vez mayor. Debe hacerse notar que existen antecedentes de que las presas de tierra mal construidas y los terraplenes que hacen la función de cortina, en condiciones extremas (por ejemplo, terraplenes de ferrocarril y pilas de materiales de desecho), pueden fallar en minutos y tener anchos de ruptura cercanos hasta tres veces la altura de la cortina o aún mayores.

Las cortinas de concreto de gravedad también tienden a fallar con rupturas parciales a medida que una o más de las secciones monolíticas de concreto, formadas durante su construcción, se ven forzadas a separarse por la acción del agua. El tiempo requerido para la formación de la ruptura, en este caso, es de pocos minutos. Para las cortinas de concreto de arco, la suposición de falla completa e instantánea puede acercarse mucho a la situación real.

Gracias al gran desarrollo alcanzado en hidráulica computacional, así como la disponibilidad de computadoras cada vez más poderosas, durante los últimos años ha crecido el interés en la predicción del com-

portamiento de la onda de inundación mediante el desarrollo de modelos numéricos. Varios investigadores han realizado diversos modelos unidimensionales para condiciones iniciales diferentes (Fenema y Chaudry, 1987; Jansen, 1980; Rajar, 1978). Más recientemente, se cuenta con algoritmos de mallas adaptivas, que hacen posible seguir con mayor detalle el flujo (Martínez-Austria y Aldama, 1990). Sin embargo, tanto por las dificultades de la modelación del flujo como por la validación de los modelos, es indispensable su verificación experimental.

En vista de que los datos experimentales que describen el comportamiento de dicho flujo no se encuentran disponibles, se llevó a cabo este estudio con la finalidad de observar y medir el fenómeno en su forma unidimensional, y así poder crear un banco de datos experimentales para la validación de modelos numéricos. Los resultados experimentales fueron obtenidos con gran detalle utilizando para ello técnicas modernas de visualización del flujo de alta velocidad.

En particular, mediante esta investigación se recabaron datos que describen el comportamiento de una onda de flujo rápidamente variado, producida por la ruptura de la cortina en una presa, observado físicamente en el laboratorio.

Entre los trabajos experimentales realizados por otros investigadores se pueden mencionar los primeros llevados a cabo por Dressler (1954) que consistieron en almacenar agua dentro de un estanque para liberarla instantáneamente dentro de un canal recto, rectangular y horizontal. En la Estación Experimental de Vías Fluviales de los Estados Unidos de América (WES, por sus siglas en inglés), del Cuerpo de Ingenie-

ros de la Armada de los Estados Unidos (1978), se llevaron a cabo series de experimentos similares a los de Dressler usando un canal rectangular con una pendiente pequeña bajo condiciones unidimensionales.

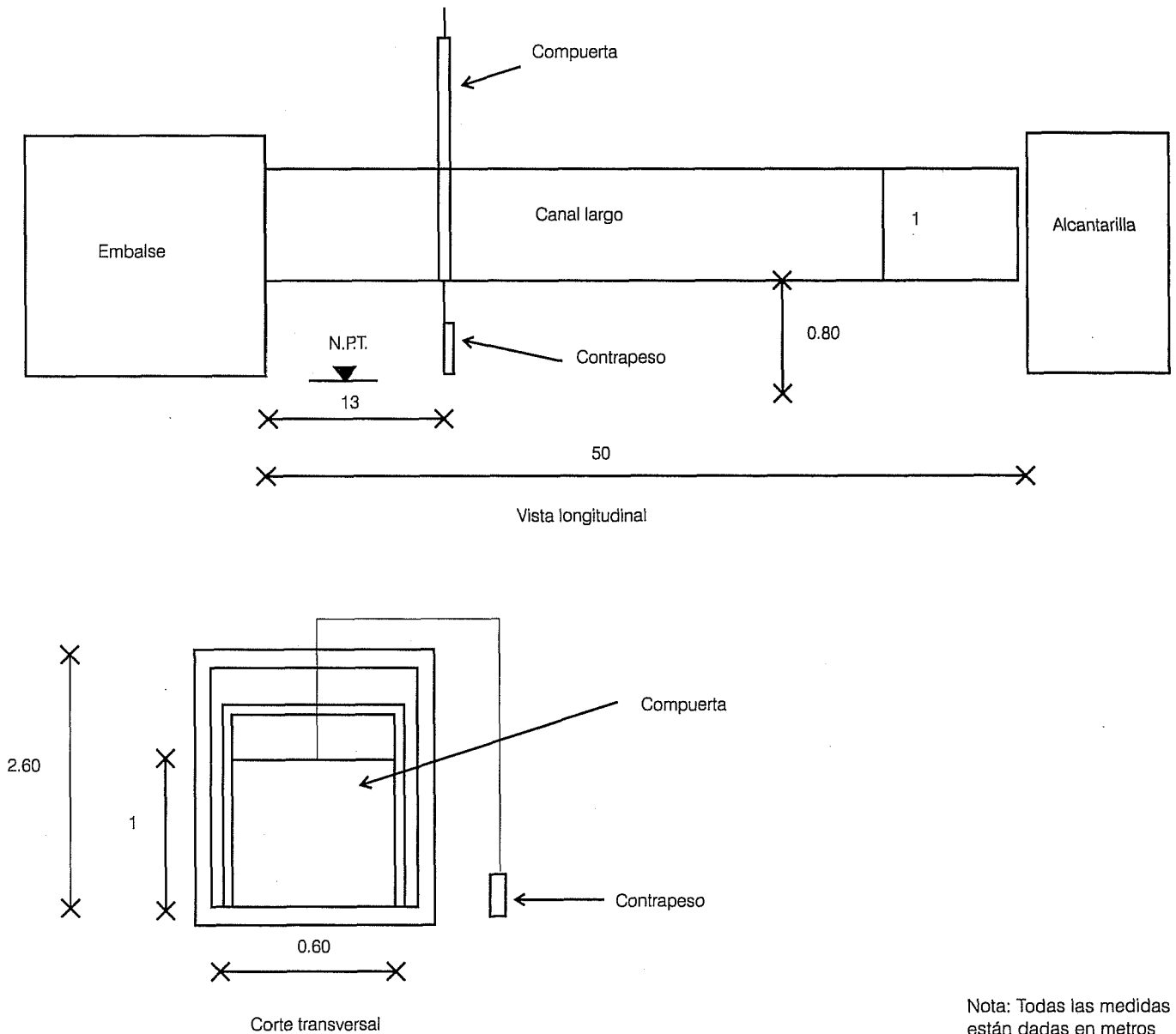
Los datos obtenidos incluyeron tanto rupturas parciales como fallas totales en las presas. En los estudios llevados a cabo por Dressler (1954), se establece una comparación entre una solución numérica y los resultados experimentales. La solución numérica se obtuvo utilizando la fórmula de Chézy para el cálculo del efecto de resistencia durante la onda de inundación.

Existe una comparación satisfactoria entre los resul-

tados numéricos y los datos experimentales observados, excepto en la región que se encuentra cerca del frente de la onda. Se concluyó que la fórmula de Chézy no es la más adecuada para describir numéricamente el comportamiento del frente de la onda de inundación presentada durante la ruptura de una cortina. Esta fue la limitante principal observada en este estudio.

En la presente investigación, gracias a la técnica de visualización de alta velocidad, fue posible estudiar con detalle el comportamiento de la onda de inundación y su propio frente.

### 1. Diagrama de las instalaciones empleadas (IMTA)



Nota: Todas las medidas están dadas en metros

## Instalaciones experimentales e instrumentación

Los experimentos se realizaron en el laboratorio de hidráulica del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, IMTALAB, que cuenta con un sistema de suministro de agua recirculante de hasta 400 l/s, con un tanque de almacenamiento, un canal de pruebas, una compuerta deslizante para simular la cortina y otra de control de niveles al final del canal. El diagrama de las instalaciones empleadas puede apreciarse en la ilustración 1.

El canal de pruebas utilizado fue recto, horizontal y de sección rectangular, con 60 m de longitud efectiva, 0.60 m de ancho y 1 m de profundidad, elevado 0.80 m del piso, fondo liso de concreto revestido y paredes laterales de vidrio en toda su longitud. Termina en un sistema recolector que lleva el agua a una cisterna para su recirculación.

Se eligieron estas características con el fin de provocar el flujo unidimensional que se requería para los experimentos. Al final del canal se colocó una compuerta, por medio de la que fue posible mantener un tirante constante cuando las condiciones de prueba así lo requerían.

La falla de la cortina en una presa se simuló levantando una compuerta, que contenía el agua almacenada en un tanque, cuya estructura tiene una altura de 2.5 m y cuenta con una placa de acero de 1 m de altura y un ancho de 0.60 m, unida por medio de un cable y una polea a un contrapeso, colocado fuera del canal, con el que se consiguió el levantamiento prácticamente instantáneo de la placa de acero (en aproximadamente 0.4 s), produciéndose con ello una fuerte aceleración inicial descendente del agua almacenada. Las dimensiones de la placa de acero de la compuerta se propusieron de acuerdo con la geometría del canal.

La compuerta fue colocada dentro del canal a 13 m de la sección de entrada, con el fin de evitar posibles perturbaciones aguas arriba que pudieran afectar el comportamiento del flujo.

A partir de donde se encuentra ubicada la compuerta se localizaron seis estaciones de medición aguas abajo, con una separación de 6 m entre cada una de ellas. La primera se localizó exactamente en el sitio de la compuerta. Cabe mencionar que la medición de niveles o tirantes se realizó en la línea central del canal, registrando con ello su variación a través del tiempo.

Un aspecto interesante que se percibe en los resultados que se mostrarán más adelante es que en varios de los experimentos, a partir de la segunda estación de medición, con un tirante inicial de 60 cm aguas arriba y un tirante inicial aguas abajo de la compuerta, fue

posible observar la onda reflejada que se origina por el encuentro del frente de la onda de inundación con la compuerta localizada al final del canal.

La variación de los niveles del agua con el tiempo, ocurridos inmediatamente después de efectuado el levantamiento brusco de la compuerta, fueron captados por medio de un equipo procesador de imágenes de alta velocidad Kodak Ektapro EM MOD. 1012. Esta técnica de medición para recabar los datos experimentales es muy precisa, ya que posee la facilidad de obtener digitalmente imágenes para su análisis posterior a detalle.

La captura de imágenes empleando esta técnica permite al investigador tener la certeza de manipularlas posteriormente, y así realizar las mediciones. Debido a la velocidad con que se capturan las imágenes, es posible observar el comportamiento del flujo cuadro por cuadro con intervalos de 0.02 segundos.

Puesto que las imágenes se graban digitalmente, es posible su análisis en microcomputadora, prácticamente, pixel a pixel, de una manera sencilla con algún *software* de análisis de imágenes.

Una de las principales ventajas que se tiene en estos casos, al utilizar la técnica de visualización de alta velocidad, es que considerando que el fenómeno es sumamente rápido, el comportamiento del flujo puede ser registrado totalmente desde el inicio de la ruptura, cuando se presenta un flujo transitorio que cambia rápidamente, de tal forma que se pueden llegar a registrar un total de hasta 2 500 imágenes en 50 s, tiempo suficiente para describir el flujo en estudio. Durante los primeros dos segundos es cuando se presenta la mayor variación entre los tirantes, pudiendo ser analizada esta etapa, como ya se mencionó, a cada 2 centésimas de segundo.

Por otra parte, esta técnica de medición proporciona con mucho mayor detalle la variación de la superficie libre del agua con el paso del tiempo, después de haberse efectuado la ruptura, que la utilizada cuando se emplean celdas de presión ubicadas en el fondo del canal. Esto se debe a que en la zona localizada inmediatamente aguas abajo de la compuerta, las celdas de presión presentan un retraso en su tiempo de respuesta al registrar la variación de los tirantes, pudiendo ser este retraso de magnitud significativa. Asimismo, pueden ocurrir errores de medición para tirantes pequeños debido a la poca sensibilidad del transductor.

El equipo completo utilizado consta de un procesador de imágenes, videocámara, videgrabadora Super VHS, monitor de alta definición, interfase entre el procesador y una computadora en la que se analiza la información, y el *software* para análisis de imágenes.

## Procedimiento experimental

El procedimiento de obtención de los datos experimentales fue el siguiente: En el instante en que se efectuaba el levantamiento de la compuerta, la cámara de video comenzaba la grabación, registrando el comportamiento del flujo en una estación correspondiente. El sistema de video de alta velocidad está formado principalmente por una cámara conectada a un procesador de imágenes que las graba digitalmente y las envía a un monitor de alta definición, donde se congelan aquellas que sean de interés para observarlas cuadro por cuadro con intervalos de hasta 0.02 segundos.

De esta manera, y con la ayuda de una retícula, es posible medir paulatinamente la variación de los niveles de agua, que para este estudio se realizaron con aproximaciones de 0.1 mm. Con los tirantes obtenidos en cada una de las secciones previamente establecidas, y los intervalos de tiempo ocurridos en las variaciones de nivel, fue posible graficar el tirante (profundidad) contra el tiempo en cada una de las secciones bajo condiciones iniciales diferentes, como se muestra en las ilustraciones 10 a 13.

Después de haber efectuado las mediciones se procedió a la grabación, en una cinta de video, de cada una de las pruebas. Para este propósito se utilizó la videogradora super VHS, que se encontraba conectada al monitor de alta resolución. Una vez seleccionadas, las imágenes se enviaron a la computadora donde se procesaron por medio del subprograma EMUTILS, que forma parte del software de análisis de imágenes Paquete de Análisis de Movimiento (MAP, por sus siglas en inglés) de Kodak. Las imágenes quedaron almacenadas en el disco duro de la computadora.

Con el sistema MAP es posible realizar observaciones muy detalladas, cuadro por cuadro, en el monitor de la computadora donde se pueden digitalizar y controlar los cuadros sin necesidad de utilizar el controlador de imágenes.

Es importante mencionar que es la primera vez que se emplea en México el sistema de visualización y análisis de imágenes de alta velocidad para la obtención de datos experimentales en estudios de ruptura de presas.

## Programa experimental

De acuerdo a las características del fenómeno, así como a las experiencias de otros investigadores, se determinó que los principales parámetros a considerar durante la presencia del flujo provocado por la falla en una presa son: la geometría del canal, la rugosidad del

fondo y de las paredes laterales, la pendiente del fondo del canal y el tirante aguas arriba y aguas abajo de la compuerta.

Con estas variables se procedió a realizar un análisis dimensional, atendiendo a las recomendaciones de Echávez (1994), a fin de elaborar sobre esta base el programa experimental y lograr una presentación más general de los resultados.

Las variables involucradas en el fenómeno se pueden representar como:

$$f(V_a, H_o, r_o, x, g) = 0$$

donde:

- $V_a$  Velocidad de avance de la onda.
- $H_o$  Tirante inicial aguas arriba.
- $r_o$  Altura de rugosidad (en el caso del concreto liso su valor es de 0.0004572 m)
- $x$  Distancia medida a partir de la compuerta.
- $g$  Aceleración de la gravedad (9.81 m/s<sup>2</sup>)

Las  $m$  dimensiones fundamentales en estas variables son ( $L, T$ ), y como su número ( $n$ ) es de cinco, entonces el número de parámetros adimensionales necesarios será de  $n - m = 5 - 2 = 3$ .

Se seleccionan  $m$  variables repetitivas que contengan entre ambas las dos dimensiones fundamentales involucradas.

En este caso se seleccionaron  $g$  y  $H_o$ .

$$\Pi_1 = H_o^{x_1} g^{y_1} V_a = L^{x_1} (L T^{-2})^{y_1} L T^{-1} \quad (1)$$

$$\Pi_2 = H_o^{x_2} g^{y_2} r_o = L^{x_2} (L T^{-2})^{y_2} L \quad (2)$$

$$\Pi_3 = H_o^{x_3} g^{y_3} x = L^{x_3} (L T^{-2})^{y_3} L \quad (3)$$

La solución de las correspondientes ecuaciones lineales procede como sigue:

De la ecuación 1:

$$x_1 + y_1 + 1 = 0$$

$$-2y_1 - 1 = 0$$

de donde:

$$y_1 = -1/2$$

$$x_1 = -1/2$$

De la ecuación 2:

$$x_2 + y_2 + 1 = 0$$

$$-2 y_2 = 0$$

de donde:

$$y_2 = 0$$

$$x_2 = -1$$

De la ecuación 3:

$$x_3 + y_3 + 1 = 0$$

$$-2 y_3 = 0$$

de donde:

$$y_3 = 0$$

$$x_3 = -1$$

Los parámetros adimensionales quedarán definidos por lo tanto de la siguiente manera:

$$\Pi_1 = H_o^{-1/2} g^{-1/2} V_a = \frac{V_a}{\sqrt{H_o g}} \quad (4)$$

$$\Pi_2 = H_o^{-1} g^0 r_o = \frac{r_o}{H_o} \quad (5)$$

$$\Pi_3 = H_o^{-1} g^0 x = \frac{x}{H_o} \quad (6)$$

Por lo que la relación funcional en términos de parámetros adimensionales es:

$$f\left(\frac{V_a}{\sqrt{H_o g}}, \frac{r_o}{H_o}, \frac{x}{H_o}\right) = 0 \quad (7)$$

y en términos del parámetro adimensional dependiente:

$$\frac{V_a}{\sqrt{H_o g}} = f\left(\frac{r_o}{H_o}, \frac{x}{H_o}\right) \quad (8)$$

Para determinar esta relación funcional, en primer término se realizaron tres pruebas con tirantes diferentes aguas arriba y sin ningún tirante aguas abajo de la compuerta. Los tirantes ensayados fueron 60, 40 y 20 centímetros.

## 2. Programa experimental

Tirante inicial aguas arriba (cm)	Tirante inicial aguas abajo (cm)	Número de experimentos
20	0	1
40	0	1
60	0	1
20	10	1
40	20	1
40	10	1
60	20	1
60	10	1

Posteriormente, y con los mismos tirantes aguas arriba, se llevaron a cabo pruebas utilizando una cierta elevación aguas abajo. Se emplearon dos tirantes para presentar las condiciones de fondo mojado hacia aguas abajo. En total se llevaron a cabo ocho pruebas bajo condiciones iniciales diferentes, realizándose mediciones en cada una de las estaciones antes citadas para cada condición (cuadro 2), siendo 48 el número total de pruebas realizadas durante la presente investigación.

Empleando la condición sin ningún tirante aguas abajo, se utilizó un tiempo de grabación de 32.7 s, contados a partir del levantamiento de la compuerta, que fue suficiente para poder estudiar el comportamiento de la onda.

Cuando se requirieron condiciones con presencia de tirantes aguas abajo previamente establecidos, el tiempo de grabación se aumentó a 42 y 52 s, con el fin de tener tiempo suficiente para registrar la onda reflejada. Durante los primeros cinco segundos en cada una de las pruebas, se analizaron y digitalizaron las imágenes con intervalos de tiempo de hasta 0.02 s, ya que durante esta etapa se presentaban variaciones muy rápidas del tirante del agua. Posteriormente el comportamiento del flujo tendía a estabilizarse, empleándose intervalos mayores de tiempo para el análisis de los cuadros previamente grabados.

Durante la ejecución de los experimentos se observó que el frente de la onda se desplaza más rápidamente a lo largo del canal cuando el tirante inicial aguas arriba de la compuerta es mayor, así como cuando no se tiene ningún tirante aguas abajo.

Cuando se tienen condiciones iniciales con un tirante aguas abajo, se observó una onda reflejada con dirección contraria al flujo inicial, que se desplazó más rápidamente cuando el tirante inicial aguas arriba era mayor.

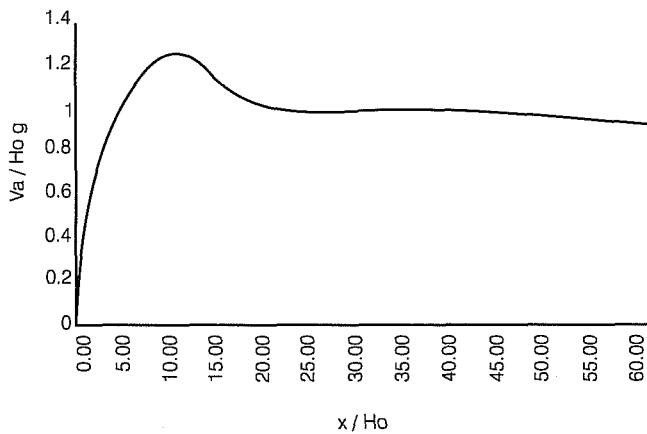
Se observó que en la zona donde se encuentra ubicada la compuerta, el flujo que se presenta inmediata-

mente después de efectuado el levantamiento brusco de la misma, está en régimen supercrítico; sin embargo, bajo ciertos tirantes iniciales aguas arriba y, conforme el frente de la onda avanza aguas abajo, el flujo en esta sección se torna subcrítico, debido a que la velocidad de avance disminuye. Este comportamiento será demostrado con detalle por medio de las gráficas adimensionales que se presentan más adelante.

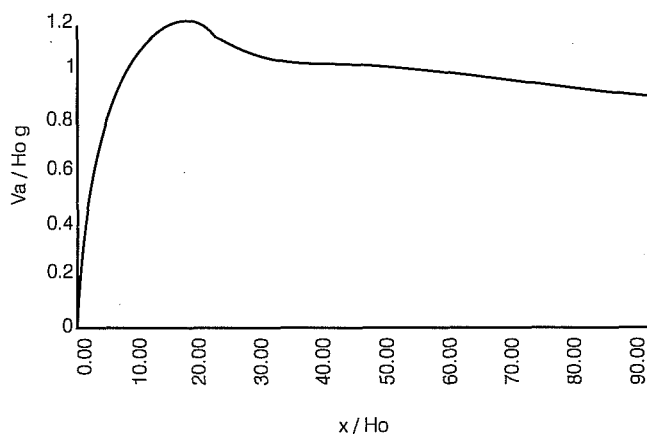
## Resultados

Se obtuvo un banco de datos experimentales que se resume en un total de 48 gráficas que registraron el comportamiento de la onda de inundación a lo largo de todo el canal y en cada una de las secciones previamente establecidas. También se crearon gráficas que muestran la velocidad de avance de la onda para cada una de las condiciones iniciales diferentes. Por

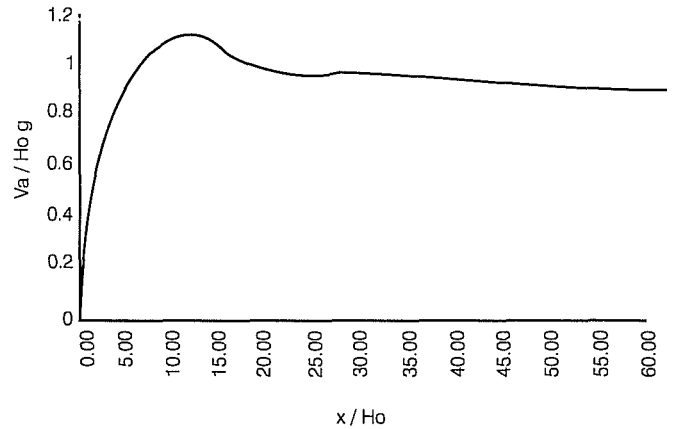
2. Gráfica adimensional. Tirante inicial aguas arriba  $H_o = 0.60$  m fondo seco aguas abajo



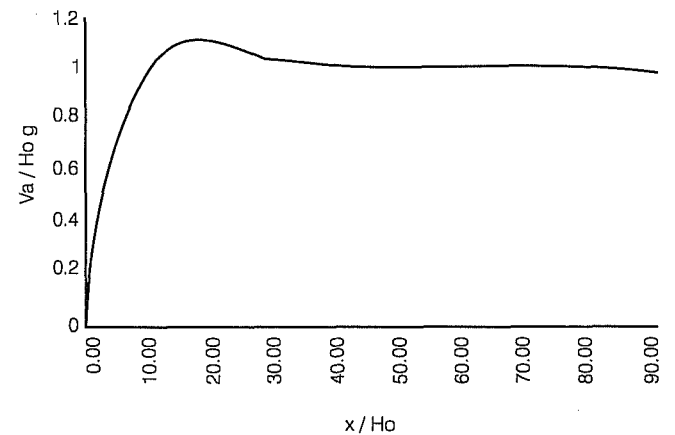
3. Gráfica adimensional. Tirante inicial aguas arriba  $H_o = 0.40$  m fondo seco aguas abajo



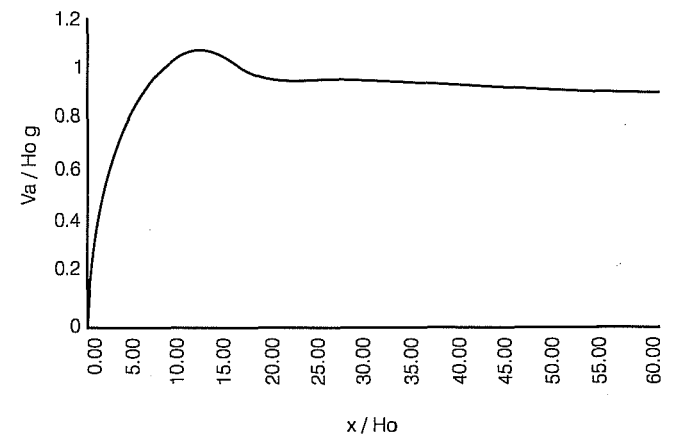
4. Gráfica adimensional. Tirante inicial aguas arriba  $H_o = 0.60$  m tirante inicial aguas abajo = 0.10 m



5. Gráfica adimensional. Tirante inicial aguas arriba  $H_o = 0.40$  m tirante inicial aguas abajo = 0.10 m

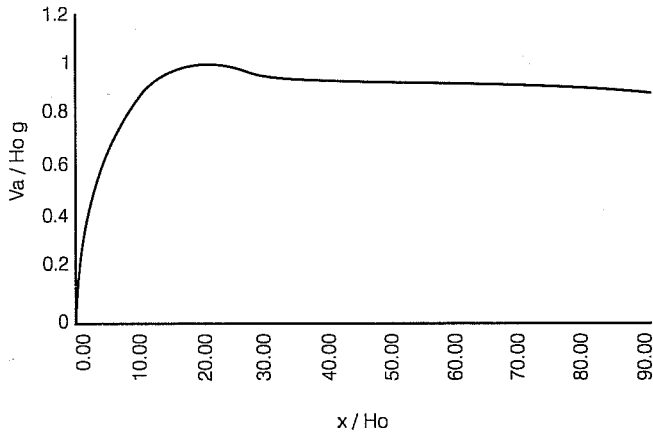


6. Gráfica adimensional. Tirante inicial aguas arriba  $H_o = 0.60$  m tirante inicial aguas abajo = 0.20 m

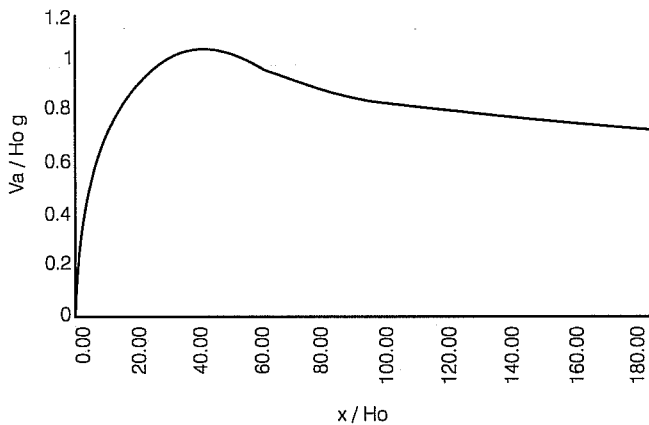




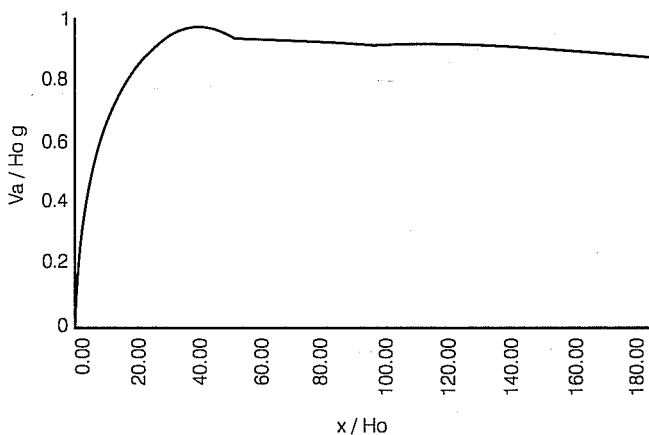
7. Gráfica adimensional. Tirante inicial aguas arriba  $H_o = 0.40$  m  
tirante inicial aguas abajo =  $0.20$  m



8. Gráfica adimensional. Tirante inicial aguas arriba  $H_o = 0.20$  m  
fondo seco aguas abajo



9. Gráfica adimensional. Tirante inicial aguas arriba  $H_o = 0.20$  m  
tirante inicial aguas abajo =  $0.10$  m



cuestión de espacio se muestran las más representativas, estando la información completa a disposición de quien lo solicite, con los autores del presente artículo.

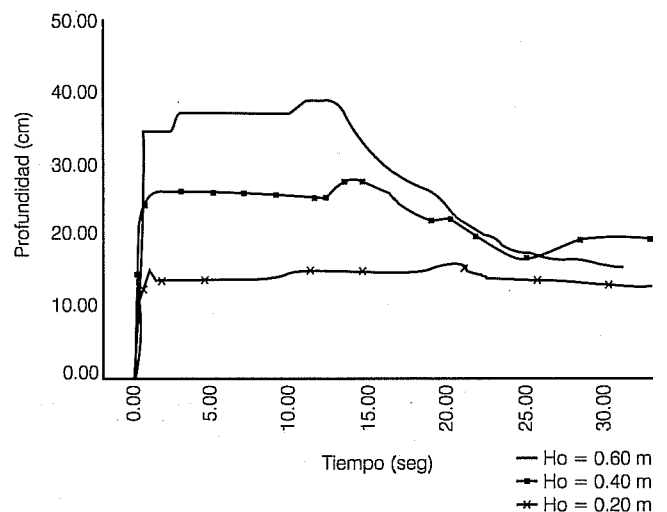
En base a los datos experimentales obtenidos, y mediante el análisis dimensional anteriormente descrito, se construyeron gráficas adimensionales por medio de las cuales es posible observar el tipo de flujo presentado inmediatamente después de efectuado el levantamiento brusco de la compuerta.

En las ilustraciones 2-9 se presentan gráficas adimensionales que describen el comportamiento de la onda de inundación bajo condiciones iniciales diferentes. En las ilustraciones 2-6 se observa que el comportamiento del flujo al inicio fue bajo un régimen supercrítico, para posteriormente llegar al régimen subcrítico.

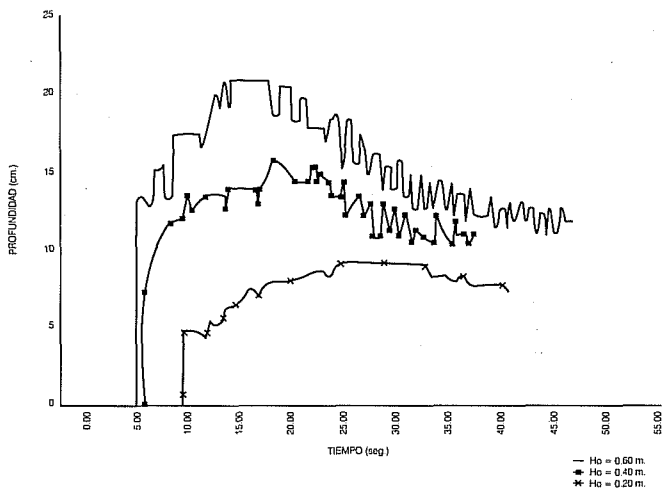
Al tener una diferencia más estrecha entre los tirantes aguas arriba y abajo de la compuerta, y efectuar el levantamiento brusco de la misma, se produce una onda de inundación en la que se observa un régimen subcrítico durante la mayor parte de la prueba (ilustraciones 7-9). De la misma manera se observa que cuando el tirante inicial aguas arriba es mayor, la velocidad de desplazamiento del frente de la onda es también mayor. Como era de esperarse, la onda avanza más rápidamente cuando el tirante inicial aguas abajo es menor.

Se presentan gráficas que muestran la variación del tirante con respecto al tiempo en la primera estación de medición, ubicada inmediatamente aguas abajo de la compuerta ( est. 0.000), y en la tercera, que se localiza a 12 metros hacia aguas abajo (ilustraciones 10- 13).

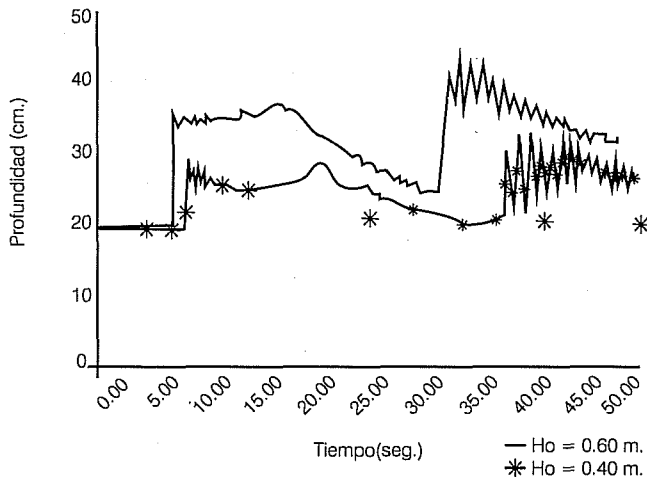
10. Estación 0.000 condiciones de fondo seco aguas abajo  
 $H_o =$  tirante inicial aguas arriba



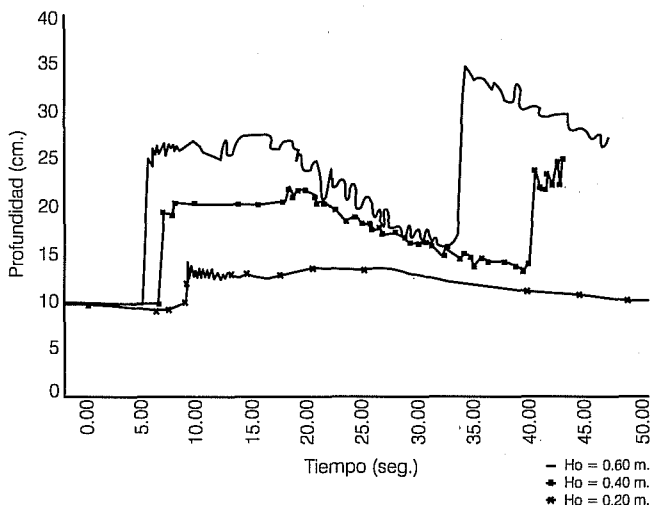
11. Estación 12.000 condiciones de fondo seco aguas abajo  
Ho = tirante inicial aguas arriba



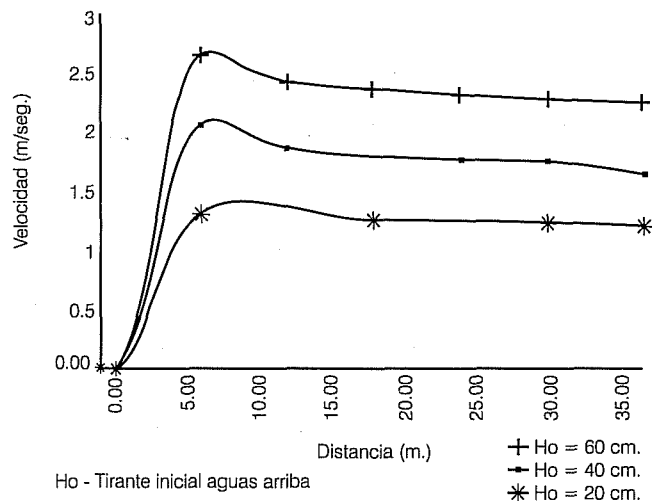
13. Estación 12.000 tirante inicial aguas abajo = 0.20 m  
Ho = tirante inicial aguas arriba



12. Estación 12.000 tirante inicial aguas abajo = 0.10 m  
Ho = tirante inicial aguas arriba



14. Gráfica de velocidades de avance de la onda  
tirante inicial aguas abajo = 10 cm



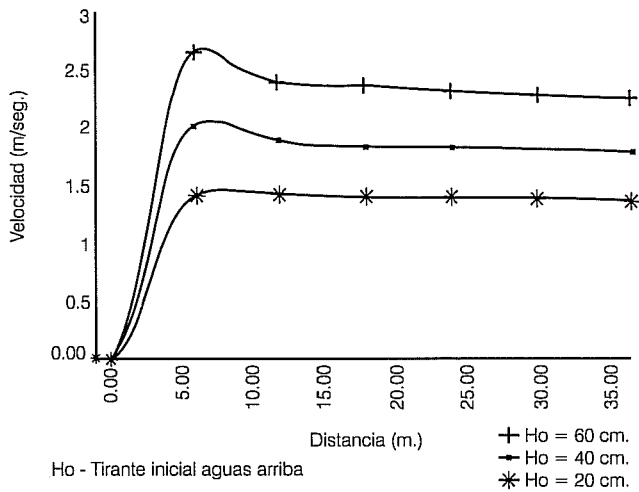
Otro de los resultados interesantes es la gráfica de velocidad de avance de la onda, en la que en el eje de las ordenadas se ubica la velocidad de la onda correspondiente a cada una de las secciones ya establecidas, y en el de las abscisas, las distancias en metros a las que se encuentran localizadas dichas secciones, medidas a partir de la compuerta (ilustraciones 14-17).

Para fines comparativos, en la ilustración 10 se presenta la variación del nivel del agua inmediatamente después de la compuerta, bajo la condición inicial con diferentes tirantes aguas arriba y ninguno aguas abajo. Se puede apreciar que durante los primeros dos segundos aproximadamente, se presenta un incremento súbito de nivel del agua de aproximadamente 60%,

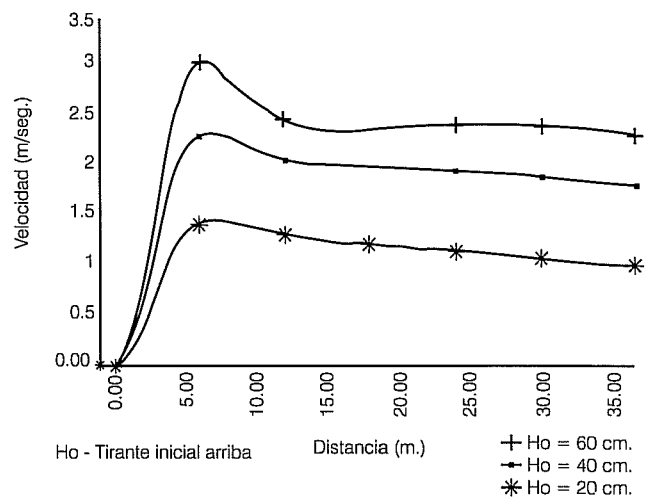
con respecto al tirante inicial aguas arriba. Posteriormente se presenta una etapa de estabilidad del flujo, inmediatamente después se alcanza el tirante máximo, y luego empieza a descender el nivel de agua.

El tirante máximo se presenta más rápidamente cuando el tirante inicial aguas arriba es mayor. Si se establece la comparación entre los estudios realizados por otros investigadores acerca del comportamiento de la onda de inundación (Bellos, 1987) y los resultados experimentales obtenidos en la presente investigación, bajo condiciones semejantes de prueba, se notará que dicha comparación resulta muy satisfactoria. En la estación localizada a 12 m. de la compuerta, y bajo condiciones iniciales de fondo seco aguas aba-

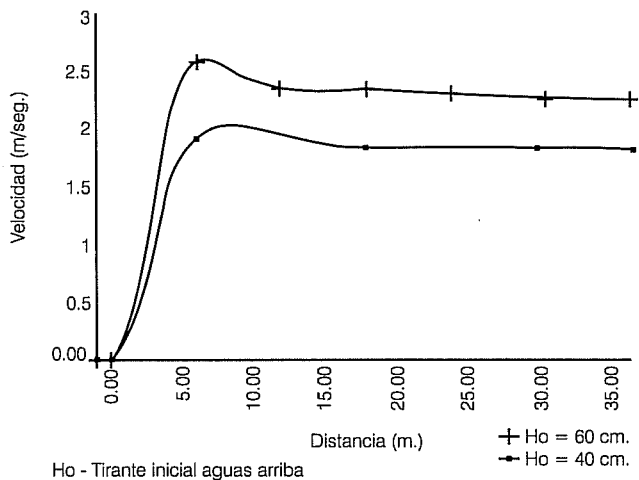
15. Gráfica de velocidades de avance de la onda tirante inicial aguas abajo = 15 cm



17. Gráfica de velocidades de avance de la onda condiciones de lecho seco aguas abajo



16. Gráfica de velocidades de avance de la onda tirante inicial aguas abajo = 20 cm



contaba aguas arriba en los tres casos (20, 40 y 60 cm.). El aumento súbito que se observa entre los 30 y 40 s se debe al efecto de la onda de regreso, reflejándose más rápidamente cuando se cuenta con un tirante inicial mayor aguas arriba. La ilustración 13 presenta los resultados en esta misma sección para un tirante de 20 cm aguas abajo.

### Conclusiones y recomendaciones

En el presente trabajo se estudió experimentalmente el comportamiento de un flujo no permanente unidimensional, con el que se simuló la onda de inundación ocasionada por la ruptura de la cortina en una presa. La importancia de este estudio radica en que es necesario contar con un banco de datos experimentales, con los que se generen gráficas que describan el comportamiento de la onda de inundación, de tal manera que puedan validarse los diferentes modelos numéricos que se han desarrollado para estudiar este fenómeno, y así contar con una herramienta de cálculo confiable.

Se utilizó una instalación experimental dentro del laboratorio de hidráulica del IMTA, y con la ayuda de instrumentación basada en equipo de captura y análisis digital de imágenes de alta velocidad, se llevó a cabo un programa experimental para el estudio de la avenida ocasionada por la ruptura súbita de una compuerta, con y sin tirante aguas abajo.

Se obtuvieron gráficas adimensionales que caracterizan el flujo analizado (unidimensional sin pendiente); que pueden ser utilizadas para la validación de modelos numéricos, que a su vez pueden generalizarse al estudio de ruptura de cortinas (2-9).

jo, el frente de la onda llegó más rápidamente cuando se contaba con un tirante inicial mayor aguas arriba (ilustración 11). Puesto que no se tiene un volumen de almacenamiento infinito, resulta que conforme se encuentra avanzando el frente de la onda, el nivel del agua va disminuyendo para las mismas condiciones iniciales.

En la ilustración 12 se presenta el comportamiento del flujo en la sección ubicada a 12 m de la compuerta, con un tirante de 10 cm aguas abajo y diferentes tirantes aguas arriba como condición inicial. La sobre-elevación que sufre el tirante en esta estación durante el primer segundo aproximadamente, al pasar la onda en el punto de observación, es semejante en proporción (25%) con respecto al tirante inicial con que

Recibido: noviembre, 1995

Aprobado: marzo, 1996

## Referencias

- Bellos, C.V.; Sakkas J.G. (1987), *1-D Dam-Break Flood Wave Propagation on Dry Bed*, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE. Vol. 113, No. 12, Dec. pp. 1510-1524.
- Dressler, R.F. (1954), Comparisons of theories and experiments for the hydraulic dam-break wave. International Association of Scientific Hydrology, Publ. Num. 38, pp 319-328.
- Echávez Aldape, G. (1994), *Curso de modelos hidráulicos, UNAM*.
- Fennema, R.J.; Chaudry M.H. (1987), *Simulation of one-dimensional Dam-Break flows*, Journal of Hydraulic Research, IAHR, vol.25, No. 1, pp.41-51.
- Jansen R.B. (1980), *Dams and Public Safety*, Water Resources Technical Publication, U.S. Dept. of the Interior, Washington, D.C.
- Martínez-Austria P., Aldama A.A., (1990) *Adaptive mesh scheme for free surface flows with moving boundaries*, *Computational Methods in Water Resources*. Vol. 1. Computational Methods in Surface Hydrology. Proceedings of symposium. Venice, Italy.
- Rajar R. (1978), *Mathematical simulation of Dam-Break Flow*, Journal of Hydraulic Division, ASCE. Vol. 104, No. HY7, July, pp-1011-1025.
- Sakkas, I. G., and Strelkoff, T., (1973) "Dam Break Flood in a Prismatic Dry Channel", Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Journal of the Hydraulics Division, Vol. 99, No. HY12, pp. 2195-2216.
- SARH, (1979) *Información de la Secretaría de Asentamientos y Recursos Hidráulicos*.
- Stoker, J. J., *Water Waves*, Interscience Publishers, New York, 1957.
- Su, S. T., and Barnes, A. H., (1970) "Geometric and Frictional Effects on Sudden Releases", proceedings of the American Society of Civil Engineers, Journal of the Hydraulics Division, Vol. 96 No. HY11, pp. 2185-2200.
- U.S. Army Corps of Engineers (1978), *Floods resulting from suddenly brached dams*, Miscellaneous paper No. 2-374. Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss.

## Abstract

Martínez-Austria, P. and C. Patiño. "Experimental Study of Flow Resulting from a Dam-Break". *Hydraulic Engineering in Mexico (in Spanish)*. Vol. XII. Num. 1, pages 65-75, January-April, 1997.

The results of an experimental study of the flood wave created by a dam break with several water levels downstream are presented. The tests were carried out in an open channel with rectangular cross section, a slope of zero, a smooth bed and a length of 60 m. To simulate the instant break in the dam, a vertical sluice gate was opened suddenly. An experimental innovation is that the data were obtained using a high speed video, with digital recording and postprocessing image analysis. The measurement technique was very satisfactory and the experimental results can be used to validate numerical dam break simulation models. The scope of the experimental results was increased by considering different water levels downstream.

**Key words:** Dam break, flow, flood wave, dam failure, vertical sluice gate, numerical model validation, hydraulics software.