

Traducción al español del artículo original “Détermination des lois d’écoulement de l’eau á travers le sable”, incluido en el apéndice D de la obra de Henry Darcy “Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon”, publicada en 1856.

Original en francés tomado de Marle, 2006. “Henry Darcy et les écoulements de fluides en milieu poreux. Oil & Gas Science and Technology-Rev. IFP, Vol. 61, No. 5, p. 599-609. Traducción del francés por Xavier Lietaert y Hely Socorro.

Determinación de las leyes de flujo del agua a través de la arena

Empiezo ahora la narración de los experimentos que realicé de común acuerdo con el ingeniero Charles Ritter para determinar las leyes del flujo del agua a través de las arenas. Las pruebas fueron repetidas por el ingeniero en jefe Baumgarten.

El aparato utilizado l. 24, fig.3, consistía en una columna vertical de 2,50 m de alto, formada por una sección de tubería de 0,35 m de diámetro interno, y cerrada en cada extremidad por un tapón de plancha de acero con pernos.

En el interior, y a 0,20 m por encima del fondo, se encuentra un filtro horizontal con aberturas, destinado a soportar la arena, y que divide la columna en dos cámaras. Este filtro está formado por la superposición de abajo hacia arriba de una reja de hierro con barrotes prismáticos de 0,007 m, de una reja con barrotes cilíndricos de 0,005 m, y finalmente de una tela metálica con malla de 0,002 m. La separación de los barrotes de cada una de las rejillas es igual a su espesor, y las dos rejillas están colocadas de modo que sus barrotes están en direcciones perpendiculares una de otra.

La cámara superior de la columna recibe el agua por un tubo conectado a la alimentación del hospital, en el cual una llave permite controlar a voluntad el caudal; la cámara inferior se abre con una llave ubicada sobre una cubeta de aforo de un metro de largo.

La presión en los dos extremos de la columna está indicada por unos manómetros de mercurio en forma de U; cada una de las cámaras está provista de una llave de purga de aire, esencial para la carga de agua del aparato.

Los experimentos han sido realizados con arena silícica del río Saône, compuesta como sigue:

0,58 m de arena es menor a 0,77 milímetros

0,13 m de arena es menor a 1,10 milímetros

0,12 m de arena es menor a 2,00 milímetros

0,17 m de grava fina, restos de conchas etc.

Esta arena presenta alrededor de 38/100 de vacíos.

La arena estaba vertida y compactada en una columna previamente llena de agua, para que los vacíos de la masa filtrante no contengan aire, y la altura de arena sería medida al final de cada serie de experimentos, después de que el paso del agua la hubiese compactado convenientemente.

Cada experimento, consistía en establecer en la cámara superior de la columna, por medio de la manipulación de la llave de llenado, una presión determinada; después, por medio de dos observaciones, nos habíamos asegurado que el caudal se había comportado sensiblemente uniforme, anotando el caudal filtrado durante cierto tiempo, obteniendo el caudal promedio por minuto.

Con cargas leves, la inmovilización casi completa del mercurio del manómetro permitía tener una precisión de milímetro, siendo 26,2 mil de agua; cuando se actuaba bajo fuertes presiones, la llave de entrada estaba casi totalmente abierta, de modo que el manómetro, a pesar de su diafragma, presentaba oscilaciones continuas; sin embargo las fuertes oscilaciones no eran más que fortuitas, y se podía apreciar, hasta un margen de 5 milímetros, la altura promedio del mercurio, o sea conocer la presión en columna de agua de 1,30 m aproximadamente.

Traducción de la ley de Darcy original

Xavier Lietaert y Hely Socorro

Todas estas oscilaciones manométricas se debían a los golpes de ariete producidos por el juego de numerosas llaves de fuentes del hospital, lugar donde estaba colocado el aparato experimental.

Todas las presiones han sido referidas al nivel de la cara inferior del filtro, y no se tomó en cuenta la fricción de la parte superior de la columna, la cual era evidentemente insignificante.

Número del experimento	Duración	Caudal promedio por minuto	Presiones medias	Relación entre los volúmenes y la presión	Observaciones
1ª serie, con un espesor de arena de 0,58 m					
1	25'	3,60 lt	1,11	3,25	La arena no fue lavada
2	20'	7,65	2,36	3,24	La columna manométrica mostró leves variaciones
3	15'	12,00	4,00	3,00	
4	18'	14,28	4,90	2,91	
5	17'	15,20	5,02	3,03	
6	17'	21,80	7,63	2,86	
7	11'	23,41	8,13	2,88	Oscilaciones muy sensibles
8	15'	24,50	8,58	2,85	Fuertes oscilaciones manométricas
9	13'	27,80	9,86	2,82	
10	10'	29,40	10,89	2,70	
2ª serie, con espesor de arena de 1,14 m					
1	30'	2,66	2,60	1,01	La arena no fue lavada
2	21'	4,28	4,70	0,91	
3	26'	6,26	7,71	0,81	
4	18'	8,60	10,34	0,83	Muy fuertes oscilaciones
5	10'	8,90	10,75	0,83	
6	24'	10,40	12,34	0,84	
3ª serie, con un espesor de arena de 1,71 m					
1	31'	2,13	2,57	0,83	Arena lavada
2	20'	3,90	5,09	0,77	
3	17'	7,25	9,46	0,76	Muy fuertes oscilaciones
4	20'	8,55	12,35	0,69	
4ª serie, con un espesor de arena de 1,70 m					
1	20'	5,25	6,98	0,75	Arena lavada de un grano un poco más grueso que la anterior
2	20'	7,00	9,95	0,70	Oscilaciones débiles debido a la obturación parcial de la apertura del manómetro
3	20'	10,30	13,93	0,74	

La tabla de los experimentos, así como sus representaciones gráficas, demuestran que el caudal de cada filtro crece proporcionalmente a la carga.

Para los filtros sobre los cuales se operó, el caudal por segundo y por metro cuadrado está ligado aproximadamente a la carga por las relaciones siguientes:

$$\begin{array}{ll} 1^{\text{a}} \text{ serie...} Q = 0,493 P & 3^{\text{a}} \text{ serie...} Q = 0,126 P \\ 2^{\text{a}} \text{ serie....} Q = 0,145 P & 4^{\text{a}} \text{ serie.....} Q = 0,123 P \end{array}$$

Llamando I la carga proporcional por metro de espesor del filtro, estas formulas se modifican por las siguientes:

$$\begin{array}{ll} 1^{\text{a}} \text{ serie...} Q = 0,286 I & 3^{\text{a}} \text{ serie...} Q = 0,216 I \\ 2^{\text{a}} \text{ serie....} Q = 0,165 I & 4^{\text{a}} \text{ serie...} Q = 0,332 I. \end{array}$$

Las diferencias entre los valores del coeficiente Q/I provienen del hecho que la arena utilizada no fue constantemente homogénea. Para la 2ª serie no había sido lavada, para la 3ª sí, para la 4ª fue muy bien lavada y compuesta de un grano un poco más grueso.

Parece entonces que, con una arena de la misma naturaleza, se puede admitir que el volumen medido es proporcional a la carga y en razón inversa al espesor de la capa transversal.

En los experimentos anteriores, la presión bajo el filtro siempre fue igual a la atmósfera; era interesante investigar si la ley de proporcionalidad que acabamos de comprobar entre los volúmenes medidos y las cargas que los producen subsistía todavía, cuando la presión bajo el filtro era más grande o más pequeña que la atmósfera: tal era la meta de las nuevas investigaciones realizadas el 17 y 18 de Febrero de 1856 bajo la supervisión de M. Ritter.

Estas investigaciones están relacionadas en la tabla sinóptica siguiente: la columna 4 muestra las presiones sobre el filtro, la 5 las presiones bajo el filtro, a veces más grandes y a veces más pequeñas que el peso P de la atmósfera; la columna 6 presenta las diferencias de presión; finalmente la columna 7 indica las relaciones de los volúmenes medidos entre las diferentes presiones producidas sobre y bajo el filtro. El espesor de la capa de arena transversal era igual a 1,10 m.

Número del experimento	Duración	Caudal promedio por minuto l.	Presiones promedio		Diferencia de presiones m	Relación entre volúmenes y presiones	Observaciones
			Sobre el filtro m	Bajo el filtro m			
1	2	3	4	5	6	7	8
1	15'	18,80	P + 9,48	P - 3,60	13,08	1,44	Fuertes oscilaciones en el manómetro superior
2	15'	18,30	P + 12,88	P - 0,00	12,88	1,42	
3	10'	18,00	P + 9,80	P - 2,78	12,58	1,43	
4	10'	17,40	P + 12,87	P + 0,46	12,41	1,40	Débiles
5	20'	18,10	P + 12,80	P + 0,49	12,35	1,47	Bastante débiles
6	16'	14,90	P + 8,86	P - 0,83	9,69	1,54	Casi nulas
7	15'	12,10	P + 12,84	P + 4,40	8,44	1,43	Muy fuertes
8	15'	9,80	P + 6,71	P - 0,00	6,71	1,46	Muy débiles
9	20'	7,90	P + 12,81	P + 7,03	5,78	1,37	Muy fuertes
10	20'	8,65	P + 5,58	P - 0,00	5,58	1,55	Casi nulas
11	20'	4,50	P + 2,98	P - 0,00	2,98	1,51	
12	20'	4,15	P + 12,86	P + 9,88	2,98	1,39	Bastante fuertes Ya explicamos las causas de estas oscilaciones

La constancia de las relaciones de la 7ma columna comprueba la veracidad de la ley ya enunciada: sin embargo hay que señalar que aquí otra vez las presiones sobre y bajo el filtro abarcan límites muy extensos: en efecto, bajo el filtro, la presión cambió de $P + 9,88$ a $P - 3,60$, y sobre el filtro de $P + 12,88$ a $P + 2,98$.

Así que, llamando e al espesor de la capa de arena, s su superficie, P la presión atmosférica, h la altura del agua sobre esta capa, tendremos $P + h$ para la presión que deberá soportar la parte superior, siendo además $P + h_0$ la presión soportada por la superficie inferior, k un coeficiente dependiente de la permeabilidad de la capa, q el volumen^a medido, se obtiene:

$$q = k * s/e (h + e +/- h_0) \text{ que se reduce a } q = k * s/e (h + e)$$

Cuando $h_0 = 0$, o cuando la presión bajo el filtro es igual a la atmosférica.

Es fácil de determinar la ley de descenso de la altura del agua h sobre el filtro; en efecto, sea dh la cantidad por la cual esta altura se disminuye durante un tiempo dt , su velocidad de descenso será $- dh/dt$; pero la ecuación arriba mencionada da todavía para esta velocidad la expresión

$$\frac{q}{s} = v = \frac{k}{e} [h + e]$$

Tendremos entonces $-\frac{dh}{dt} = \frac{k}{e} (h + e)$; de donde $\frac{dh}{(h + e)} = -\frac{k}{e} dt$

$$Y \quad \ln (h + e) = C - \frac{k}{e} t$$

Si el valor h_0 corresponde al tiempo t_0 y h a un tiempo cualquiera t , resultará

$$\ln (h + e) = \ln (h_0 + e) - \frac{k}{e} (t - t_0) \quad (1)$$

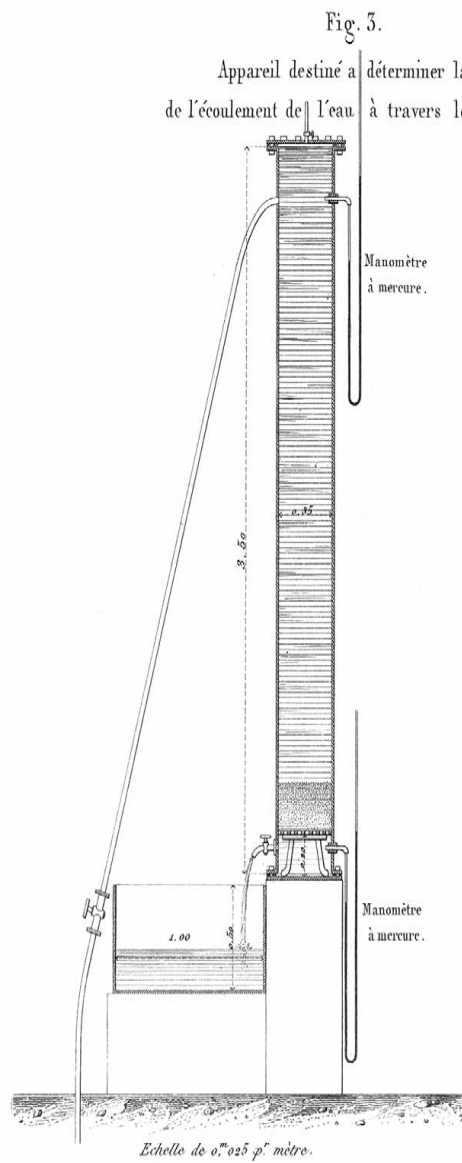
Si se sustituye ahora $h+e$ y $h_0 + e$ por qe/sk y q_0e/sk , se obtiene

$$\ln q = \ln q_0 - \frac{k}{e} (t - t_0) \quad (2)$$

Y las dos ecuaciones (1) y (2) dan, sea la ley de descenso de la altura en el filtro, sea la ley de variación de los volúmenes^a medidos a partir del tiempo t_0 .

Si k y e eran desconocidos, se ve que sería necesario dos experimentos preliminares para hacer desaparecer de la segunda la relación desconocida k/e .

^a Nota respecto a la traducción: Se llama la atención respecto al hecho de que en el trabajo original se usa, en estos dos casos, la palabra volumen para referirse a caudales, esto probablemente se debe a que los cálculos que permitieron el descubrimiento de la relación de proporcionalidad están hechos en base a caudales por minuto, los cuales son expresados en litros.



(Tomado de Brown, G. 2002. Henry Darcy and the making of a law. Water Resources Research, Vol. 38, No. 7)