

de consistencia blanda y aun flúida, en parte, es decir, maleable y aglutinante. Con objeto de que la destrucción de la piedra no vaya más rápidamente que la mezcla producida por la circulación, es preciso que la gravilla sea dura. En cambio, en los pavimentos en que los áridos estén bien clasificados y proporcionados, tiene menos importancia la calidad de la piedra.

El rellenador (*filler*) tiene varias funciones: colma los huecos pequeños de la arena, que sin él tendrían que llenarse con betún; otra parte del rellenador se colocará entre los granos de los áridos, haciendo el oficio de cojín, que absorbe los choques y obliga, en último término, a la máxima repartición del aglomerante, que no tiene resistencia propia y que no ha de intervenir más que como aglutinante en película muy fina.

El rellenador que mejora más las cualidades del aglomerante, desde el punto de vista de contrarrestar algunas deficientes cualidades de éste, tales como puntos de ablandamiento bajo y sensibilidad a los choques en tiempos fríos, es el micro-asbesto, de densidad débil y de naturaleza lanosa; pero habitualmente se utilizan rellenadores de polvo de piedras, de escorias, etc. Se ha demostrado que polvos de diferentes piedras, aunque den los mismos resultados al tamizarlos, pueden tener granos de formas muy variadas, lo que se comprueba por medidas microscópicas, por sedimentación o por centrifugación.

Un hecho importante para la práctica es que las materias pulverulentas empleadas como rellenadores pueden tener, como consecuencia de su estructura, propiedades particulares; así, por ejemplo, el polvo de caliza blanda tiene, después de que se le consolida por el método vibratorio, un gran volumen de huecos (35 a 42 %); pero, sometido a fuerte presión (800 kg/cm²), se reduce a 25 %; por el contrario, el polvo de rocas cuarzosas no pierde, por compresión, mayor volumen de huecos del que contiene una vez vibrado.

Quizá lo más interesante de la Memoria alemana sea el estudio que hace de las cantidades óptimas de material aglomerante. Llega a la conclusión de que las cantidades de betún asfáltico en los hormigones han de ser distintas según la época del año en que se hace el revestimiento. En primavera y verano conviene basarse, para determinar la cantidad de aglomerante, en la proporción de huecos de la masa de áridos fuertemente comprimida, sobre todo cuando el tráfico es intenso y pesado; si el tráfico fuese ligero, y no se espera, por tanto, una fuerte compresión por el tráfico, puede emplearse algún betún en

exceso, calculado por la media de los huecos obtenidos en la masa de áridos por compresión y por vibración, resultando así el revestimiento impermeable. Si los trabajos se hicieran al principio del invierno hay que asegurar completamente la impermeabilidad, por temor a la humedad y a las heladas, adoptando para cada cantidad de betún el volumen de los huecos de la masa de áridos simplemente vibrada. Es verdad que así el revestimiento es menos estable y menos rugoso; pero son defectos preferibles a los que resultarían de excesiva permeabilidad. Se sabe, en efecto, que el agua detiene los asientos de consolidación, y su acción prolongada da lugar a un trabajo interno análogo al de las heladas y en el desecamiento se producen grietas. Después de muchos ensayos, prolongados largos años, se ha llegado a la consecuencia de que casi siempre las hinchazones en los revestimientos se deben a la arcilla que existe en las arenas, en los rellenadores que proceden de rocas graníticas, pórfidos, grauwacas y basaltos, en el betún de Trinidad y en las calizas asfálticas. Por eso todos los revestimientos asfálticos *porosos* se hinchán apenas sufren la acción del agua. Como consecuencia, cada vez se es más exigente en cuanto al empleo de materiales que puedan contener arcilla.

Hasta aquí hemos procurado extraer lo más interesante respecto a materiales, y tendríamos que continuar haciendo lo mismo en lo referente a la colocación en obra; pero nos damos cuenta de que este artículo es ya muy largo, y lo sería en proporciones excesivas si lleváramos a cabo nuestro propósito.

Por ello terminamos, no sin proponernos continuar el trabajo después de celebrado el Congreso, pues los pavimentos a base de betunes asfálticos, alquitranes y emulsiones se han desarrollado, particularmente en Europa, de tal modo, que constituyen la inmensa mayoría de los pavimentos de alta calidad. Consecuencia de tal desarrollo es que se han estudiado y se siguen estudiando con tal intensidad, que es ya difícil poder leer toda la literatura técnica publicada sobre el particular.

Aparte de los sistemas ya consagrados, existen numerosísimos ensayos de soluciones nuevas, tendiendo, sobre todo, a conseguir pavimentos permanentes, pues se considera ya sobrepasada la fase que tan interesante fué de los enlucidos, que resolvió un agobiante problema de modo económico, pero que ya sufre las críticas de los usuarios, que no les satisfacen porque les obliga a reducir velocidades.

En artículos sucesivos mencionaremos, pues, lo más saliente respecto a sistemas de ejecución.

Manuel AGUILAR
Ingeniero de Caminos

Estudios sobre los filtros rápidos¹

II

Proceso de la filtración

La condición ideal para la explotación de un filtro

¹ Véase el número de 1.º de agosto, página 285.

rápido es obtener una velocidad uniforme de filtración sobre el área total de arena, así como una velocidad también uniforme de subida del agua de lavado en el plano de división de la grava y la arena. Para mantener la tendencia a la uniformidad de la

velocidad de filtración es necesario causar una apreciable pérdida de carga en la entrada del agua en los drenes, y esto tiene lugar restringiendo el tamaño de las aberturas. En nuestro caso el sistema de drenaje

tenía aberturas igual al 0,2 por 100 del área total del filtro, y la pérdida en él tenía por máximo 0,5 cm cuando la velocidad es de 6,2 litros por minuto, como puede apreciarse en el cuadro adjunto.

Filtración

HORA	Velocidad de filtración en l/mín	CARGA DE AGUA EN LOS TUBOS								PERDIDA DE CARGA				
		8	7	6	5	4	3	2	1	Arena		Grava	Drenaje	Total
										8 - 7	7 - 4	4 - 2	2 - 1	8 - 1
9,45	7,1	157	157	157	157	157	157	157	157	0	0	0	0	0
10,00	6,2	157,4	151,8	149,9	148,2	147,3	147,2	146,8	146,1	5,6	4,5	0,5	0,7	11,3
10,30	4,9	161,5	140,9	139	137,4	136,5	136,4	136,1	135,5	20,6	4,6	0,4	0,6	26,2
11,00	3,8	157,6	124,4	122,3	120,4	119,3	119,1	118,9	118,3	33,2	5,1	0,4	0,6	39,3
11,30	3,05	158,5	115,6	113,5	111,5	110,4	110,1	110,1	109,6	42,9	5,2	0,3	0,5	48,9
12,00	2,8	157,8	111,4	109,5	107,7	106,1	106,1	105,9	105,5	46,4	5,3	0,2	0,4	52,3
12,30	2,6	157,3	108,5	106,5	104,6	103,2	103,2	103,1	102,7	48,8	5,3	0,1	0,4	54,6
13,30	0,6	157,1	83,6	81,9	80,2	79,5	79,3	79,4	79,0	73,5	5,4	0,1	0,4	79,4

En el cuadro adjunto se indican los datos tomados durante un proceso de filtración, en el que se conservaba constante en lo posible la carga de agua sobre el lecho de arena. Esta constancia se obtenía graduando a mano la válvula esfuente, con lo que, naturalmente, se variaba la velocidad de filtración, como puede observarse en la segunda casilla de dicho cuadro de valores.

El objeto de este experimento era estudiar la pér-

comprendidos en el área *ABFHO* tienen carga positiva; pero los exteriores, como el *E*, la tienen negativa; esto es, están a menor presión que la atmosférica; la explicación de esto es la siguiente:

El paso del agua a través del lecho produce una pérdida de carga, debido a rozamientos, la cual es igual a la diferencia entre la carga en la parte superior de la arena y en los drenes; pero si sucede que la capa superior de la arena, solamente en sus primeros centímetros, está tan ocluida que es necesario, para hacer pasar el agua a través de ella, una carga mayor que la que existe en la superficie, la carga adicional se obtiene del agua que existe debajo de la parte ocluida del lecho y, por lo tanto, el agua de la parte inferior tira del agua de la parte superior lo necesario para forzarla a pasar la parte ocluida.

Así, por ejemplo, en la figura 4, y en la curva *ABEFG*, que es la curva de la pérdida de carga de la filtración a las 3 horas y 45 minutos de poner el filtro en explotación, la parte superior del lecho está tan ocluida, que el agua, para atravesar los cinco primeros centímetros de arena, necesita experimentar una pérdida de carga por rozamientos de $CE = CD + DE = (60 + 5) + 12,5 \text{ cm} = 77,5 \text{ cm}$, y como sobre el punto *D* sólo hay una carga de agua de 65 cm, existe una succión de 12,5 cm, que se llama carga negativa en ese punto, igual a la diferencia entre la pérdida total de carga y la carga disponible sobre el punto en cuestión.

Esto se explica porque la pérdida de carga en la parte baja del filtro es constante para velocidad de filtración constante, porque no se ocluye, y es solamente una parte de la diferencia de cota (que representa carga) entre dos puntos cualesquiera de esta parte baja del filtro; esto es, que al pasar el agua de un punto de la parte inferior de la arena (que ya no está ocluida) a un punto del drenaje se gana en carga la diferencia de cota de esos dos puntos; pero como para hacer *bajar* el agua entre dichos puntos no es necesaria toda la carga que se va ganando, parte de esta carga que sobra se emplea en *tirar* del agua para obligarla a pasar a través de la parte ocluida y todavía dejar una carga positiva sobre los drenes.

Así en la misma curva *ABEG* de la figura 4 se ve que al pasar el agua del punto *N* al *G* gana en carga

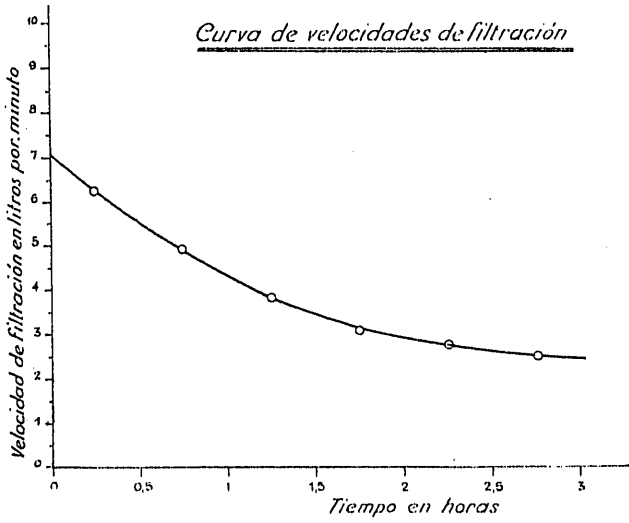


Fig. 3

dida de carga durante la filtración, y para esto el agua que introducíamos en el filtro era previamente tratada con sulfato de alúmina, con objeto de acelerar el proceso de oclusión.

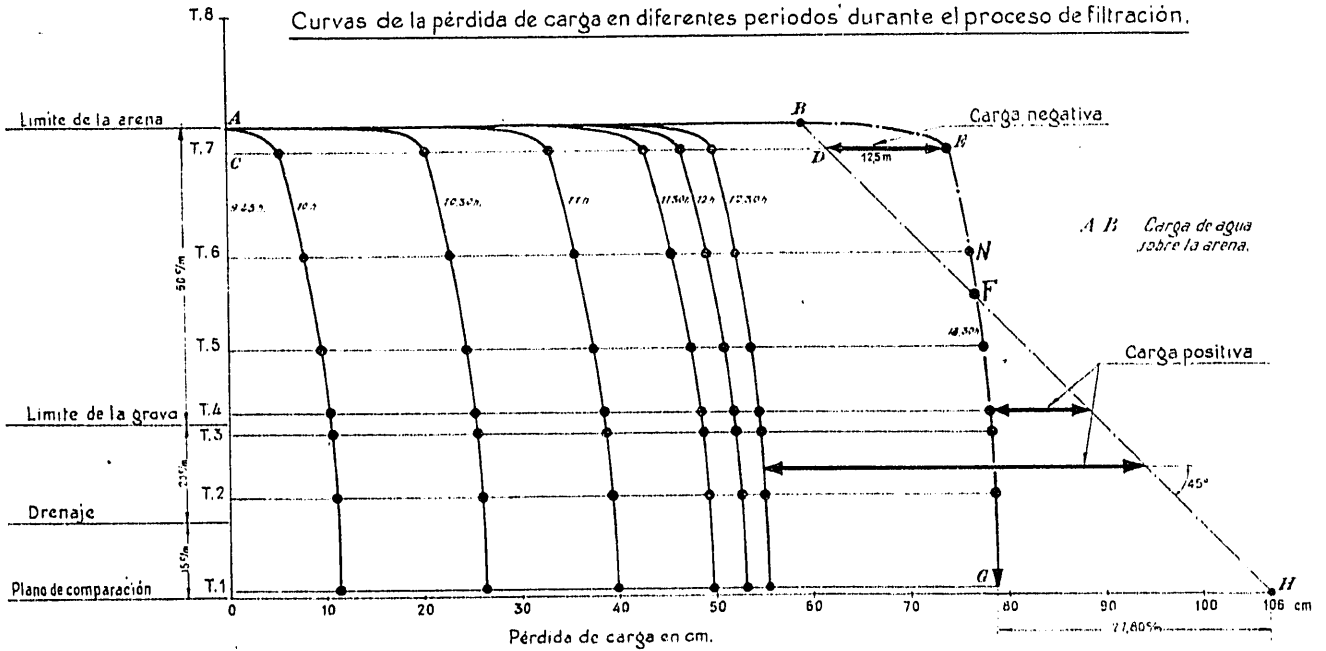
El sulfato de alúmina lo echábamos en disolución, por medio de un frasco de Mariotte, al depósito de mezcla, de donde el agua pasaba al depósito de decantación, y de allí al filtro.

En este caso de carga constante sobre el filtro, la curva que da la variación de la velocidad de filtración con el tiempo es una rama hiperbólica, como puede apreciarse en la figura 3, disminuyendo la velocidad a medida que el tiempo transcurre.

En la figura 4, que es una representación del cuadro de valores antes citado, se indican las curvas de la pérdida de carga en diferentes períodos durante el proceso de filtración, y se ve que como la carga de agua es de 60 cm, indicada por *AB*, todos los puntos

68 cm, que es la diferencia de cota entre dichos puntos, y como para pasar el agua entre dichos puntos sólo necesita una fuerza indicada en pérdida de carga de $TG - TN = 81,9 - 79 = 2,9$ cm, le queda sobrante en ese recorrido $68 - 2,9 = 65,1$ cm de

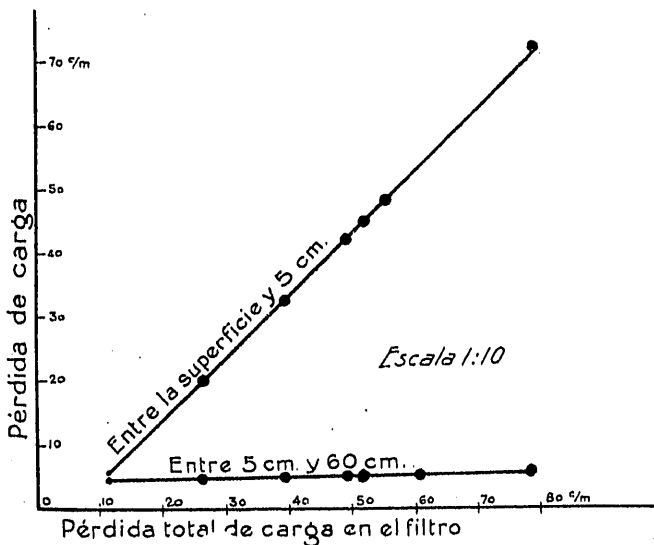
Esto se ve en la figura 5, que indica la pérdida de carga comparativa en la parte superior de la arena; la pérdida de carga en los 5 primeros centímetros es la diferencia de lecturas de los tubos 8 y 7, y la pérdida en los 55 cm restantes de arena es la diferencia



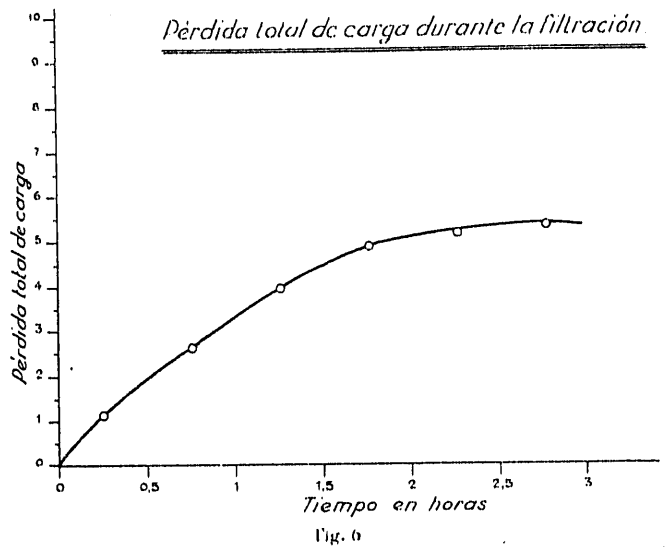
carga, y parte de esta carga la emplea en hacer pasar el agua por la parte ocluida del lecho, por ejemplo, hasta el punto E, que faltaban 12,5 cm de carga, y a pesar de esto todavía sobre los drenes hay una carga positiva de 27,8 cm.

La oclusión tiene lugar en los primeros centímetros de la capa de arena, y una medida visible de la

Curvas de pérdida de carga comparativa en la parte superior de la arena.



de lecturas entre los tubos 7 y 4; las abscisas de estas curvas son la pérdida total de carga en el filtro, pero podía también ser el eje X de los tiempos, pues



es solamente una medida de la explotación del filtro. En esta figura se ve que, así como la pérdida de carga en los últimos 55 cm es casi constante, pues sólo varía en 0,9 cm, la pérdida de carga en los primeros 5 cm aumenta considerablemente durante la explotación, pasando de 5,6 cm a 73,5 cm, lo que indica que la oclusión no alcanza más allá de unos centímetros.

La curva de la figura 6 nos da la pérdida total de carga durante la filtración en función del tiempo, pues la explotación de un filtro se mide por el tiempo de funcionamiento o por la pérdida de carga máxima que experimenta.

profundidad de la oclusión puede hacerse por la decoloración que la arena experimenta al ocluirse.

Lavado del filtro

La diferencia esencial entre un filtro lento y un filtro rápido es el papel o efecto que desempeña el material filtrante.

Aparte de la diferente velocidad de filtración, cuyo nombre lo indica, es la *gradación hidráulica* durante el lavado del filtro lo que produce la principal diferencia en las propiedades de los materiales de filtración en los dos tipos de filtro.

En un filtro rápido la arena se estratifica o gradúa por el lavado en un número de capas consecutivas, aumentando el tamaño de las partículas desde la parte superior al fondo. La arena comprendida en cada una de estas capas es casi uniforme. Cuando el agua pasa a través del lecho cada capa de arena con-

tribuye a la pérdida de carga total en un valor que depende del tamaño de la arena y de la profundidad.

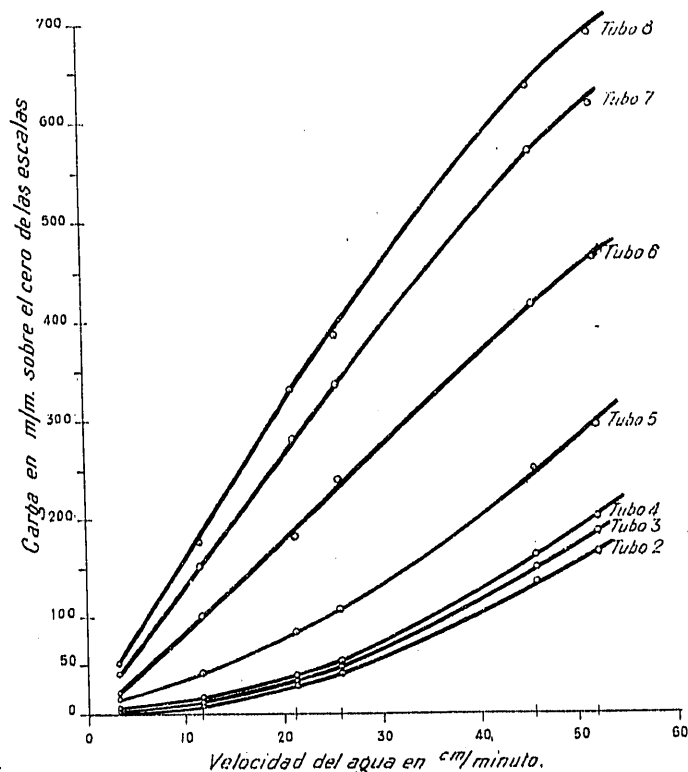
Un filtro rápido no es, como decimos, una mezcla heterogénea de arena de diferentes tamaños, sino un lecho graduado hidráulicamente, con diferentes capas de arena, cada una formada por granos del mismo tamaño aproximadamente. La experiencia muestra que la capa superior de arena fina es de gran importancia en el *comportamiento* del filtro y, por lo tanto, el conocimiento de las características de esta capa es de gran interés. Por consiguiente, el éxito parcial de la medida del *tamaño efectivo* es debida al hecho de que este tamaño represente aproximadamente la porción más fina de la masa de arena, la cual ha mostrado la experiencia ser la parte *efectiva* del lecho.

Lavado

PERDIDA DE CARGA ENTRE LOS DIFERENTES TUBOS, EN MM												
Velocidad en cm/minuto	1 -- 2	1 -- 3	1 -- 4	1 -- 5	1 -- 6	1 -- 7	1 -- 8	Drenaje — 1 -- 2	Grava — 2 -- 4	Arena — 4 -- 8	Grava y arena — 2 -- 8	TOTAL — 1 -- 8
3,2	1	3	5	13	20	40	50	1	4	45	49	50
11,5	9	11	17	39	0,98	145	172	9	6	155	161	172
21	28	31	35	82	161	285	325	28	7	290	297	328
25,5	40	44	53	105	240	235	385	40	13	332	345	385
45,6	140	150	163	248	416	570	635	135	23	472	495	635
52	162	175	198	294	464	620	690	167	36	492	528	690
	T. 2	T. 3	T. 4	T. 5	T. 6	T. 7	T. 8					

Se hicieron varios experimentos variando los espesores y gradaciones de las capas de grava y arena,

Curvas que dan la carga en diferentes puntos del filtro, en función de la velocidad del agua de lavado.



y en la tabla adjunta se indican los valores correspondientes al lecho que dió mejor resultado, que es el representado en la figura 1.

La figura 7 es la representación gráfica de la primera parte de la tabla adjunta del lavado del filtro, en la cual las abscisas representan la velocidad de subida del agua de lavado en centímetros por minuto, y las ordenadas la carga en milímetros sobre el tubo correspondiente, medida en columna de agua.

Con este lecho, aun en el caso de abrir de repente la válvula de lavado hasta el máximo posible, causando una velocidad de subida del agua de 60 cm por minuto, no se producía alteración seria en él, lo que prueba que estaba en buenas condiciones. Naturalmente que la corriente ascendente de lavado, sobre todo si el lecho estaba ocluido y había aire aprisionado en él, levantaba la arena; pero las diferentes corrientes eran aproximadamente de la misma velocidad en todo el filtro y el lavado era bastante uniforme.

El agua de lavado pasaba a través de las aberturas de los drenes a una velocidad 10 veces mayor que durante la filtración, y su tendencia a causar corrientes con velocidades desiguales era destruida en los 20 cm de la capa de grava, y el agua de lavado llegaba a la capa de arena con velocidad sensiblemente uniforme en toda la superficie del filtro.

Cuando se quitó la arena de este lecho la grava estaba en las mismas condiciones que cuando se colocó y no se había mezclado con ella nada de arena. Esto demuestra que el agua de lavado tenía una velocidad uniforme al pasar de la grava a la arena, y por esto no existía tendencia a mezclarse entre sí. No obstante, se observaba una velocidad ligeramente

mayor cerca de las paredes del filtro que en la parte central, aunque era causada probablemente por la menor rugosidad de las paredes.

Como conclusión podemos decir que conviene emplear grava muy pequeña para aumentar la pérdida de carga a su través, tanto en la filtración como durante el lavado. Como limitaciones, diremos que la capa inferior de grava debe ser suficientemente grande para no meterse por los agujeros de los drenes, y la capa superior debía ser de grava fina, pero no tanto que fuese removida o alterada por la máxima velocidad de lavado.

En la tabla del lavado y en la figura 8, que es la representación gráfica de sus últimas casillas, se puede comparar las pérdidas de carga entre las diferentes porciones del filtro. Las curvas tienen por abscisas la velocidad de subida del agua de lavado en centímetros por minuto, y por ordenadas la pérdida de carga en milímetros.

De estas curvas se sacan las siguientes consecuencias:

La pérdida de carga a través de la grava es una parte muy pequeña de la pérdida total del filtro, pues para la máxima velocidad de lavado vale en nuestro caso 36 mm, que representa solamente un 5,2 por 100 de la pérdida de carga total.

Mientras que la mayor parte de dicha pérdida tiene lugar en la arena, que para dicha máxima velocidad de lavado vale 492 mm, equivalente al 71 por 100 de la pérdida total, correspondiendo el 23,8 por 100 restante al drenaje.

Del examen de la figura 8 se deduce que la curva de la pérdida de carga en la grava tiene su concavidad hacia las y positivas, lo que indica que aumenta mucho al aumentar la velocidad de lavado, puesto que los huecos de la grava permanecen inalterables durante dicho lavado, mientras que la curva de la pérdida de carga a través de la arena presenta convexidad hacia las y positivas, lo que indica que no aumenta mucho al aumentar la velocidad de lavado, debido a que si ésta es bastante potente, levanta la arena, causa la flotación de los granos más finos y aumenta los huecos entre dichos granos, y disminuye, por lo tanto, la fricción o rozamiento de la co-

rriente ascendente, lo que determina una menor pérdida de carga que si hubiesen quedado inalterables los huecos de la arena.

Por lo tanto, para cada clase de arena hay una ve-

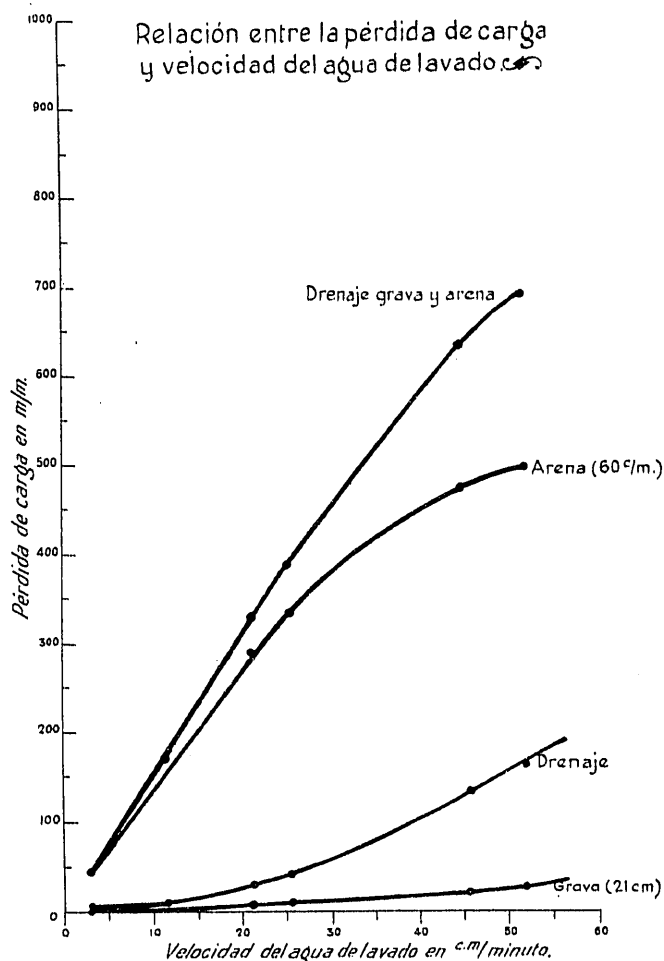


Fig. 8

locidad eficaz de lavado, que por razones económicas no se debe sobrepasar, pues se aumentan los huecos de la arena, pero no la acción de *restregamiento* entre las partículas, que es lo que indica la eficacia del lavado.

Gabriel BARCELÓ
Ingeniero de Caminos

El nuevo puente de Puerta de Hierro sobre el río Manzanares, en Madrid

Historia

Puerta Cerrada, la calle y puente de Segovia y la Antigua Vía de Castilla constituyeron hasta mediados del siglo XVIII la salida de Madrid hacia las provincias castellanas y leonesas, lo que justifica el nombre de la calle y puente que, con aparente paradoja, constituyen hoy día la salida para Extremadura y Portugal.

Al cerrarse el recinto de la Casa de Campo quedó

interceptado el trozo de la Vía de Castilla comprendido en su interior, construyendo Fernando VI en 1750, a modo de "desviación", el puente de San Fernando y la Cuesta de las Perdices, haciendo con ello arrancar la referida vía, hoy carretera de La Coruña, del kilómetro 7 de la carretera de Madrid a El Pardo, poco más allá de Puerta de Hierro.

Encargado el Circuito Nacional de Firms Especiales de las principales carreteras de España, incorporó a la de Madrid a La Coruña el trozo común