

# Condiciones de Presión a la salida de Tuberías que Descargan Librementemente al Aire



Por el Ingeniero  
**ALFONSO D'SANTIAGO**  
RESUMEN

El siguiente trabajo es el resultado de una serie de experimentos realizados en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de Iowa, Estados Unidos, en los primeros meses del año 1952. Comprende un estudio breve de las condiciones de presión a la salida de tuberías que fluyen a sección completa y descargan libre-

mente al aire, esto es, a la presión atmosférica. Sus conclusiones muestran más o menos los mismos resultados obtenidos en investigaciones anteriores.

## INTRODUCCION

El gradiente hidráulico para tubos rectos de sección y material constantes, como generalmente se explica en los textos de Hidráulica, es la línea recta imaginaria (Fig. 1), que se extiende en el plano vertical que pasa por su eje, en forma tal que la distancia de cualquier punto en el eje del tubo a la línea representa la carga de presión en ese punto. Tratándose de un tubo que trabaje en forma similar al que implica la definición y que descargue libremente al aire, la línea de gradiente hidráulico tiene que cortar la sección de descarga y morir en ella ya que en tal sección la carga de presión se hace cero o atmosférica. La situación precisa del punto de corte del gradiente hidráulico con la sección de descarga para un gasto cualquiera es, en opinión general, dudosa, ubicándola algunos en la línea central del tubo y otros en algún punto entre el eje del tubo y el tope del mismo.

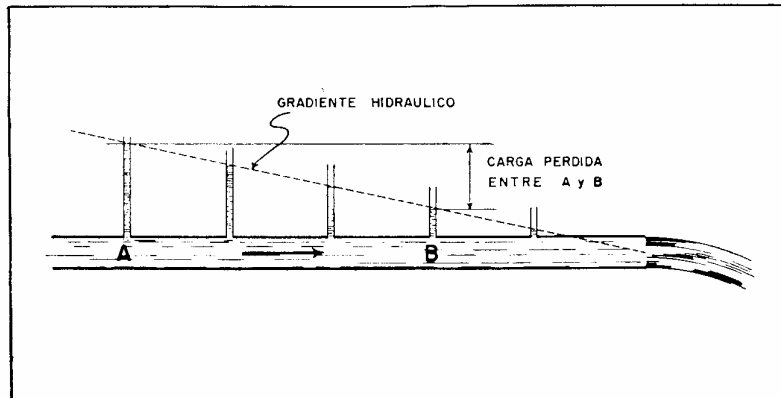


Fig. 1.—Gradiente hidráulico de una tubería horizontal.

Si se observa que la definición anterior presenta el gradiente hidráulico como una recta, es de suponer que para las condiciones anotadas, la caída de presión o pérdida de carga por unidad de longitud del tubo es uniforme hasta su extremo de descarga. Sin embargo, los experimentos hasta ahora realizados demuestran que a una corta distancia antes de la salida tiene lugar una "dispersión" de la carga de presión y, consecuentemente, el gradiente hidráulico en vez de finalizar como una línea recta, sufre una curvatura que, aunque es variable con la rata de flujo, no presenta características definidas y constantes.

Tanto la intersección del gradiente con el plano de la sección de salida, como la dispersión de presión ya mencionadas, han sido objeto de cuidadosa investigación. Así, en 1924, W. Smith, después de una serie de experimentos, concluyó que el gradiente hidráulico promedio de un tubo circular que escurre lleno y descarga al aire libre corta el plano de la sección de descarga en el centro del tubo. También demostró que la distribución de velocidades en la misma sección ocurre en forma tal que las partículas del líquido se desplazan con mayor rapidez en el fondo del tubo que en la región superior.

En 1926 H. D. Brockman realizó investigaciones en un conducto de madera de sección cuadrada de 12 centímetros de lado. Brockman comprobó la distribución de velocidades indicada por Smith dos años antes, anotó que la dispersión de presión comenzaba a 12 cm. aguas arriba de la salida y que el gradiente hidráulico promedio interceptaba la sección de descarga a una distancia del tope de más o menos  $\frac{1}{4}$  de la dimensión vertical del conducto.

Dos años más tarde los resultados de las investigaciones de J. C. Ducommun revelaron que en el caso de un tubo recto de sección constante el gradiente promedio atraviesa el plano de la sección de descarga en un punto a 55% de la dimensión vertical del tubo a partir del fondo.

Finalmente, R. N. Weldy y N. Page en 1929 y 1931, respectivamente, dedicaron su atención y cuidado a experimentos semejantes; Weldy coincidió en sus conclusiones con Ducommun, y Page expresó que el punto

de intersección del gradiente con la sección de salida es dependiente de la rata de flujo y se aproxima hacia el centro a medida que el gasto aumenta. También expresó Page que el punto donde comienza la dispersión está a 1.4 veces la dimensión vertical del tubo aguas arriba de la salida y comprobó la distribución de velocidades en las proximidades de la sección de descarga indicada por los investigadores precedentes.

Según se puede deducir de lo anterior, existe en líneas generales un acuerdo en lo que respecta a condiciones de presión y velocidad a la salida de tubos rectos de sección y rugosidad constantes; sin embargo, las conclusiones anotadas no definen de manera uniforme y precisa el fenómeno de la dispersión de presión y el punto de corte del gradiente con el plano de la sección de descarga. Con el objeto de obtener mayor información al respecto se emprendieron los experimentos a que se refiere el presente trabajo, por cierto con aparatos no muy precisos y margen de gastos relativamente estrecho.

Es conveniente advertir al lector lo siguiente: 1º) tanto las medidas como los resultados de los cálculos están dados en Sistema Inglés, ya que tal sistema fué el utilizado durante los ensayos; 2º) la presentación de los resultados numéricos tabulados ha sido omitida deliberadamente por creer que las figuras correspondientes bastan para los propósitos de este artículo.

#### DESCRIPCION DEL EQUIPO USADO

Los experimentos se efectuaron todos bajo carga constante utilizando para ello el tanque de carga constante situado en el tercer piso del laboratorio. El agua necesaria era bombeada del primer piso al tanque mencionado, de donde, a su vez, era traída por la tubería principal al lugar de los ensayos, ubicado en el segundo piso.

Las partes esenciales del equipo, cuyas dimensiones se muestran esquemáticamente en la figura 2, consistían en:

1º) Un tubo de hierro de 6" de diámetro conectado a la tubería principal y que se extendía por medio de dos codos de 90º has-

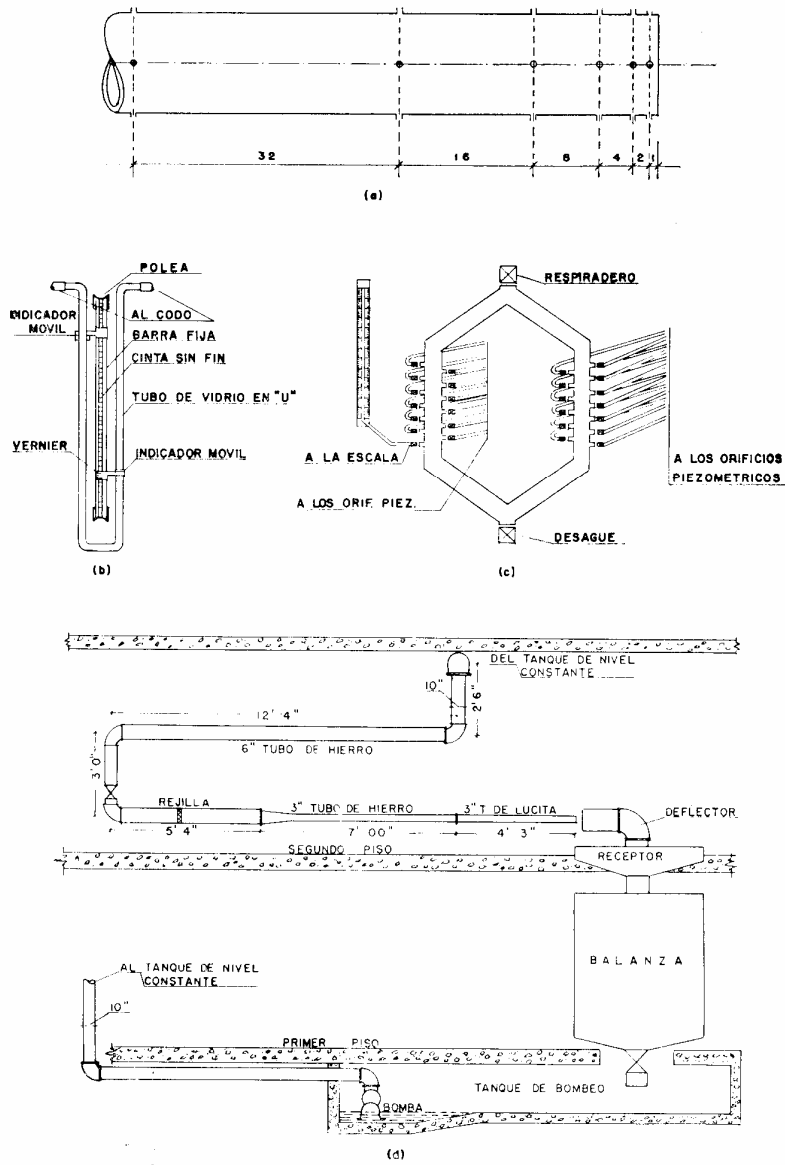


Fig. 2.—Equipo de experimentación.  
 a) Situación de los orificios piezométricos en el tubo de lucita. b) Manómetro diferencial usado en el codo. c) Tubo múltiple. d) Movimiento general del agua.

ta un punto donde gradualmente era reducido a otro de 3" de diámetro, el que, a su vez, continuaba en otro de lucita del mismo diámetro hasta la salida. Inmediatamente después del codo más bajo, el tubo se hacía horizontal hasta su extremo de descarga y contenía a una corta distancia antes de la reducción una rejilla con pasajes en forma de celdas de panal de abeja, cuyo único objeto era producir una distribución de velocidad más uniforme.

- 2º) Un deflector de lata en forma de codo situado cerca del extremo de descarga, cuya función era desviar el chorro y conducir el agua al tanque de bombeo para ser recirculada.
- 3º) Cuatro hileras de orificios piezométricos distanciados, según se muestra en la fig. 2, y dispuestos simétricamente según dos diámetros perpendiculares entre sí, en el fondo, en el tope y a ambos lados del tubo de lucita, cuya finalidad era la determinación del gradiente hidráulico.
- 4º) Un tubo múltiple de cobre conectado por un lado con todos los orificios piezométricos por medio de tubos de goma y, por el otro, con un tubo de vidrio abierto a la atmósfera y colocado verticalmente sobre una escala graduada.

A fin de determinar el gasto para cada ensayo en forma rápida y fácil se construyó el manómetro diferencial mostrado en la fig. 2b, aprovechando para ello la relación que liga el gasto y la diferencia de carga de presión entre las caras interna y externa de un codo. Tal manómetro se adaptó al codo superior. Mediante 66 mediciones gravimétricas, en una de las grandes balanzas ubicadas en el primer piso y anotación simultánea de la carga diferencial de presión indicada por el manómetro del codo, fué posible la obtención de la curva de calibración mostrada en la figura 3.

Una vez dibujada esta curva, se procedió a la determinación de la lec-

tura cero en la escala del tubo de vidrio comunicante con el tubo múltiple.

#### PROCEDIMIENTO EN LOS ENSAYOS

Cuando se creyó que todo el conjunto estaba en condiciones de funcionar satisfactoriamente se realizaron los primeros ensayos. La manera como cada uno de ellos se llevó a efecto puede resumirse en los siguientes pasos:

- 1) Operación de las bombas del primer piso.
- 2) Abertura de la válvula colocada entre los dos codos del ramal de experimentación.
- 3) Lectura de la carga diferencial de presión indicada por el manómetro instalado en uno de los codos.
- 4) Determinación del gasto.
- 5) Extracción del aire de los tubos piezométricos y del tubo múltiple.
- 6) Lectura de la carga piezométrica de cada uno de los piezómetros.

Una vez abierta la válvula a que se refiere el paso 2) y, a sabiendas de que se disponía de régimen permanente debido a la carga constante bajo la cual funcionaba el equipo, era necesario esperar unos minutos para tomar la lectura de la carga diferencial de presión del codo. Esta pequeña demora se debía al hecho de que cuando el agua comenzaba a circular, se producían oscilaciones en las dos columnas de agua del manómetro. Las lecturas tomadas en estas circunstancias, probablemente daban lugar a errores en la determinación del gasto. Se comprobó que las oscilaciones en referencia eran muy marcadas y persistentes con gastos pequeños.

Con la diferencia de presión obtenida en el codo se entraba a la curva de calibración y se leía el gasto correspondiente, mediante el cual era posible el cálculo de la velocidad media en la sección.

El paso siguiente o extracción del aire de los tubos piezométricos y del tubo múltiple fué el que más inconveniente presentó y el que mereció, a su vez, todo el cuidado y atención pertinentes, ya que bien conocido es el hecho de que el aire en tubos piezométricos es causa de

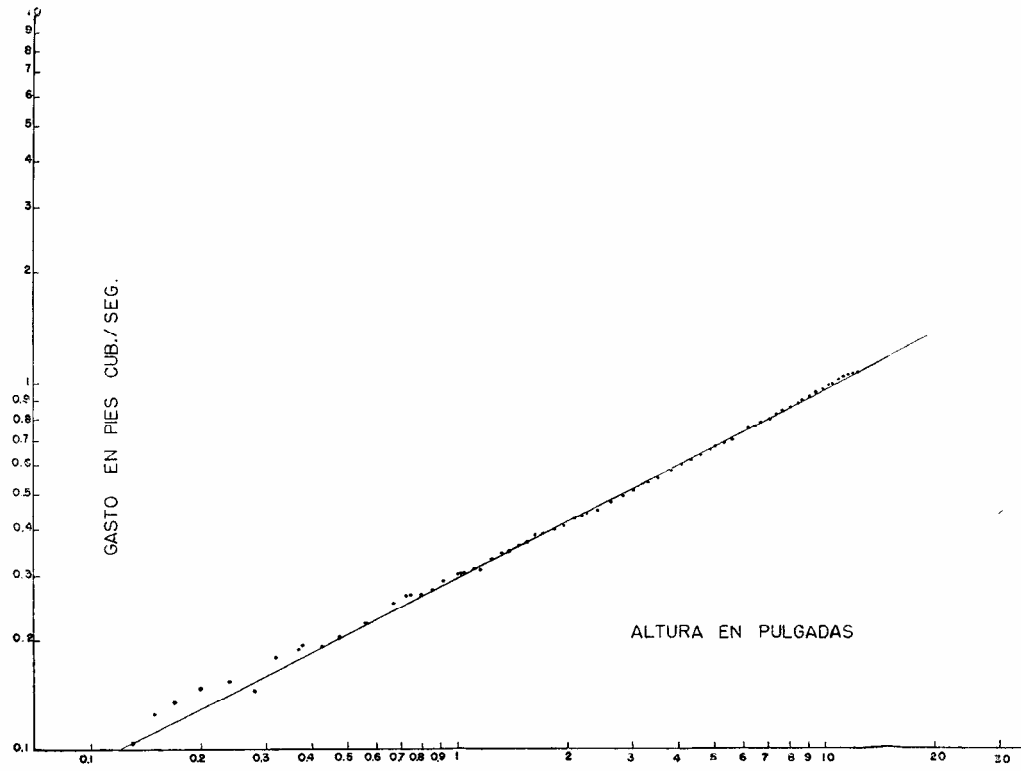


Fig. 3.- Curva de calibración de gastos.

errores considerables en las lecturas. Para subsanar esta dificultad se echaba agua en el extremo del tubo de vidrio que comunicaba el tubo múltiple con la atmósfera hasta llenarlo, ya que su altura era suficiente para producir una carga de presión mayor que la existente en el tubo de lucita, cualquiera que fuera el gasto. Para cerciorarse de la eficacia de este método de extracción del aire, se utilizó una comprobación consistente en el cierre del extremo del tubo de lucita por medio de un tapón de goma ajustado paulatinamente a medida que el caudal se iba disminuyendo mediante el cierre lento de la válvula de control. En ninguna de estas comprobaciones se permitió que el agua dejara de llenar completamente el tubo, dado el peligro de penetración de aire adicional en los tubos piezométricos. Una vez lograda la ausencia de aire en los piezómetros, la adición de agua al tubo de vidrio hasta derramarse por el respiradero del tubo múltiple hacía suponer que todo el conjunto se hallaba en las condiciones deseadas. En tales circunstancias se procedía a leer una a una en la escala del tubo de vidrio y previa abertura del grifo correspondiente la carga indicada por cada conexión piezométrica. Este proceso se repitió una y otra vez hasta agotar todo el margen posible de gastos controlado por la válvula del ramal.

Es de hacer notar que los resultados de las lecturas anotadas por el método anterior fueron más tarde descartados por la imposibilidad de obtener números de Froude enteros correspondientes a los gastos de ensayo usados, lo cual si no es indispensable, por lo menos, ofrece comodidad para la elaboración de los gráficos. Esta dificultad obligó a alterar ligeramente el procedimiento para la determinación de las ratas de descarga. En efecto, siendo el número de Froude

$$F = \frac{V}{g D} \quad (1)$$

donde  
 v es la velocidad media en la sección en pies/seg.,  
 g, la aceleración de gravedad en pies/seg.<sup>2</sup>  
 D, el diámetro del tubo en pies,  
 y como

$$Q = A V \quad (2)$$

donde

Q es el gasto en pies<sup>3</sup> seg. y  
 A, el área de la sección en pies<sup>2</sup>,  
 se tendrá que

$$F = \frac{Q}{g D} \cdot \frac{Q}{A g D} \quad (3)$$

Despejando a Q se halla que

$$Q = F A g D \quad (4)$$

La fórmula (4) permitía asignar valores enteros a F de 1, 2, 3, 4, etc., y calcular los respectivos Q con los cuales debía ensayarse. Para obtener en la tubería el gasto calculado, se entraba con él a la curva de calibración y se leía el valor correspondiente de la carga diferencial de presión en el codo. La obtención de este último valor en el manómetro se lograba mediante la manipulación cuidadosa en un sentido u otro de la válvula del ramal de experimentación.

Ya se anotó que el tubo de lucita contenía cuatro hileras de orificios piezométricos, de las cuales sólo se usaron tres durante los ensayos finales; las tres utilizadas fueron: la del fondo, una lateral y la del tope. La razón para descartar una de las hileras laterales fué el hecho demostrado por unos pocos ensayos preliminares de que cualquiera que fuera la posición de los piezómetros laterales opuestos equidistantes del extremo de descarga, la lectura de la carga de presión era la misma en cada uno de ellos.

#### DISCUSION

Una vez que el agua abandona la salida del conducto, entra a la atmósfera describiendo una trayectoria curvilínea. La descripción de tal trayectoria se debe al efecto combinado de las fuerzas de inercia y de gravedad. Teóricamente la influencia de la gravedad debería extenderse sólo hasta el plano vertical que pasa por la sección de salida, esto es, hasta los puntos donde el agua se pone en contacto con la atmósfera. Sin embargo, se comprobó que su acción afecta las condiciones de flujo

a lo largo de una pequeña distancia aguas arriba de la salida del conducto. La influencia de la gravedad en esta zona se manifiesta mediante irregularidades en la distribución de velocidades y presiones según se verá más adelante. Debido a que las fuerzas predominantes son la inercia y la gravedad, el criterio utilizado para los ensayos fué el número de Froude. Con él se elaboraron las curvas de las figuras 4, 5 y 6.

El ya citado gradiente hidráulico de un tubo que descarga libremente a la atmósfera es el definido por piezómetros situados en cualquier parte alrededor de la tubería, en forma tal que las presiones medidas por ellos se vean libres de los efectos o perturbaciones a que da lugar el flujo curvilíneo existente a la salida. En

tubos rectos de sección y material constantes y libres de obstáculos (válvulas, orificios, etc.) que puedan ocasionar pérdidas de carga adicionales, la pendiente del gradiente para un gasto dado estará controlada solamente por la resistencia ofrecida al movimiento del agua por la rugosidad del área interna del conducto. Ya que para régimen permanente la diferencia de niveles entre dos columnas piezométricas es directamente proporcional a la longitud de tubería entre ellos, con los otros factores constantes la línea que une los niveles de varias columnas piezométricas es una línea recta. Según esto y teniendo en cuenta la definición de gradiente hidráulico dada en la introducción, la pendiente de la línea recta debiera ser uniforme hasta

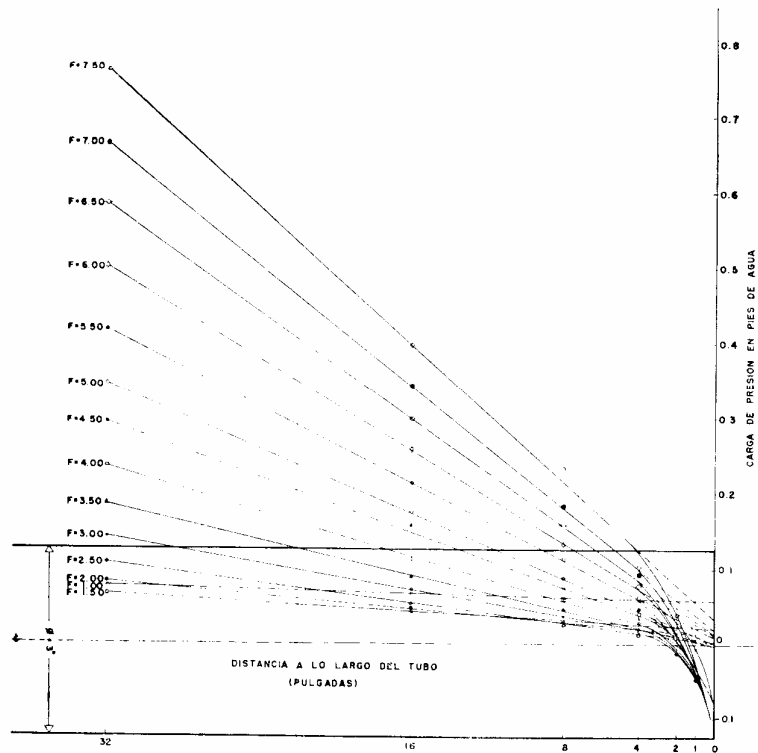


Fig. 4.—Variaciones del gradiente hidráulico con el número de Froude, indicados por los piezómetros del fondo del tubo.

la sección de salida, donde la carga de presión se hace cero o atmosférica. Sin embargo, a una cierta distancia antes de la salida, el gradiente adopta una curvatura que, a pesar de arrancar aproximadamente en la misma sección para valores diferentes del caudal, puede hacerse más o menos pronunciada, según que el gasto disminuya o aumente. Al punto donde el gradiente comienza a desviarse de su trayectoria rectilínea es a lo que algunos investigadores han llamado punto de dispersión de presiones o, simplemente, punto de dispersión.

Si recordamos los comentarios ya anotados relativos a la posición donde la dispersión comienza, observaremos que existe un ligero desacuerdo en tal sentido; más aún, para un mismo conducto y gasto constante, la posición exacta del punto de dis-

persión varía según que las lecturas piezométricas sean dadas por piezómetros perforados en el fondo o en el tope de la sección transversal del tubo. Del estudio de las figuras 4 y 5 se puede deducir que cuando la presión se mide con piezómetros perforados en el fondo, la sección donde la dispersión se hace efectiva se halla a 4 pulgadas aproximadamente de la salida, o sea, 1.33 veces el diámetro del conducto, mientras que cuando la presión se mide con piezómetros perforados a los lados, tal sección se encuentra a dos pulgadas más o menos, o sea, 0.66 veces el diámetro. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por los investigadores antes mencionados, especialmente los correspondientes a la hilera de piezómetros del fondo.

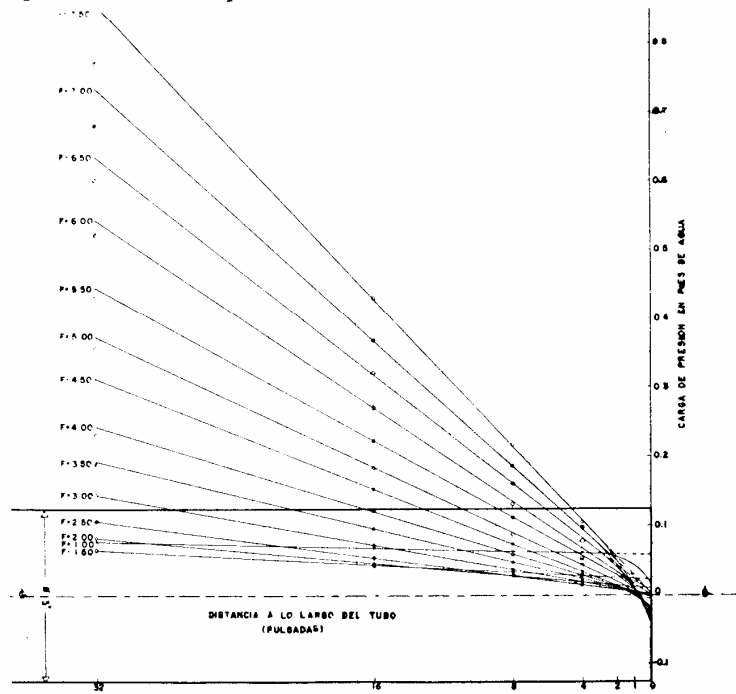


Fig. 5.—Variaciones del gradiente hidráulico con el número de Froude indicadas por los piezómetros laterales del tubo.



Es de observar que las lecturas piezométricas a distancias de 1 y 2 pulgadas de la salida no han sido indicadas individualmente por sus símbolos para los diferentes gastos por lo reducido de la escala de los gráficos. En su lugar se ha creído más conveniente dibujar los signos correspondientes a los gradientes límites superior e inferior, quedando el resto comprendido entre estos dos límites.

El hecho de que la posición de la sección de dispersión varíe con la situación de los piezómetros se explica por la distribución desuniforme de la velocidad en la zona cercana a la salida y en la salida misma, regiones donde existe mayor velocidad en los filetes adyacentes al fondo y menor en los homólogos que

se desplazan por encima del eje del tubo. Para comprobar las suposiciones anteriores se procedió a hacer varias determinaciones pitométricas, según el diámetro vertical a separación de  $\frac{1}{8}$  de pulgada una de otra, hallándose que la distribución parabólica de velocidad es tal que comienza con un mínimo en el tope, crece gradualmente hasta un máximo por debajo del eje y decrece luego hasta valores que en las proximidades del fondo son ligeramente mayores que los correspondientes a los puntos superiores simétricos de la sección. Según esto, el filete de máxima velocidad antes de la sección de descarga, que en condiciones normales de flujo coincide con el eje, se halla por debajo de éste, indicando que la distribución de presiones

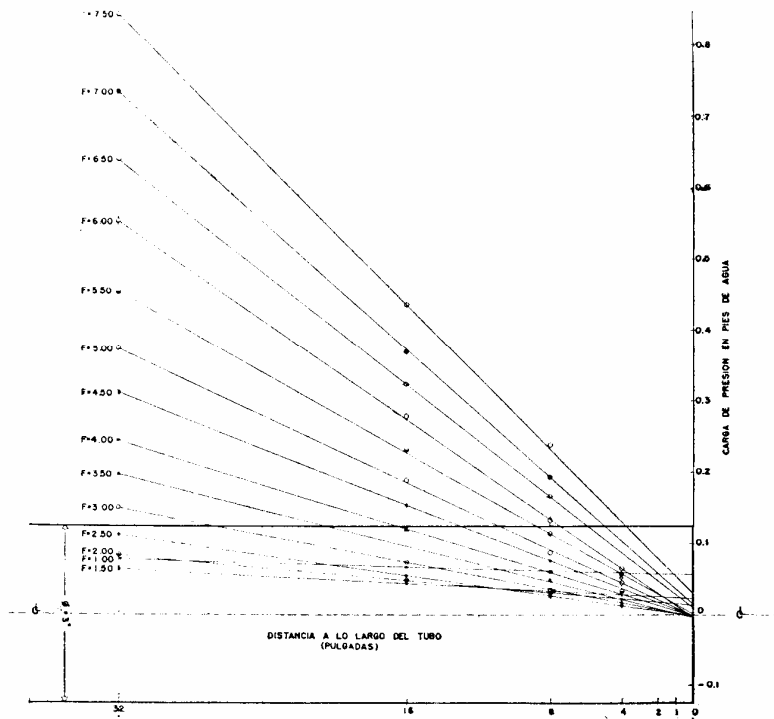


Fig. 6.—Variaciones del gradiente hidráulico con el número de Froude indicadas por los piezómetros del tope del tubo.

es influenciada por la de velocidades de acuerdo con el teorema de Bernoulli.

Debido a la incapacidad de los piezómetros del tope próximos a la salida en registrar las presiones, fué imposible llevar al gráfico la posición de la dispersión correspondiente a esa hilera piezométrica. Por lo tanto, la fig. 6 sólo contiene las líneas de gradiente dadas por aquellos orificios piezométricos retirados del extremo del conducto. Es probable que la parte superior del tubo inmediata a la salida estuviese bajo la acción de presiones negativas, no contándose en el equipo de experimentación dispositivo especial para comprobarlo.

La desviación del gradiente piezométrico de su trayectoria rectilínea a partir de la sección de dispersión da lugar a que el plano de la sección de descarga sea interceptado en puntos diversos. Para tuberías de gran longitud la posición del punto promedio de intersección es de poca importancia, pero para tubos cortos de gran diámetro, como es el caso de alcantarillas que fluyen llenas, el conocimiento exacto de tal posición facilita los medios adecuados para un cálculo preciso de su capacidad, ya que la descarga es una función del gradiente hidráulico.

Si se hace caso omiso de la dispersión de presiones y se considera que el gradiente de proyecto es el dado por la prolongación de las líneas rectas, se observa en las figuras 4, 5 y 6 que el punto de intersección promedio se halla ligeramente por encima del eje del conducto y no en el tope o en el fondo como corrientemente se acepta.

Para propósitos prácticos de diseño lo anterior indica que el punto de

corte del gradiente con el plano de descarga puede tomarse en la línea central del tubo sin incurrir con ello en errores apreciables.

Finalmente es digno de notar en las figuras 4 y 5 que a medida que el número de Froude aumenta, la curvatura de las líneas de presión disminuye, lo que comprueba que el flujo en las proximidades de la salida está sometido principalmente a las influencias de la gravedad y la inercia. El hecho mismo de la dispersión de presiones a corta distancia aguas arriba de la salida y la distribución asimétrica de velocidad a que se ha hecho referencia son manifestaciones de los efectos gravitacionales.

De lo expuesto es posible deducir las siguientes conclusiones:

a) La situación del punto donde el gradiente hidráulico intercepta el plano de la sección de salida depende de la rata de descarga y se aproxima al centro a medida que ésta aumenta.

b) Existe una dispersión de presiones a corta distancia aguas arriba del extremo de descarga, lo cual hace que la pendiente de la línea de gradiente no sea constante a lo largo de toda la longitud del tubo.

c) La distribución de velocidad en la zona próxima a la salida es asimétrica, desplazándose los filetes superiores de agua más rápidamente que los inferiores.

d) La presión del tope del tubo inmediata a la salida no se puede determinar por los piezómetros corrientes.

e) Las perturbaciones que sufre el flujo cerca de la salida se deben al efecto combinado de la inercia y la gravedad.

Mérida, noviembre de 1954.