

VARIACIONES EN LA CALIBRACIÓN DE UN AFORADOR PARSHALL

• Edmundo Pedroza-González •
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

• Jorge Leonel Ángel-Hurtado •
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México

Resumen

El uso del aforador tipo Parshall es común en industrias que requieren medir descargas de aguas residuales. Es frecuente encontrar que dichos aforadores no cumplen con alguna o varias de las recomendaciones dadas en las normas correspondientes. Con objeto de indagar sobre el tipo de ecuación de ajuste resultante de diversos incumplimientos en la norma, se calibró un aforador de tres pulgadas en un laboratorio. Se probaron incumplimientos tales como pendientes fuertes y obstáculos en el canal de llegada, así como rugosidades altas en el material del aforador y falta de verticalidad en las paredes. Las diferentes ecuaciones de ajuste se compararon con la ecuación recomendada en la norma y se encontró que un mejor cumplimiento de la norma no siempre genera la ecuación más parecida. Por ejemplo, cuando se calibró el aforador con una pendiente nula en el canal de llegada, se obtuvo una ecuación muy diferente a la ecuación de la norma; y las calibraciones con pendientes mayores, incluso fuera de rango, tuvieron valores más parecidos. También se encontró que la calibración del aforador con rugosidad de 2 mm en las paredes tiene una ecuación de ajuste más parecida, incluso más que la calibración con paredes prácticamente lisas. Por otro lado, se observó que la calibración con una pantalla colocada a 40 cm aguas arriba genera una ecuación de ajuste mejor que cuando la misma pantalla se coloca a 160 cm. Con base en los resultados, se concluye que es preferible calibrar los aforadores Parshall que cumplir con la norma.

Palabras clave: aforador Parshall, calibración.

Antecedentes

El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) presta servicios de asesoría a industrias que requieren conocer el desempeño de aforadores tipo Parshall; las razones son diversas, por ejemplo, es necesario cumplir con sistemas de calidad o en otras ocasiones se requiere apoyo en la realización de auditorías y controversias por la descarga de aguas residuales.

Ante la ausencia de normas nacionales sobre el tema, los trabajos se realizan con base en las recomendaciones de la norma D1941-91 *Standard Test Method for Open Channel Flow*

Measurement of Water with Parshall Flume de la American National Standard (norma ASTM en lo subsiguiente; ASTM, 2001); también se considera la norma ISO-9826 *Measurement of liquid flow in open channels-Parshall and SANIIRI flumes* de la International Standards Office (norma ISO en lo sucesivo; ISO, 1992).

La mayor parte de los trabajos se basan en la norma ASTM, por considerarla más práctica y sencilla; en dicha norma se recomienda que la construcción y colocación del aforador se apegue a ciertos requisitos, en aras de lograr los mejores resultados de medición; básicamente se especifican requisitos sobre la construcción del aforador, algunas condiciones del canal de

llegada y aspectos de tipo metrológico. En el número 11.3 de dicha norma se indica que si un aforador cumple con los requisitos estipulados en ella, se tendrá una incertidumbre de $\pm 5\%$; en la misma norma, en el número 9.1, se recomienda calibrar el aforador ya colocado en el sitio para mejorar dicha incertidumbre.

En la totalidad de los casos atendidos, la calibración de los aforadores no fue posible; en algunos sitios debido a la restricción de acceso al canal de llegada y en otros, por la imposibilidad de la variación del gasto en el aforador, ya que el agua que escurre por el mismo proviene de procesos industriales no susceptibles de alteración; una correcta calibración requiere de la variación del gasto en la totalidad del rango de funcionamiento del aforador. En los sitios donde es posible el acceso al canal de llegada, se comparan uno o dos valores del gasto en el aforador contra el gasto estimado con ayuda de un medidor de referencia; a este procedimiento se le llama "Verificación". Cuando no es posible comparar los gastos, se revisa el cumplimiento de los requisitos de la norma; si es el caso, se le asigna el valor del error indicado en la norma (5%); a este último procedimiento se le llama "Revisión". Cuando dicha Revisión no es satisfactoria porque no se cumplen los requisitos y tampoco se puede llevar a cabo la Verificación, es imposible emitir un juicio sobre el desempeño del aforador. Prevalece entonces la duda entre el personal de las industrias, porque no saben qué tan bien o mal trabaja su aforador. Para tener algunos elementos de respuesta ante esta circunstancia, se calibró un aforador bajo condiciones que suponen el incumplimiento de algunos requisitos de la norma; particularmente se buscó indagar sobre el tipo de ecuación de ajuste que resulta de dicha circunstancia. Los aspectos considerados fueron:

- Valores altos del número de Froude.
- Rugosidades altas en las paredes y el fondo del aforador.
- Paredes con pequeñas inclinaciones.

- Obstáculos cercanos al aforador en el canal de llegada.

Instalaciones experimentales para las pruebas

Las pruebas se realizaron en el Laboratorio de Hidráulica "Ing. David Hernández Huéramo" de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. El laboratorio está destinado preponderantemente a las prácticas de la materia de hidráulica, pero también se utiliza para realizar experimentos como el presente.

Para realizar las pruebas se utilizaron los canales de pendiente variable y de flujo permanente. El canal de pendiente variable es una estructura de metal y cristal, de sección rectangular de 30 cm de ancho y una longitud uniforme de 8 m (ver figura 1).

El gasto que circula por el canal se estima por medio de un vertedor rectangular de pared delgada tipo Rehbock colocado en uno de los canales de retorno. La lectura de la carga sobre el vertedor se realizó con un limnómetro de punta y un pozo de lectura conectado por vaso comunicante al canal de llegada (ver figuras 2 y 3).

Para estimar el gasto se utilizó la ecuación (1), que es la fórmula de Rehbock; tiene gran precisión y es de las más utilizadas por su sencillez (Sotelo, 1999):

$$Q = \frac{2b\sqrt{2g}}{3} h^{3/2} \left[0.6035 + 0.0813 \left(\frac{h + .0011}{w} \right) \right] \left[1 + \frac{.0011}{h} \right]^{3/2} \quad (1)$$

Donde Q es el gasto en m^3/s ; b , el ancho del canal en m ; g , la aceleración de la gravedad, en m/s^2 ; h , la carga sobre el vertedor en m , y w es la altura de la placa del vertedor en m .

Para dar mayor confiabilidad al vertedor se cumplieron los requisitos que propone Sotelo en el mismo libro citado; dichos requisitos



Figura 1. Canal de pendiente variable.



Figura 2. Vertedor Rehbock.



Figura 3. Limnómetro para leer la carga sobre el vertedor Rehbock.

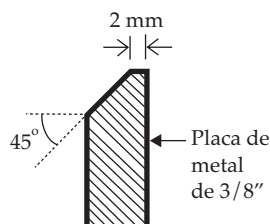


Figura 4. Detalle del bisel de la placa del vertedor.

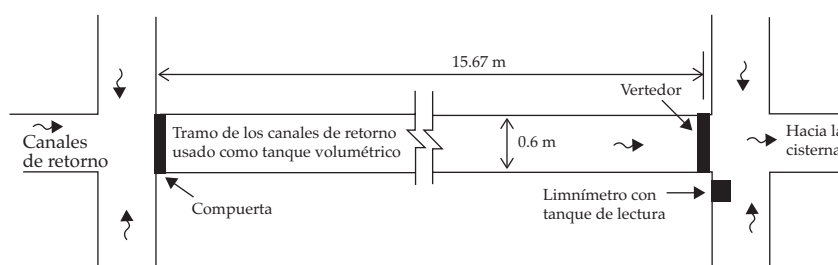


Figura 5. Características del tramo de canales de retorno usado como tanque volumétrico.

son los siguientes: a) vertedor perfectamente horizontal; b) bisel de 2 mm; c) altura del vertedor mayor a 30 cm y también mayor a dos veces la carga; d) vertedor perpendicular al eje del canal; e) canal recto y con una longitud mayor a diez veces el ancho del vertedor (el canal tiene 15.67 m y el vertedor tiene 0.6 m de ancho); f) área del canal de al menos $8bh$, donde b es el ancho del canal y h es la carga sobre el vertedor; g) el punto de lectura de la carga está a más de cuatro veces la carga máxima sobre el vertedor, y h) se tiene eficiente ventilación de la superficie inferior de la lámina vertiente.

Anteriormente, con fines didácticos, ya se había calibrado el vertedor utilizando el mismo canal como tanque volumétrico. El procedimiento fue el siguiente: primeramente se delimitó el tramo por la placa del vertedor y hacia aguas arriba por una compuerta, misma que se mantuvo cerrada para confinar el agua. Entre la compuerta y el vertedor se tiene una distancia de 15.67 m y el ancho del tramo es

de 0.6 m. La altura del vertedor es de 0.45 m. Para usar el tramo como tanque volumétrico, primeramente se “cubicó” dicho tramo, midiendo el ancho del canal en varias partes y alturas del mismo, resultando que tiene 0.6 m en todas las mediciones; de esta manera se aseguró que el canal no tuviera variaciones en su construcción, de manera que las mediciones de volumen fueran confiables. Posteriormente se colocaron marcas en la pared del canal cada cinco centímetros; dichas marcas sirvieron para medir el tiempo en que el agua tardaba en alcanzar cada marca; de esta manera, cada cierto tiempo, se tenía que había escurrido un volumen de 0.4701 m^3 .

Desde uno de los modelos cercanos al tramo usado como tanque se dejaba escurrir cierto caudal, y una vez que rebasaba un nivel mínimo (por debajo del cual el canal no se podía usar como tanque volumétrico, dado que tiene una pequeña pendiente) se comenzaba a medir el tiempo en que el nivel de agua alcanzaba

cada marca de 0.05 m. Así, dividiendo el volumen ya conocido entre el tiempo, se obtuvo el gasto. Todo esto se hacía antes de que el agua rebasara el vertedor; una vez rebasado el mismo se dejaba transcurrir otro tiempo hasta que el agua en el tanque de lecturas del limnómetro se estabilizaba; una vez logrado esto, se tomaba la lectura en dicho limnómetro. Esto se repitió para diferentes caudales y se obtuvieron pares de datos de carga y gasto (la carga es la del limnómetro y el gasto es el estimado con la medición del tiempo en que se llenaba cada marca de 5 cm). En la figura 6 se observan los puntos experimentales y la curva de gastos calculada con la ecuación (1); puede apreciarse que se tiene una coincidencia aceptable, por lo que se considera confiable el vertedor rectangular de pared delgada como medidor de referencia. Como dato adicional, se tiene que el limnómetro cuenta con un mecanismo tipo “vernier”, lo que le otorga una precisión de 0.1 mm, lo que redunda en que el gasto calculado con la ecuación (1) tiene una precisión de 0.0445 l/s. Cabe mencionar,

asimismo, que el flujo de aproximación al vertedor siempre fue en régimen subcrítico, lo que generaba una corriente suave, y paralela al eje longitudinal del canal.

El canal de flujo permanente está construido en mampostería, recubierto por un acabado liso de cemento y pintura acrílica en secciones de geometría variable. En la zona donde se colocó el aforador Parshall, la sección es rectangular de 41 cm de ancho y pendiente uniforme de 0.0001 (ver figura 7).

Para el control de las pruebas realizadas en el canal de flujo permanente se utilizó como medidor de referencia un vertedor triangular de pared delgada, mismo que también se calibró volumétricamente. Esta calibración se realizó colocando un tanque aguas abajo del vertedor; dicho tanque se “cubicó” utilizando una probeta de dos litros, misma que se llenaba de agua y se vaciaba en el tanque, marcando la altura que alcanzaba el nivel para cada cinco probetas. Inmediatamente después del vertedor se colocó un canal portátil, mismo que se usaba para evitar el llenado del tanque

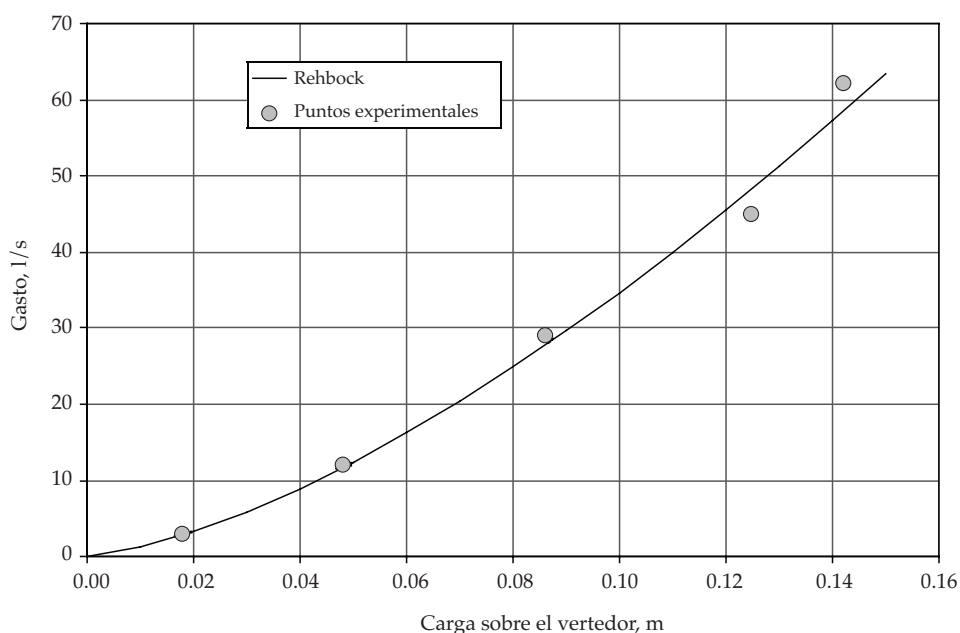


Figura 6. Comparación de los puntos experimentales con la ecuación de Rehbock.



Figura 7. Parte final del canal de flujo permanente.

mientras el gasto variaba; una vez que el gasto se estabilizaba, se retiraba súbitamente el canal portátil y se contabilizaba el tiempo de llenado del tanque; de esta manera se obtuvo el gasto. La ecuación resultante de esta calibración fue la ecuación (2):

$$Q = 1.2077h^{2.3192} \quad (2)$$

Donde Q es el gasto en m^3/s y h es la carga sobre el vertedor, en m. Este vertedor se localiza en la parte final del canal de flujo permanente (ver figura 8).

Aforador Parshall utilizado en las pruebas

Se propuso un aforador Parshall de tres pulgadas de ancho en la garganta; para este tamaño de aforador, en la norma ASTM se



Figura 8. Vertedor triangular.

indica un rango de funcionamiento desde 0.85 hasta 53.80 l/s. El aforador se construyó en acrílico con las dimensiones sugeridas por la norma ASTM (figuras 9 y 10). En la misma norma se indica la ecuación que debe usarse para este ancho de garganta (ecuación (3)):

$$Q = 1.141Ha^{1.55} \quad (3)$$

Donde Q es el gasto, en l/s, y H_a es la carga sobre la cresta del aforador, en cm. La carga H_a se midió con un limnómetro de punta colocado encima del aforador, justo en el sitio que se indica en el ISO, sección 8.2.1 inciso "d", y en el ASTM, sección 7.2.2, es decir a 2/3 de la longitud de la pared convergente, medida desde la garganta hacia la parte inicial del aforador.

Prueba número 1. Calibración para valores altos del número de Froude

En los trabajos de revisión de aforadores en las industrias no se detectaron números de Froude altos; sin embargo, se consideró posible la presencia de dichos valores en aquellos sitios sin acceso al canal de llegada. Fue por ello que se intentó calibrar el aforador para un rango de números de Froude mayores a los máximos permitidos en la norma ISO. En esta norma se

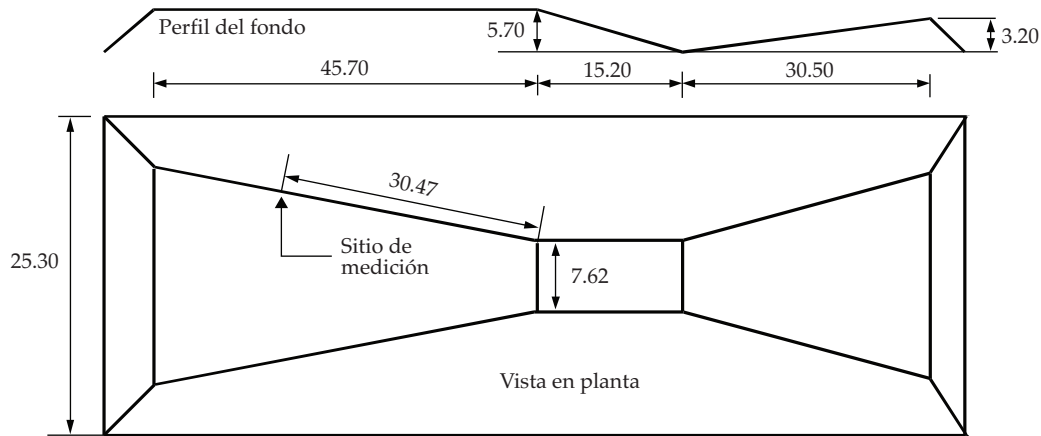


Figura 9. Dimensiones del aforador y sitio de medición del nivel del agua.



Figura 10. Vista del aforador de prueba.

propone calcular el número de Froude con la ecuación (4):

$$Fr = \frac{Q_{\text{máx}}}{A\sqrt{gh_{\text{máx}}}} \quad (4)$$

Donde Fr es el número de Froude, adimensional; $Q_{\text{máx}}$ es el gasto máximo que puede circular por el aforador en m^3/s ; A es el área hidráulica en m^2 ; g es la aceleración de la gravedad, en m/s^2 , y $h_{\text{máx}}$ es el tirante máximo correspondiente a $Q_{\text{máx}}$. La norma no indica en dónde debe medirse el tirante $h_{\text{máx}}$, por lo que decidió medirse justo antes de la entrada del aforador.

En el canal de pendiente variable se pueden lograr fácilmente diferentes valores del número de Froude, incluyendo valores mayores a la unidad; por ejemplo, durante las prácticas de la clase de hidráulica se logran valores de hasta 2.345. Sin embargo, después de colocar el aforador fue imposible lograr dichos valores altos; el aforador, como podría haberse supuesto, representa un estrechamiento de la sección que “remansa” el agua; por lo tanto, el tirante medido después de la colocación

del aforador es sustancialmente mayor y, consecuentemente, el número de Froude es mucho menor. En las gráficas de la figura 11 se presentan los resultados de esta prueba y se aprecia claramente que aún para pendientes altas no se logran números de Froude mayores a 0.18.

Acorde con el objetivo de la investigación, se determinaron ecuaciones de calibración, pero se cambió un poco el enfoque: al no lograr valores altos del número de Froude, se buscaron diferentes calibraciones para cada valor de la pendiente. Las ecuaciones resultantes se presentan en el cuadro 1. En primer lugar, es notorio que para cada pendiente se tiene una diferente ecuación, como se aprecia en los valores del coeficiente y del exponente.

Con objeto de presentar de manera gráfica las diferencias entre las ecuaciones, se calculó la diferencia porcentual entre el gasto resultante de la ecuación ASTM y los gastos calculados

con las ecuaciones de calibración. La diferencia se calculó con la ecuación (5), donde Q_C es el gasto de calibración en l/s y Q_A es el gasto de la ecuación ASTM, también en l/s. De esta manera, si el resultado es positivo significa que la ecuación calibrada sobrestima el gasto y viceversa:

$$D = \frac{(Q_C - Q_A)}{Q_A} \times 100 \quad (5)$$

Los resultados se muestran en la figura 12. En dicha figura, dos líneas llaman notoriamente la atención: las correspondientes a las pendientes mayores ($S_4 = 0.0154$ y $S_5 = 0.0419$), porque se acercan más a la ecuación ASTM; las otras pendientes en el canal afectan la ecuación de calibración de tal manera que se tienen grandes diferencias, por ejemplo, el caso de la pendiente cero. Estos resultados invitan a suponer que si la ecuación ASTM es

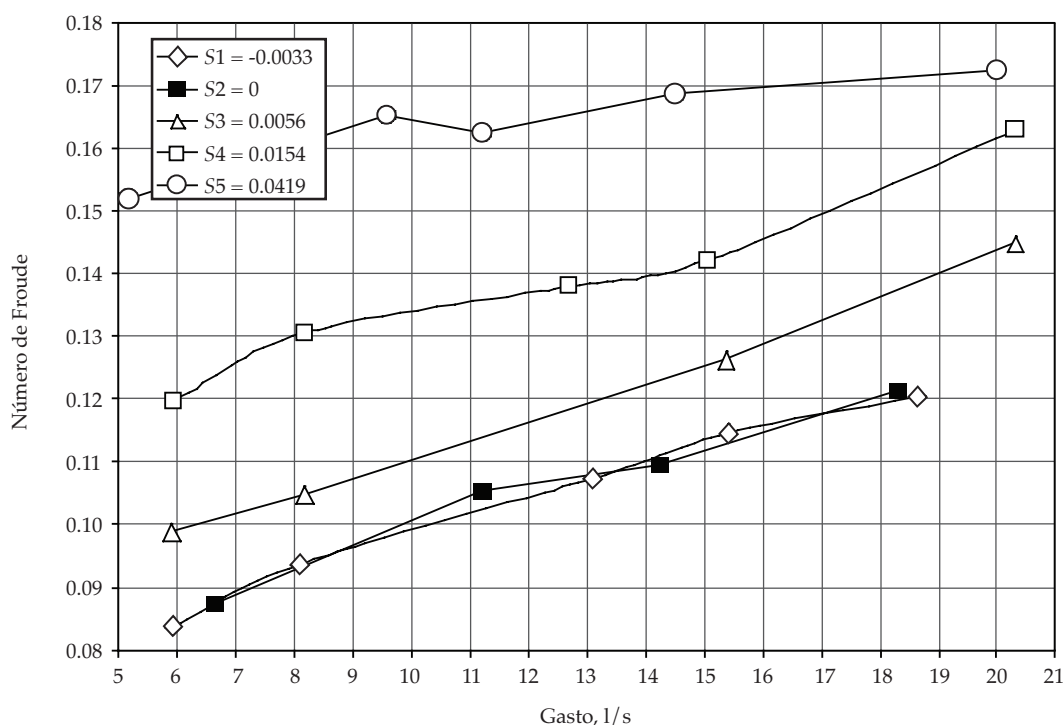


Figura 11. Valores del número de Froude para diferentes pendientes y gastos.

Cuadro 1. Ecuaciones de calibración para diferentes pendientes.

Pendiente	Ecuación	Coefficiente de correlación, R^2
$S1 = -0.0033$	$Q = 0.1106H_a^{1.6145}$	0.9999
$S2 = 0$	$Q = 0.0464H_a^{1.9151}$	0.9903
$S3 = 0.0056$	$Q = 0.1029H_a^{1.6593}$	0.993
$S4 = 0.0154$	$Q = 0.1241H_a^{1.6109}$	0.9913
$S5 = 0.0419$	$Q = 0.1472H_a^{1.5447}$	0.9986

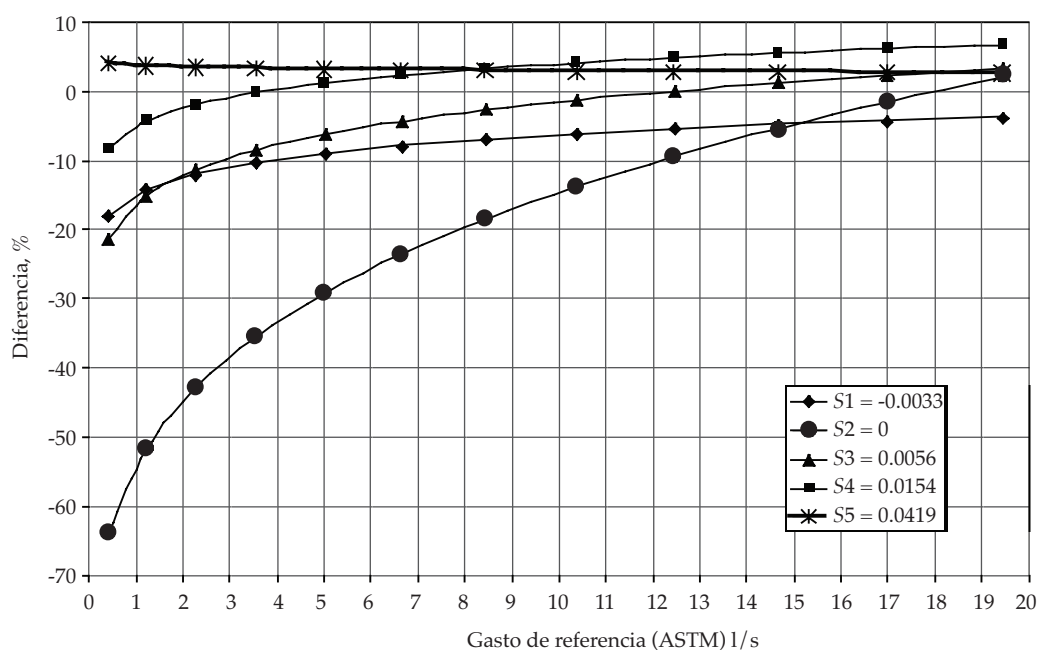


Figura 12. Diferencia entre la ecuación de calibración y la ecuación ASTM para diferentes pendientes.

la más adecuada, las pendientes fuertes afectan menos que las pendientes suaves.

Con los resultados encontrados se demuestra que el número de Froude no es una variable importante, ya que al colocar el aforador, la corriente tenderá al flujo subcrítico de manera inevitable; por el contrario, el valor de la pendiente en el canal sí tiene un efecto importante sobre la ecuación de calibración. Ninguna de las normas consultadas indica restricciones sobre la pendiente, por lo que se asume que el aforador puede colocarse con cualquier pendiente y, como se aprecia en

los resultados, cada pendiente generará una diferente ecuación de calibración.

Prueba número 2. Calibración para diferentes rugosidades en el interior del aforador

Para realizar estas pruebas se cubrieron las paredes y el fondo del aforador con dos diferentes tamaños de arena. En las normas se recomienda construir el aforador con un acabado de cemento pulido y el tamaño máximo de la rugosidad no debe ser mayor de 0.4

mm; como tal tamaño es poco práctico, se usó arbitrariamente arena de aproximadamente 2 y 5 mm (figuras 13 y 14); también se consideró el caso del aforador sin recubrimiento como una tercera opción prácticamente lisa.

Al graficar las diferencias porcentuales en la figura 15, se aprecia que la rugosidad de 2 mm no parece afectar demasiado y el peor caso resulta, efectivamente, la rugosidad de 5 mm. Llama la atención que el acabado acrílico no parece ser la mejor opción y que la mejor correlación no se obtiene con este material ($R^2 = 0.9993$, cuadro 2). En la norma se recomienda evitar protuberancias mayores 0.4 mm, pero los resultados de la prueba realizada con rugosidad de 2 mm, valor sustancialmente mayor al máximo recomendado, indican que no es tan importante mantener la rugosidad baja en el aforador.



Figura 14. Aforador recubierto con arena de 5 mm.

Prueba número 3. Paredes inclinadas en el interior aforador

En las normas también se indica que las paredes del aforador deben estar verticales. Con objeto de indagar el tipo de ecuación de ajuste que resulta cuando dichas paredes están inclinadas, se realizaron dos pruebas más. En la primera prueba se inclinaron las paredes hacia el interior del aforador; en la segunda, por el contrario, se abrieron para inclinarlas "hacia fuera". En el caso de la inclinación hacia adentro, las paredes de la garganta del aforador se juntaron completamente en su parte superior, de manera que no fue posible inclinarlas más; el ángulo máximo logrado en esta circunstancia fue de 88 grados respecto de la horizontal. Por el contrario, el caso de la inclinación hacia fuera no tiene obviamente restricciones; sin embargo, se inclinaron las paredes solamente 85 grados, considerando que dicha inclinación no podría ser constructivamente mayor. En este caso, resulta interesante presentar los resultados en la gráfica de la figura 16.

De manera peculiar, se observa que la línea de la ecuación de ajuste para paredes cerradas a 88 grados y la línea de la ecuación recomendada por la norma ASTM, prácticamente se su-



Figura 13. Aforador recubierto con arena de 2 mm.

Cuadro 2. Ecuaciones de calibración para diferentes rugosidades.

Rugosidad	Ecuación	Coefficiente de correlación R^2
2 mm	$Q = 0.1763H_a^{1.4714}$	0.9997
5 mm	$Q = 0.3895H_a^{1.215}$	0.9906
Acrílico	$Q = 0.1816H_a^{1.498}$	0.9993

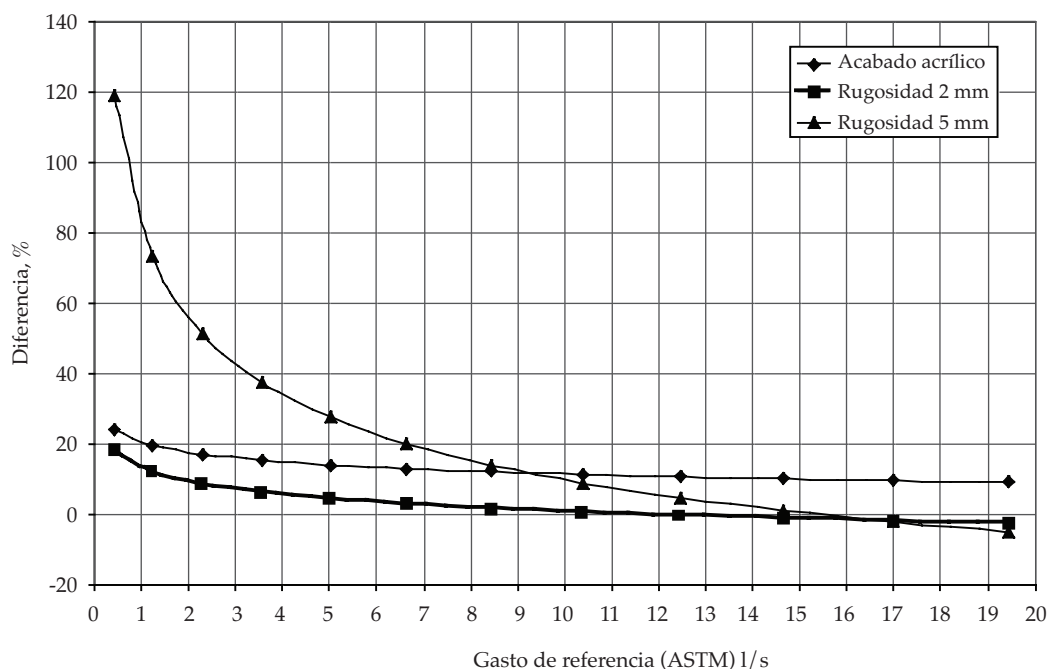


Figura 15. Diferencia respecto a la ecuación ASTM para diferentes rugosidades.

perponen. La ecuación resultante para el caso de las paredes abiertas a 85 grados tiene un comportamiento diferente, alejándose de la ecuación ASTM (cuadro 3). Esta diferencia se muestra en la figura 17, donde se observa que dicha diferencia es sustancialmente importante, y se desarrolla de manera consistente entre los 25 y 28%, aproximadamente.

Prueba número 4. Calibración con obstáculos aguas arriba del aforador

Para conocer el comportamiento del aforador cuando se tienen obstáculos aguas arriba

del mismo se colocaron dos elementos que perturbarían de manera diferente el flujo. El primer elemento es una pantalla formada por una placa de acrílico montada en un marco metálico y colocada al centro del canal. La pantalla cubre gran parte de la sección y permite el paso del agua únicamente por los costados (ver figuras 18 y 19). Según la recomendación de la norma ASTM, el tramo recto y sin obstáculos antes del aforador debe ser de veinte veces el ancho de la garganta, para este caso 152.4 cm. Las diferentes posiciones de la pantalla fueron 40, 80 y 160 cm aguas arriba de la entrada del aforador; ello significa que

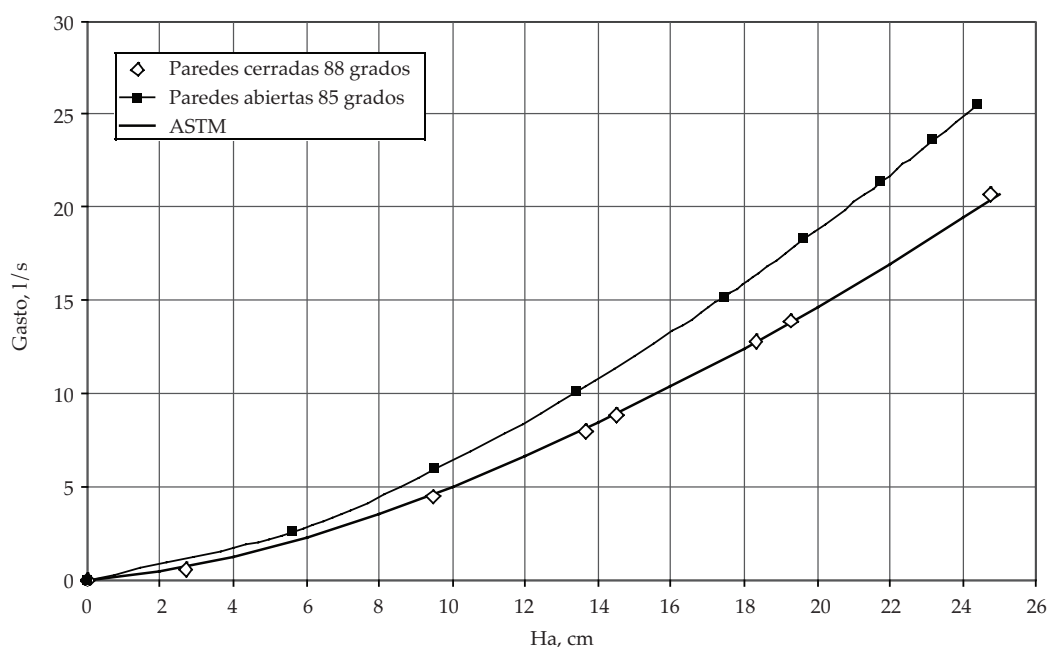


Figura 16. Gráfica de calibración con paredes inclinadas.

Cuadro 3. Ecuaciones de calibración para diferente inclinación en las paredes.

Inclinación	Ecuación	Coefficiente de correlación R^2
88° hacia adentro	$Q = 0.1257Ha^{1.5916}$	0.9997
85° hacia fuera	$Q = 0.1799Ha^{1.5524}$	0.9993

dos posiciones quedaron dentro del tramo en el que no debieran existir obstáculos (40 y 80 cm) y la tercera posición está prácticamente fuera del mismo tramo (160 cm).

Asimismo, se utilizó una especie de “desviador” consistente en varias barras verticales inclinadas respecto del eje longitudinal del canal, con una cierta separación para desviar el flujo que escurre entre ellas (ver figuras 18 y 19). El desviador se colocó en las mismas posiciones que la pantalla (40, 80 y 160 cm).

Las ecuaciones de calibración para las diferentes ubicaciones de la pantalla se pueden ver en el cuadro 4; las diferencias porcentuales se grafican en la figura 20. Especial atención merece el hecho evidente de la menor influen-

cia que tiene la pantalla cuando está cerca del aforador, contrariamente a lo que se esperaría. También es de observarse que la mejor correlación corresponde a la segunda posición de la pantalla (80 cm), con un coeficiente de correlación R^2 de 0.9934.

En el caso del desviador, se encontraron las ecuaciones de calibración del cuadro 5; debe observarse que el valor de los coeficientes de correlación son comparativamente menores a los encontrados en las otras pruebas.

La comparación porcentual presentada en la figura 20 muestra que todas las líneas para el caso del desviador tienen un mismo patrón y se desarrollan en una zona común de la gráfica; además, el desviador colocado más

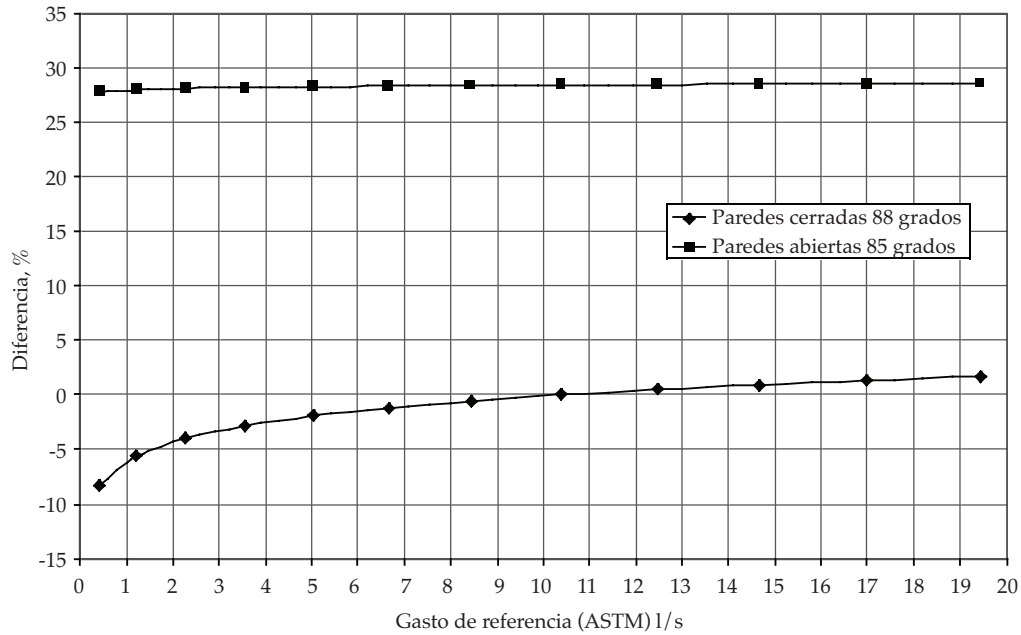


Figura 17. Diferencia respecto a la ecuación ASTM para diferentes inclinaciones.

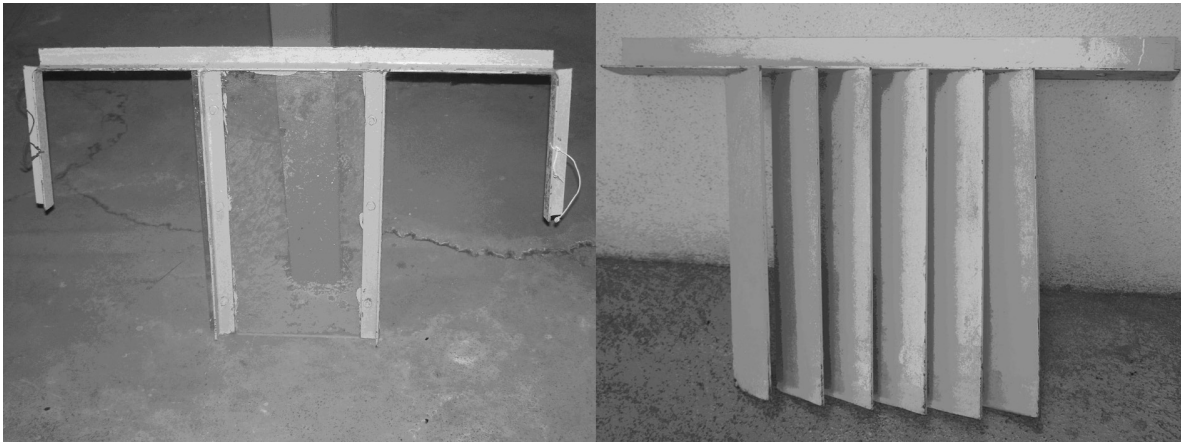


Figura 18. Pantalla y desviador utilizados en las pruebas.

cerca es más perjudicial, y cuando se coloca más lejos afecta menos, lo que es de esperar; por el contrario, las líneas correspondientes a la pantalla son muy diferentes, cambian de signo entre ellas; el caso de la pantalla a 160 cm del aforador es el que presenta mayor diferencia entre su calibración y la ecuación ASTM, aun

cuando ya está fuera del tramo recto mínimo recomendado.

En las pruebas de la pantalla y el desviador se observa que el aforador presenta cierto comportamiento de “regulación” del flujo. Primeramente se inyectó un trazador (azul de metileno) cuando se colocaron la pantalla

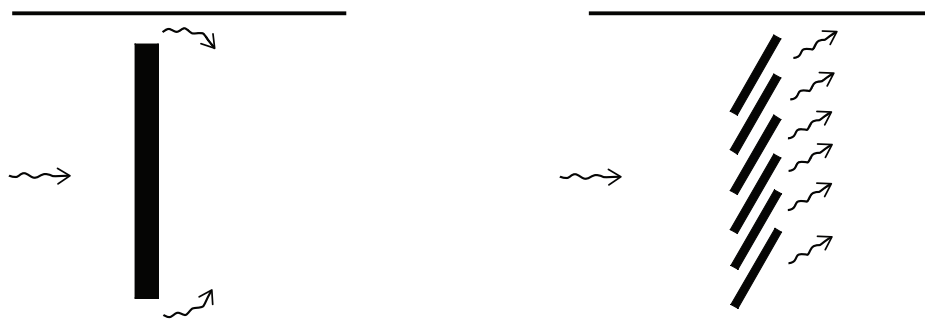


Figura 19. Vista en planta de la perturbación en el flujo por efecto de la pantalla y el desviador.

Cuadro 4. Ecuaciones de calibración para diferentes posiciones de la pantalla.

Distancia aguas arriba del aforador	Ecuación	Coefficiente de correlación R^2
40 cm	$Q = 0.1273H_a^{1.593}$	0.9769
80 cm	$Q = 0.1056H_a^{1.6062}$	0.9934
160 cm	$Q = 0.2339H_a^{1.498}$	0.9752

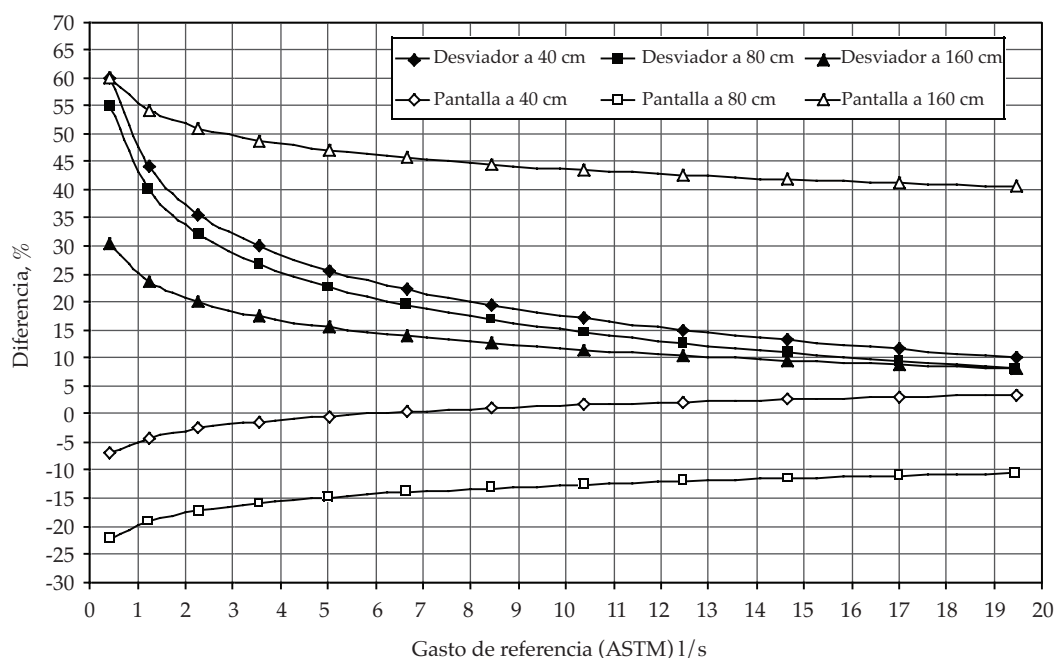


Figura 20. Diferencia respecto a la ecuación ASTM cuando se tienen obstáculos aguas arriba del aforador.

Cuadro 5. Ecuaciones de calibración para diferentes posiciones del desviador.

Distancia aguas arriba del aforador	Ecuación	Coefficiente de correlación R^2
40 cm	$Q = 0.2504H_a^{1.4}$	0.906
80 cm	$Q = 0.2417H_a^{1.405}$	0.9465
160 cm	$Q = 0.1936H_a^{1.475}$	0.9565

y el desviador (ver figuras 21 y 22), y se observó claramente en ambos casos que el flujo sale muy desviado, pero rápidamente se alinea y cuando entra a la garganta el flujo ya presenta trayectorias rectas. Se advierte que el trazador se inyectó únicamente en uno de los extremos de la pantalla y desviador, respectivamente.

En segundo lugar se colocó la placa extremadamente cerca de la entrada del aforador (ver figura 23). Se observa que el agua escurre únicamente por las aberturas formadas por las paredes del canal y la pantalla. Aún en estas condiciones extraordinarias, el nivel del agua se mantiene aproximadamente en la misma altura que tiene sin la pantalla.

Los diferentes resultados de la pantalla y el desviador suponen que otro tipo de obstáculo tendrá su propia ecuación de calibración, independientemente de la distancia a la que se encuentre del aforador, aún incluso si dicho

obstáculo está fuera del tramo mínimo de longitud recta, pero lo suficientemente cercano como para causar algún efecto.



Figura 22. Vista en planta del desviador antes del aforador.



Figura 21. Vista en planta de la pantalla antes del aforador.



Figura 23. Placa de acrílico colocada en la entrada del aforador.

Conclusiones

La recomendación dada en la norma ASTM respecto a la calibración de los aforadores Parshall después de que éstos hayan sido colocados en el sitio parece muy atinada, ya que los resultados encontrados indican que para cada diferente situación se tendrá una diferente ecuación de ajuste. Por otro lado, en la misma norma se indica que un medidor que cumpla con los requisitos establecidos tendrá una incertidumbre de $\pm 5\%$; esto no parece muy acertado, ya que se ha demostrado que en algunos de los casos en los que el aforador cumple con lo indicado en la norma, la ecuación de calibración tiene grandes diferencias respecto a la ecuación recomendada por la norma. Por el contrario, en algunos casos de evidente incumplimiento de la norma, la ecuación de calibración se parece mucho a la ecuación de la norma, tal es el caso de las calibraciones para pendientes fuertes, ya que dichas pendientes fuertes generan ecuaciones de calibración que son las más parecidas a la ecuación ASTM. Otro caso es la calibración del aforador con rugosidad de 2 mm, que resultó más parecida a la de la norma que la ecuación de calibración con paredes de acrílico (contrariamente a lo esperado). Similar circunstancia se encontró en el caso de la pantalla como obstáculo aguas arriba del aforador; los mejores resultados se encontraron cuando la pantalla estaba cerca del aforador y no cuando ésta estaba lejos, aun fuera del tramo recto mínimo recomendado.

Con base en lo anterior, la conclusión general más importante es que la calibración de los aforadores en sitio es más recomendable que el cumplimiento de los requisitos de la norma.

Se hace la advertencia de que se calibró un aforador de tres pulgadas. No deberá esperarse necesariamente la misma situación para aforadores de otros tamaños. La investigación experimental es necesaria para otras dimensiones, con objeto de estar en condiciones de conocer el efecto en la calibración de diferentes incumplimientos a la norma.

Por otro lado, se recomienda ampliamente que la calibración de aforadores se vea acompañada del correspondiente y adecuado análisis de incertidumbre, puesto que en algunas de las pruebas se encontraron bajos coeficientes de correlación encontrados en los ajustes, lo que significa una dispersión mayor de los puntos experimentales.

Como una observación adicional, se hace hincapié en el hecho de las grandes diferencias que se aprecian en todas las gráficas cuando se tienen gastos bajos. En la literatura relacionada (Pedroza, 2001) se recomienda no medir gastos en un aforador Parshall de tres pulgadas de garganta, cuando se tienen cargas menores de 3 cm. Dicha carga corresponde a un gasto de entre 0.6 y 1.5 l/s —dicha variación es función de las diferentes ecuaciones de calibración encontradas para cada caso— sin embargo, es notorio que aún para gastos mucho mayores, las diferencias se mantienen muy grandes; al respecto, sólo se hace notar el hecho. Se deja para posteriores investigaciones una fundamentación del mismo, dado que en la mayoría de los casos, las diferencias tan altas encontradas en algunos de los experimentos no parecen tener una relación clara con la lectura de gastos bajos.

Recibido: 18/03/10

Aceptado: 19/01/12

Referencias

- ASTM. *Standard D 1941-91 Standard Test Method for Open Channel Flow Measurement of Water with Parshall Flume*. New York: American National Standard, 2001.
- ISO. *Standard 9826 Measurement of liquid flow in open channels-Parshall and SANIRI flumes*. Gèneve: International Organisation for Standardization, 1992.
- PEDROZA, E. *Canal Parshall*. Serie autodidáctica. México, D.F.: Semarnat-Conagua-IMTA, 2001, 32 pp.
- SOTELO, G. *Hidráulica General*. Volumen 1. Fundamentos. Vigésimoprimera reimpresión. México, D.F.: Editorial Limusa, 1999, 561 pp.

Abstract

PEDROZA-GONZÁLEZ, E. & ANGEL-HURTADO, J.L. Variations in a Parshall flume calibration. Water Technology and Sciences (in Spanish). Vol. III, No. 3, July-September, 2012, pp. 35-51.

The use of Parshall flumes is common in industries that require measuring wastewater discharges. It is frequently found that these flumes do not meet certain recommendations established by applicable standards. A flume of 3 inches was calibrated in a laboratory in order to investigate the type of adjustment equation resulting from a variety of failures to comply with the standard. Some of the factors for which compliance was not met included steep slopes, obstacles in the inlet channel, high roughness in the material of the flume and lack of verticality of the walls. The different adjustment equations were compared with the equation recommended by the standard, and it was found that better compliance with the standard does not always generate the equation most similar to that recommended. For example, when the flume with a null slope in the inlet channel was calibrated, an equation very different from that of the standard was obtained; calibrations with steeper slopes, even outside the range, yielded equations closer to those representing the standard. It was also found that the calibration of the flume with a roughness of the flume wall of 2 mm has a more similar adjustment equation, even more so than the calibration with nearly smooth walls. In addition, it was observed that calibration with a screen located 40 cm upstream produces a better adjustment equation than that with the same screen placed at 160 cm. Based on these results it can be concluded that it is preferable to calibrate the Parshall flume rather than meeting the standard.

Keywords: Parshall flume, calibration.

Dirección institucional de los autores

Edmundo Pedroza González

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Coordinación de Hidráulica
Subcoordinación de Hidráulica Ambiental
Paseo Cuauhnáhuac 8532, Colonia Progreso
62550 Jiutepec, Morelos, MÉXICO
Teléfono: +52 (777) 3293 677
epedroza@tlaloc.imta.mx

Jorge Leonel Angel Hurtado

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
Facultad de Ingeniería Civil
Departamento de Hidráulica
Ciudad Universitaria
58030 Morelia, Michoacán, MÉXICO
Teléfono: +52 (443) 1739 296, extensión 4303
zectar@hotmail.com