

# AREIA PARA FILTROS

**Eng. NASSIN NADRUZ**

Diretor do Serviço de Obras e Emissários e  
Estações de Tratamento de Esgotos (SO. 3).

## I — QUALIDADE DA AREIA

Segundo as normas usuais, as areias empregadas nos leitos de filtração das estações de tratamento de águas devem ser de origem quartzica ou silicosa. Estas areias geralmente são oriundas de rios, lagos, cavas ou praias. A sua natureza deve ser tal que não permita desagregação pela água. A sua composição química não pode incluir sais de magnésio ou cálcio. Deve também ser isenta de argila. Toda a areia contendo argila deve ser lavada antes do seu emprego. Há especificações definindo o grau de lavagem necessário, a fim de se obter uma areia em condições de ser empregada. Assim, em Pittsburg a norma diz que 100 gramas de areia lavada quando colocada dentro de um litro de água deve produzir uma turbidez menor que 200 partes por milhão. Geralmente as areias de quartzo e silicatos são de forma irregular e dotadas de ângulos vivos. Este é o tipo comum das areias do rio Tietê. A presença de argila tende a diminuir a velocidade de filtração, produzindo rápida colmatação da areia.

## II — PRIMEIRAS TENTATIVAS DE ESPECIFICAÇÕES

As primeiras tentativas para o estabelecimento de um método de análise das areias para filtros datam de 1890 e foram feitas na LAWRENCE EXPERIMENT STATION. Posteriores ensaios permitiram ao MASSACHUTTS STATE BOARD, em 1892, introduzir novas especificações. O manual "AMERICAN WATER WORKS PRACTICE", traz na íntegra essas especificações.

## III — TAMANHO DA AREIA

Na prática se costuma definir uma areia pelo "diâmetro" médio da sua partícula. Este diâmetro é definido pela abertura da peneira em que a areia é peneirada. O tamanho do grão de areia é de capital importância na filtração. Não só influe na qualidade da água filtrada, como também na velocidade de filtração. É obvio que uma areia formada por maiores partículas (maior diâmetro) permite uma filtração mais rápida e vice-versa. As areias naturais são compostas de partículas de diferentes tamanhos. As pequenas partículas enchendo os vazios existentes entre os grãos de maior tamanho fazem com que se crie uma resistência maior à passagem da água.

Essa resistência é provocada pela diminuição do tamanho e número de poros existentes entre os grãos. Aos vazios da areia dá-se o nome de porosidade.

Adiante veremos a influência da *POROSIDADE* no fenómeno da filtração.

## IV — COEFICIENTES

Allen Hazen em trabalho apresentado nas TRANSACTIONS OF THE AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS volume 57, 1906, após uma série de experimentos conseguiu determinar uma fórmula para exprimir a vazão dos filtros de areia. Para o uso desta fórmula Hazen definiu os dois coeficientes seguintes:

- a) TAMANHO EFETIVO (EFFECTIVE SIZE)
- b) COEFICIENTE DE UNIFORMIDADE (UNIFORMITY COEFFICIENT)

## V — ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DAS AREIAS

Para se definir os coeficientes mencionados é necessário tomar conhecimento do mecanismo da análise das areias. Consiste esta análise na separação dos grãos numa série de peneiras cujas aberturas variam de 10 a 200 malhas por polegada. Assim a peneira 10 é aquela que tem 10 malhas por polegada, e assim por diante. Peneiras grossas são usadas para areia grossa ou pedregulhos finos. A peneira 18 tem por abertura 1 milímetro. Nas análises de areia para filtros vae-se até a peneira 100, sendo as partículas menores que a peneira 100, classificadas como resíduo fino. As partículas menores que a peneira 200 são separadas por elutrição.

Na prática, obtêm-se a análise granulométrica de uma areia pesando-se uma determinada quantidade de uma amostra seca, representativa do conjunto, e fazendo essa quantidade passar através de um conjunto de peneiras de aberturas conhecidas. Faz-se, em seguida, a pesagem do material retido em cada uma delas. Com êsses elementos pode-se determinar os seguintes coeficientes que caracterizam uma areia:

MÓDULO DE FINURA	(ABRAHAM)
TAMANHO EFETIVO	(HAZEN)
COEFICIENTE UNIFORMIDADE	(HAZEN)
MÓDULO SUPERFÍCIE	(TYLER)

Na prática são usadas as peneiras TYLER, cujas aberturas são aproximadas das recomendadas pela AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIAIS. A característica dessas peneiras é que a abertura de cada uma é exatamente o dobro da menor mais próxima.

Assim sendo, as áreas das aberturas crescem aproximadamente na razão dos quadrados e o volume e o peso das partículas crescem na razão dos cubos.

## VI — TAMANHO EFETIVO

O tamanho efetivo de uma areia é um tamanho (expresso em milímetros) em relação ao qual 10% em peso do TOTAL da areia é mais FINO. É, pois, o tamanho da peneira que retem 90% do peso TOTAL da areia. Chamemos  $\theta$  esta abertura.

$$\text{TAMANHO EFETIVO} = \text{ABERTURA DA PENEIRA QUE RETEM 90\%}$$

## VII — COEFICIENTE DE UNIFORMIDADE

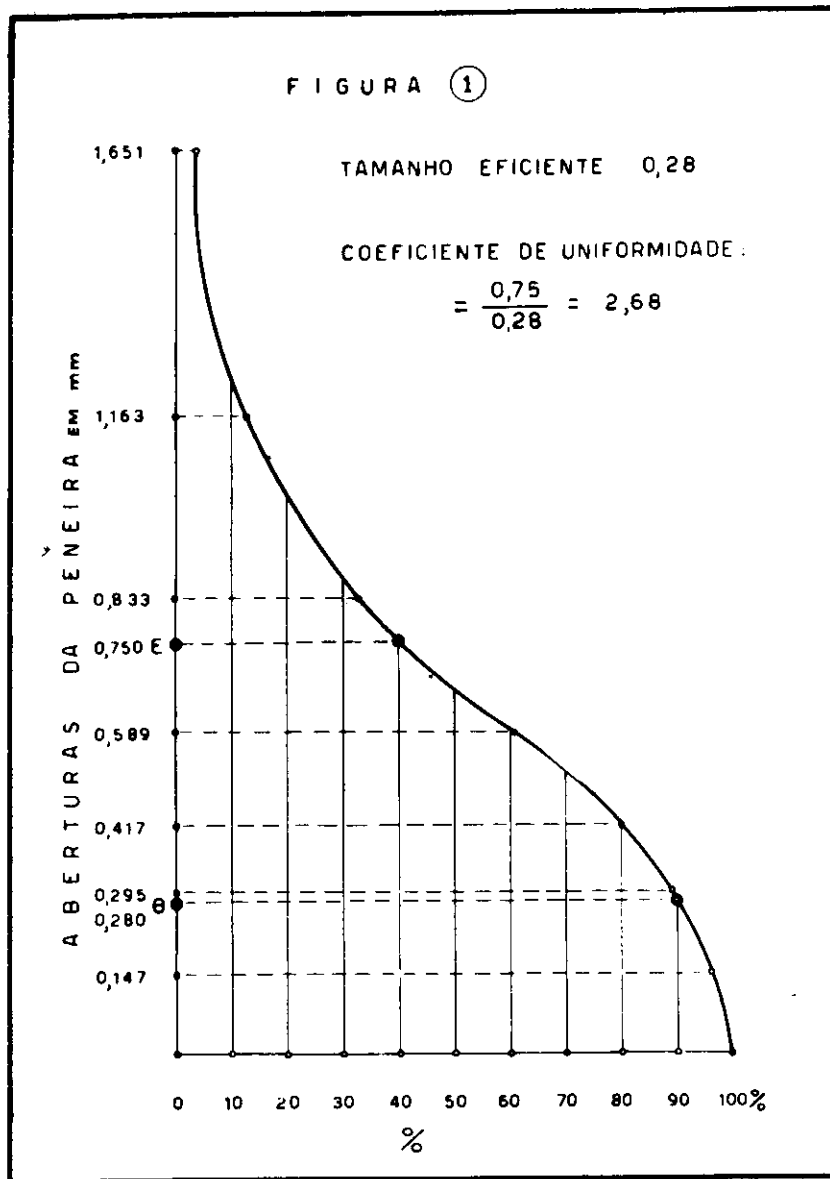
Seja uma peneira cuja abertura deixe passar 60% do material, ou, em outras palavras, que retenha 40% do peso TOTAL DO MATERIAL. Seja  $\varepsilon$  essa abertura.

O coeficiente de uniformidade é definido como sendo a relação entre a abertura da peneira que retem 40% e a abertura da peneira que retem 90%

$$\text{COEFICIENTE UNIFORMIDADE} = \frac{\text{ABERTURA DA PENEIRA QUE RETEM 40\%}}{\text{ABERTURA DA PENEIRA QUE RETEM 90\%}} = \frac{\varepsilon}{\theta}$$

Vamos ver como se determinam êsses dois coeficientes. Seja uma amostra de areia seca que se quer estudar. Feita a pesagem achou-se um peso de 350 gramas. Colocadas as peneiras em ordem crescente das aberturas de baixo para cima e feita a peneiragem, obteve-se o resultado do quadro I. Do quadro I se infere que a peneira que retem 90% esta compreendida entre as peneiras 100 e 48 ou seja o tamanho efetivo está compreendido entre 0,147 e 0,295 milímetros.

Para se determinar o seu valor exato é necessário desenhar a curva (ABERTURA — % ACUMULADO) e determinar pelo gráfico o ponto  $\theta$  figura I.



QUADRO I

Malhas por Polegada	Abertura milímetros	Retido gramos	Acumulado gramos	Retido %	Acumulado %
10	1,651	14,00	14,00	4	4
14	1,168	35,00	49,00	10	14
20	0,833	66,50	115,50	19	33
28	0,589	94,50	210,00	27	60
35	0,417	70,00	280,00	20	80
48	0,295	28,00	308,00	8	88
100	0,147	28,00	336,00	8	96
Residuo	—	14,00	350,00	4	100
		350,00		100	

A peneira que retem 40% também é determinada pelo mesmo modo. PONTO  $\epsilon$  figura I. Pelo gráfico vemos que o tamanho efetivo, ponto  $\theta$  é igual a 0,280 e a peneira que retem 40%, ponto  $\epsilon$ , é igual a 0,75 donde se conclúe que o coeficiente de uniformidade é

$$\text{COEFICIENTE UNIFORMIDADE} = \frac{0,75}{0,28} = 2,68$$

### VIII — MÓDULO DE FINURA

ABRAHAM definiu como módulo de finura de uma areia a soma dos acumulados percentuais das peneiras 14-28-48 e 100, dividido por 100.

Seja uma areia representada pelo quadro II

QUADRO II

Malhas por polegada	Abertura Milímetros	Retida %	Retida Pen. 14-28-48-100	Acumulada Pen. 14-28-48-100
10	1,651	8,8	—	—
14	1,168	12,0	20,8	20,80
20	0,833	32,0	—	—
28	0,589	20,0	52,0	72,80
35	0,417	14,4	—	—
48	0,295	8,0	22,4	95,20
100	0,147	4,0	4,0	99,20
Resíduo	—	0,8	—	—
		100,0		288,00

O módulo de finura é  $\frac{288,00}{10} = 2,88$

O módulo de finura ou de ABRAHAM pode ser definido pela equação (I). Com efeito sejam  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  e  $P_4$  os pêsos percentuais retiros nas peneiras 100-48-28-14. Vide Quadro III.

A sôma dos acumulados é

QUADRO III

Malha por Polegada	Abertura Milímetro	Retido	Acumulado
14	1,168	$P_4$	$P_4$
28	0,589	$P_3$	$P_4 + P_3$
48	0,295	$P_2$	$P_4 + P_3 + P_2$
100	0,147	$P_1$	$P_4 + P_3 + P_2 + P_1$
Resíduo	—	$P_0$	

$$\text{Soma Acumulado} = P_4 + (P_4 + P_3) + (P_4 + P_3 + P_2) + (P_4 + P_3 + P_2 + P_1)$$

ou

$$= 4 P_4 + 3 P_3 + 2 P_2 + P_1$$

onde o módulo M

$$M = \frac{4 P_4 + 3 P_3 + 2 P_2 + P_1}{100} \quad (1)$$

Pela relação (1) vê-se que no módulo de finura de ABRAHAM, o retido da peneira 14 entra 4 vezes, o da peneira 28 entra 3 vezes, etc. Vê-se, assim, que o módulo é um conceito arbitrário e não exprime exatamente o grau de finura da areia. Pela fórmula, deduz-se facilmente que uma areia de granulação única, retida pela peneira 100 teria o módulo 1

$$M = \frac{P}{100} = \frac{100}{100} = 1$$

A areia retida totalmente pela peneira n.º 14 teria o módulo

$$M = \frac{4P}{100} = \frac{400}{100} = 4 \text{ etc.}$$

Do mesmo modo que o módulo de finura não define exatamente uma areia, o mesmo se dá com o tamanho efetivo e o coeficiente de uniformidade. As análises granulométricas expressas no quadro 4, mostram dois tipos de areia de finura diferentes, embora de mesmo tamanho efetivo e coeficiente de uniformidade. Isto mostra que estes dois parâmetros não dão indicação precisa da areia.

QUADRO IV

Malha	Abertura	AREIA I			AREIA II		
		Retida	Retida 14-28-48-100	Acumulada	Retida	Ret. P 14-28 etc.	Acumul.
10	1,651	30	—	30	5	—	5
14	1,168	5	35	35	5	10	10
20	0,833	5	—	40	30	—	40
28	0,589	40	45	80	2	32	42
35	0,417	5	—	85	2	—	44
48	0,295	5	10	90	46	48	90
100	0,147	8,8	8,8	98,8	5	5	95
Residuo		1,2			5		
		100,0			100,0		

Ambas as areias têm o tamanho efetivo igual a 0,295 e coeficiente de uniformidade igual a 2,82, apesar de serem de grossuras diferentes.

A simples inspeção mostra que a areia I é mais grossa que a areia II. A primeira tem um módulo 3,038 e a segunda 2,37.

$$M = \frac{4P_4 + 3P_3 + 2P_2 + P_1}{100} = 3,038$$

Mais tarde iremos indicar um parâmetro que melhor defina a granulação da areia.

#### IX — VELOCIDADE DE FILTRAÇÃO

A quantidade de água que passa, na unidade de tempo, através de uma camada de areia chama-se velocidade de filtração. Essa quantidade depende dos seguintes fatores:

- granulação da areia
- temperatura da água
- espessura da camada de areia
- altura da água no filtro
- compactação da areia

O escoamento da água através do leito de areia é do tipo do escoamento de um líquido num tubo capilar de diâmetro  $D$ . Sendo o escoamento de regime Poisele, depende da viscosidade  $\Gamma$  e da densidade  $\rho$  e pode ser escrito

$$\tau = \frac{4\theta}{\gamma} \Gamma \frac{V}{D^2}$$

Em que  $\tau$  é a perda de carga

$\rho$  = densidade  $\gamma = \rho g$

$V$  = velocidade

$\Gamma$  = coeficiente de viscosidade

$\theta$  = coeficiente

Para esse regime, com baixas velocidades é válida a lei Darcy

$V = K\tau$ , onde que  $K$  é uma constante (permeabilidade)

Para  $\tau = 1$ ,  $V = K$ .  $K$  é, pois, uma velocidade para a perda de carga unitária.

De  $V = K\tau$  temos

$$K = \frac{V}{\tau} = \frac{V}{\frac{4\theta}{\gamma} \Gamma \frac{V}{D^2}} = C \frac{\gamma}{\Gamma} D^2$$

Vê-se, assim, que a permeabilidade é função do quadrado dos diâmetros capilares (grãos de areia).

O primeiro a determinar o valor da constante  $C$  para o caso dos filtros de areia foi Hazen, que, após uma série de observações, pode caracterizar o coeficiente  $C$ , estabelecendo, para tal fim o "diâmetro" teórico dos grãos, compreendido entre os grãos menores e maiores. Já vimos que esse diâmetro é o tamanho efetivo.

#### X — FÓRMULA DE HAZEN

A fórmula de Hazen é: —

$$K = 0,00151 \frac{\gamma}{\Gamma} D_e^2$$

em que  $D_e$  é o tamanho efetivo.

Da fórmula acima, se infere a importância do grão menor no fenômeno do escoamento.

A permeabilidade da areia é uma dependência quasi que exclusiva desses elementos. Daí a razão que levou Hazen a exprimir a sua fórmula em função desse fator.

Assim, os 10% do elemento fino definem a permeabilidade.

Para dar uma indicação normativa dos 90% restantes, Hazen criou o coeficiente de uniformidade.

A fórmula de Hazen pode, também, ser escrita

$$V = C D_e^2 \frac{h}{L} \left( \frac{t+10}{60} \right)$$

onde  $V$  é igual a velocidade da água em metros por dia,

$C$  é um coeficiente variando de 700 a 1000 para as areia novas e limpas e com tamanho bem uniforme, e 400 para areia suja e compactada

- $D_e$  = tamanho efetivo  
 $h$  = altura da água  
 $L$  = espessura da camada de areia  
 $t$  = temperatura em graus Farenheit

A fórmula mostra que a temperatura passando de 32° para 74°, a velocidade dobra de valor.

Para uma aplicação da fórmula de Hazen, vamos admitir uma areia de tamanho efetivo de 0,40, sendo a sua espessura de 1,00 e altura de água 1,20. Para uma temperatura de 40° Farenheit e tomando o coeficiente  $C = 700$ , teremos

$$V = 700 \times 0,4^2 \times \frac{1,20}{1,00} \left( \frac{40 + 10}{60} \right) = 112 \text{ metros por dia}$$

Isto dará para uma secção de 1 metro quadrado de superfície.

$$\begin{aligned}
 Q &= \frac{112 \times 1}{86400} \times 1000 = 1,3 \text{ litros por metro quadrado por segundo.} \\
 &= 1,30 \frac{LM^2}{S}
 \end{aligned}$$

#### XI — FÓRMULA DE SLICHTER

Levar em conta na fórmula da permeabilidade apenas o coeficiente  $D_e$  (tamanho efetivo), é pôr de lado o fator relativo ao adensamento dos grãos da areia que tem notavel influência no valor da permeabilidade.

Para levar isso em consideração, Slichter introduziu um novo parâmetro, que é a *Porosidade*.

Por porosidade se entende a relação entre o volume dos vazios existentes na areia e o volume total desta.

Partindo de considerações teóricas, êle achou que a porosidade podia variar de 47,6 a 25,9 por cento.

A expressão Slichter é a seguinte:

$$K = \frac{\gamma}{(1 - p_o) B} D_m^2 = \frac{A}{\Gamma C} D_m^2$$

onde  $C = B(1 - p_o)$  é uma função de  $p_o$ .

Segundo o autor, para  $p_o$  igual a 0,28 0,32 0,36 0,40 0,44

$C$  é igual a 66 42 29 20 15

A constante  $A$  assume o valor igual a 0,102 quando  $D_m$  for expresso em centímetros e  $\Gamma$  em  $\frac{K \times S}{M^2}$

Tem, então, para  $K$

$$K = \frac{0,102}{\Gamma C} D_m^2$$

sendo o valor de  $\Gamma$  igual a

$$\Gamma = \frac{0,000181}{(1 + 0,0337 \theta + 0,00022 \theta^2)} \frac{K \times S}{M^2}$$

para  $\theta = 10$  o valor é  $\Gamma = 0,00013$

Assim, para uma areia de  $D_m$  igual a 0,3 milímetros e para a água a 10° de temperatura e o vazio de 40% na areia, termos:

$$K = \frac{0,102}{0,00013 \times 20} \times 0,03^2 = 0,035 \text{ C por segundo.}$$

Q U A D R O V  
GRADUAÇÃO PARA AREIA DE FILTROS USADA EM DIFERENTES CIDADES AMERICANAS

No quadro não estão incluídos detalhes completos de todos os casos.  
Informações fornecidas pelas divisões sanitárias de várias cidades durante 1928

Cidades	Tamanho eficiente m. m.	Coeficiente de Uniformidade	Tamanho máximo		Tamanho mínimo	
			Abertura da peneira m. m.	Mínimo passando p. cento	Abertura da peneira m. m.	Máximo passando p. cento
Atlanta, Ga	0,36-0,44	menor que 1,5	1,0	100	0,20	0,2
Birmingham, Ala	0,35-0,40	1,5	—	—	—	—
Buffalo, N. Y.	0,38-0,45	—	—	—	—	—
Chicago, Ill (a)	0,45-0,60	1,3-1,65	—	—	—	—
Cincinnati, O	0,34-0,38	menor que 1,70	—	—	—	—
Cleveland O	0,35-0,42	menor que 1,70	—	—	0,20	1,0
Detroit, Mich.	0,40-0,45	menor que 1,60	—	—	—	—
Grand Rapids, Mich.	0,35-0,44	menor que 1,65	0,8	95	0,20	0,2
Hartford, Conn.	0,25-0,35	menor que 3,0(b)	5,0	100	0,13	1,0
Kansas City, Mo.	0,40-0,50	menor que 1,65	0,80	90	0,20	0,2
Indianapolis Ind.	0,35-0,40	1,75-2,00	—	—	—	—
Louisville, Ky	0,40-0,50	—	—	—	—	—
Minneapolis Minn.	0,40-0,50	aprox. 1,55	—	—	—	—
New Haven Conn.	0,25-0,35	menor que 2,5	—	—	—	—
Oklahoma City, Okla	0,35-0,42	menor que 1,65	—	—	—	—
Philadelphia, Pa	0,30-0,45	menor que 1,75	—	—	—	—
Reading, Pa (c)	0,27- —	1,50	—	—	—	—
Richmond, Va	0,38-0,45	menor que 1,50	0,80	90	0,20	0,2
Sacramento Calif	0,33-0,42	menor que 1,50	0,80	90	0,28	1
St. Louis, Mo	0,40-0,50	menor que 1,65	1,2	95	0,25	1/4
St. Paulo Minn	0,36- —	1,75	—	—	—	—

(a) Especificações para um filtro experimental. (b) Condição especial para coeficiente de uniformidade dado por areias de diferentes tamanhos eficientes.  
(c) Valores para as areias atualmente em uso.



Na determinação da permeabilidade  $K$  para a fórmula acima, mede-se o volume escoado através da secção  $S$  da areia, para uma perda de carga igual a  $\tau = 1$ , isto é, a água tem a mesma altura que o leito filtrante. Ora, a secção realmente atravessada pela água não é  $S$ , mas sim uma percentagem dessa secção

$$p_0 = \frac{S_0}{S} \therefore S = \frac{S_0}{P_0} \quad S_0 \text{ é uma fração de } S$$

Daí, para se obter a velocidade  $V$  de escoamento, temos que escrever

$$V = \frac{K}{P_0} = \frac{0,035}{0,40} = 0,087 \text{ C por segundo}$$

## XII — GRANULAÇÃO DE AREIA PARA FILTROS

O quadro V mostra o tipo de granulação usado em certas cidades americanas. Na Europa é usada a granulação do quadro VI.

QUADRO VI

Cidade	Tamanho efetivo	Coefficiente Uniformidade
Londres .....	0,34 a 0,4	2,00 a 3,6
Berlim .....	0,33 a 0,38	1,50 a 2,0
Hamburgo .....	0,28 a 0,34	2,00 a 2,5
Altona .....	0,32 a 0,37	2,00 a 2,8
Zurick .....	0,28 a 0,30	3,10 a 3,3
Braslau .....	0,39	1,8
Amsterdan .....	0,17	1,6

De uma maneira geral a granulometria deve ser a seguinte:

Até 1% deve ser menor que 0,13 ml. de diâmetro.

Até 10% deve ser menor que 0,26 ml. de diâmetro.

Pelo menos 10% deve ser menor que 0,34.

Pelo menos 60% deve ser menor que 0,83.

Nenhuma partícula deve ser maior que 5,00 milímetros.

**PROBLEMA I** — Determinar a composição de uma areia que tenha o tamanho efetivo  $\theta = 0,40$  e o coeficiente de uniformidade  $\epsilon$  igual a 1,5.

Por definição,  $1,5 = \frac{\epsilon}{\theta} \therefore \epsilon = 1,5 \times 0,4 = 0,6$

ABERTURA PENEIRA QUE RETEM 40% é igual a 0,6

ABERTURA PENEIRA QUE RETEM 90% é igual a 0,4

Sejam  $P_7$ ,  $P_6$ , etc as quantidades retidas em cada peneira. Na coluna das acumuladas (vide quadro n.º VII) devemos ter 40% para a malha 0,60 e 90% para a malha 0,4. Vamos inserir estas duas peneiras teóricas.

Chamemos  $\alpha$  a percentagem correspondente ao peso  $P_4$  que fica compreendido entre as peneiras ns. 28 e 0,60

Assim  $\alpha P_4$  é o material compreendido entre as peneiras 28 e 0,60  
 (1 — )  $P_4$  " " " " " 0,60 e 20

QUADRO VII

Pen.	AB	Retido	Acumulado		
				Peneira 20	0,833
				" 28	0,589
				Dif.	0,244
10	1,651	$P_7 = 10$		Peneira 0,6	0,600
14	1,168	$P_6 = 10$		" 28	0,589
20	0,833	$P_5 = 10$		Dif.	0,011
—	0,60		40		
28	0,589	$P_4 = 10,45$	40,45		
35	0,417	$P_3 = 48,92$	89,37		
—	0,40		90	$\alpha = \frac{0,011}{0,244} = 0,045$	
48	0,295	$P_2 = 4,63$	94,00		
100	0,147	$P_1 = 4,00$	98,00		
RES		$P_0 = 2,00$	100,00	$1 - \alpha = 0,955$	

Chamando  $\beta$  a porcentagem do pêsco  $P_2$  compreendido entre as peneiras 0,295 e 0,400, teremos:

$$\beta = \frac{0,417 - 0,295}{0,400 - 0,295} = \frac{0,122}{0,105} = 0,863$$

$$1 - \beta = 0,137$$

Podemos escrever  $P_7 + P_6 + P_5 + (1 - \alpha) P_4 = 40$

$$\text{ou } P_7 + P_6 + P_5 + 0,955 P_4 = 40$$

Podemos fazer arbitrariamente  $P_7 = P_6 = P_5 = 10\%$

ou

$$30 + 0,955 P_4 = 40$$

$$P_4 = \frac{10}{0,955} = 10,45$$

A soma dos acumulados até a peneira 28 sendo 40,45, podemos escrever

$$P_3 + (1 - \beta) P_2 = 90 - 40,45 = 49,55$$

ou

$$P_3 + 0,137 P_2 = 49,55 \quad (a)$$

Porém

$$P_3 + P_2 + P_1 = 98 - 40,45 = 57,55 \quad (b)$$

Temos, assim, um sistema de 2 equações "a" e "b" a 3 incógnitas

$$P_3 + 0,147 P_2 = 49,55$$

$$P_3 + P_2 + P_1 = 57,55$$

Eliminando  $P_3$  e fazendo arbitrariamente  $P_1 = 4$ , vem

$$P_2 = \frac{4}{0,863} = 4,63$$

Conhecidos  $P_1$  e  $P_2$ , acha-se  $P_3 = 48,92$

A composição da areia é, pois,

$P_7 =$	10,00
$P_6 =$	10,00
$P_5 =$	10,00
$P_4 =$	10,45
$P_3 =$	48,92
$P_2 =$	4,63
$P_1 =$	4,00
$P_0 =$	2,00
	100,00

As quantidades  $P_7$ ,  $P_6$  e  $P_5$  podem variar arbitrariamente, contanto que a sua soma não ultrapasse de 40% de valor.

### XIII — ALTURA DOS LEITOS FILTRANTES

A velocidade de filtração sendo uma função da altura da camada filtrante, essa altura deve ter apenas o mínimo necessário para garantir uma boa qualidade da água filtrada com a devida segurança. Os leitos filtrantes de menor granulação podem ser de menor altura. Esses leitos oferecem mais perda de carga e são de mais fácil colmatção. Para uma areia de tamanho eficiente 0,35 e um coeficiente uniformidade 2,00 Elms especificava uma altura de 30 a 40 polegadas.

### XIV — ALTURA DA ÁGUA NOS LEITOS DE FILTRAÇÃO

A altura dessa água é, geralmente, de 90 a 150 centímetros. A variação da perda de carga e altura nos leitos de filtração acarreta uma variação no volume EFLUENTE, havendo necessidade de aparelhos reguladores.

### XV — PERDAS DE CARGA PERMITIDAS

À medida que a areia vai retendo as impurezas da água a sua perda de carga vai aumentando.

A perda de carga poderá atingir um limite de ordem tal que não permita mais a passagem de água com a vazão prevista.

É necessário, pois, lavar os filtros antes desse limite ser atingido. O conhecimento dessa perda de carga limite nos permite conhecer o estado do filtro e prever o período que se pode operá-lo com segurança.

O acréscimo desnecessário ou exagero de perda de carga traz como consequência a deterioração da água filtrada. Além disso, a colmatção exagerada da camada filtrante produz uma sub-pressão com a consequente entrada de ar na sua parte inferior.

São bastante conhecidos os efeitos desse colchão de ar que destrói a camada filtrante, criando as rachaduras de menor resistência, (VULCÕES), por onde passa todo o volume sem a devida filtração. O limite necessário atingido pela perda de carga para que um filtro deva ser lavado é um valor a ser determinado para cada tipo de filtro, levando-se em conta as suas características.

Inúmeros são os fatores que influenciam esse valor, tais como natureza do material dissolvido na água, finura e espessura da camada filtrante, flutuações na velocidade da filtração, etc.

Na prática americana esse valor vai de 18 a 72 polegadas. Nas estações dotadas de aparelhos reguladores de vazão, o valor médio da perda de carga é de 4 a 6 pés, embora a tendência moderna seja a de reduzir esses valores. Ao técnico compete, para cada caso particular, estudar a conveniência da maior ou menor frequência de lavagem dos filtros. Esse índice fica também equacionado à questão de custo e gasto de água de lavagem.

QUADRO VIII  
GRADUAÇÃO DE PEDREGULHO PARA FILTROS DE PURIFICAÇÃO DE ÁGUAS

Cidade	Camada Inferior		Segunda Camada		Terceira Camada		Quarta Camada		Camada Superior	
	Espessura da Camada Poll	Tamanho do pedregulho Poll	Espessura da Camada Poll	Tamanho do pedregulho Poll	Espessura da Camada Poll	Tamanho do pedregulho Poll	Espessura da Camada Poll	Tamanho do pedregulho Poll	Espessura da Camada Poll	Tamanho do pedregulho Poll
Birmingham, Ala .....	—	1 a 2	—	$\frac{1}{2}$ a $\frac{3}{4}$	—	$\frac{1}{4}$ (a)	—	—	—	—
Cleveland, Ohio .....	—	$\frac{3}{4}$ a $1\frac{1}{2}$	—	$\frac{1}{4}$ a $\frac{3}{4}$	—	$\frac{1}{8}$ a $\frac{1}{4}$	—	$\frac{1}{16}$ a $\frac{1}{8}$	—	—
Grand Rapids, Mich .....	8	2	3	1	2	$\frac{1}{2}$	2	$\frac{1}{4}$	2	$\frac{1}{8}$
Hartford, Conn. ....	7	1 a 2	$2\frac{1}{2}$	$\frac{3}{8}$ a 1	$2\frac{1}{2}$	$\frac{1}{8}$ a $\frac{3}{8}$ (a)	—	—	—	—
Kansas City, Mo .....	4	$1\frac{1}{2}$ a $2\frac{1}{2}$	4	1 a $1\frac{1}{2}$	4	$\frac{1}{2}$ a 1	3	$\frac{1}{4}$ a $\frac{1}{2}$	3	$\frac{1}{12}$ a $\frac{1}{4}$
Memphis, Tenn .....	7	1 a $2\frac{1}{2}$	4	$\frac{5}{8}$ a 1	2	$\frac{3}{8}$ a $\frac{5}{8}$	2	$\frac{3}{16}$ a $\frac{3}{8}$	3	N. 10 $\frac{3}{16}$
Philadelphia, Pa .....	6	1 a 2	3	$\frac{1}{2}$ a 1	3	$\frac{1}{4}$ a $\frac{1}{2}$	3	$\frac{1}{8}$ a $\frac{1}{2}$	3	N. 12a $\frac{1}{8}$
Richmond, Va .....	7	1 a $2\frac{1}{2}$	4	$\frac{5}{8}$ a 1	2	$\frac{3}{8}$ a $\frac{5}{8}$	2	$\frac{3}{16}$ a $\frac{3}{8}$	1	N. 10a $\frac{3}{16}$
Washington, D. C. ....	5	$1\frac{3}{4}$ a $2\frac{1}{2}$	6	$\frac{3}{4}$ a $1\frac{3}{4}$	6	$\frac{1}{4}$ a $\frac{3}{4}$	2	$\frac{1}{8}$ a $\frac{1}{4}$	1	$\frac{1}{2}$ a $\frac{1}{8}$

(a) Camada superior

## XVI — PEDREGULHOS

Em certos tipos de filtros se emprega o pedregulho como suporte para a camada de areia. As camadas de pedregulhos são dispostas na razão decrescente dos seus diâmetros, a partir da base para cima.

A função desse pedregulho além de suporte é dar maior distribuição da água, principalmente no período da lavagem. Nos filtros em que se empregam os drenos inferiores com boa distribuição (Nozzles) é dispensada esta prática. A granulação geralmente usada nas estações de tratamento americanas é do quadro n.º VIII.

Somos de parecer que as instalações das bacias de filtração devam ser as do tipo de drenos inferiores (Nozzles), sendo estes drenos distribuídos de modo a se evitar a camada de pedregulho e apenas munidas de duas calhas laterais de coleta colocadas fora da área de filtração.

Tem essa disposição a vantagem de permitir a fácil e rápida retirada de toda a camada filtrante, toda vez que fôr necessário fazer uma limpeza intensiva e total da camada filtrante. É valiosa a opinião de técnicos que já tiveram ocasião de presenciar os efeitos desastrosos que certos tipos de algas vêm causando nas areias de algumas estações de tratamento.

Em Campinas, que julgamos ter a melhor operada estação de tratamento de água do Brasil, quiçá do mundo, o seu ilustre Diretor, Eng. Alfredo Sizenando Ribeiro, criou dispositivos especiais para a retirada mecânica total da camada filtrante, tal a frequência com que ela é lavada.

É do nosso conhecimento o parecer do Prof. José M. de Azevedo Netto, do DAE, que vêm estudando há algum tempo os efeitos das algas sobre as instalações de tratamento. Azevedo Netto mencionou o fato de que na prática inglesa geralmente não são adotadas as calhas de lavagem: as águas vertem ao longo das paredes no sentido do comprimento dos filtros.

## XVII — MÓDULO DE SUPERFÍCIE

Ja vimos a influência da granulação no valor da permeabilidade da areia. As fórmulas mostram que o escoamento é quasi uma dependência exclusiva dos diâmetros de menor tamanho. Sendo, pois, capital a influência dos quadrados dos diâmetros, tanto na fórmula de Hazen, como na de Slichter, vamos tentar exprimir a permeabilidade em função não apenas de um determinado "diâmetro", mas, sim, em função de todos os diâmetros da areia.

Para tal, vamos admitir as partículas da areia como esferas.

Feito o peneiramento de um determinado peso de areia num conjunto de peneiras, obteve-se o resultado do quadro n.º IX.

QUADRO IX

Peneira	Abertura	Retido
10	D <sub>5</sub>	P <sub>4</sub>
14	D <sub>4</sub>	P <sub>3</sub>
28	D <sub>3</sub>	P <sub>2</sub>
48	D <sub>2</sub>	P <sub>1</sub>
100	D <sub>1</sub>	P <sub>0</sub>

Seja P<sub>0</sub> o peso do material que passou pela peneira D<sub>1</sub>, P<sub>1</sub> o que passou pela peneira D<sub>2</sub>, etc.

Sejam  $N_0, N_1, N_2$  etc. os números de grãos de areia contidos nos pêsos retidos  $P_0, P_1, P_2$ , etc.

A superfície de cada grão de diâmetro  $D$  é dado por  $S = \pi D^2$ .

A superfície de todos os grãos contidos em  $P_0$  é

$$S_0 = N_0 \pi D_1^2$$

Superfície de todos os grãos contidos em  $P_1$  é

$$S_1 = N_1 \pi D_2^2 \text{ etc.}$$

A superfície total de todos os grãos será

$$S = N_0 \pi D_1^2 + N_1 \pi D_2^2 + N_2 \pi D_3^2 + \dots$$

$$S = \pi (N_0 D_1^2 + N_1 D_2^2 + N_2 D_3^2 + \dots) \quad (1)$$

Sendo  $V_1 = \frac{\pi D_1^3}{6}$  o volume de cada grão de diâmetro  $D_1$  e  $\gamma$  o peso específico da areia, vem

$$P_0 = N_0 \frac{\pi D_1^3}{6} \times \gamma \quad \therefore N_0 = \frac{P_0}{\frac{\pi D_1^3 \gamma}{6}}$$

substituindo os valores de  $N$  na equação (1), resulta

$$S = \pi \left[ \frac{P_0 D_1^2}{\frac{\pi D_1^3 \gamma}{6}} + \frac{P_1 D_2^2}{\frac{\pi D_2^3 \gamma}{6}} + \frac{P_2 D_3^2}{\frac{\pi D_3^3 \gamma}{6}} + \frac{P_3 D_4^2}{\frac{\pi D_4^3 \gamma}{6}} + \dots \right]$$

$$S = \frac{6}{\gamma} \left[ \frac{P_0}{D_1} + \frac{P_1}{D_2} + \frac{P_2}{D_3} + \frac{P_3}{D_4} + \dots \right] \quad (2)$$

No caso particular em que a abertura de cada peneira é o dobro da imediatamente maior, tem-se

$$D_2 = 2 D_1$$

$$D_3 = 4 D_1$$

$$D_4 = 8 D_1$$

etc. então

$$S = \frac{6}{\gamma D_1} \left[ P_0 + \frac{P_1}{2} + \frac{P_1}{4} + \frac{P_3}{8} + \dots \right] \quad (3)$$

em que os termos dentro do parâmetro representam a fórmula de TYLER. O coeficiente  $S$  da fórmula (2) é uma superfície, conforme mostra a equação de homogeneidade.

$$S = \frac{6}{\gamma} \left[ \frac{P}{D} \right] = \frac{6}{\frac{M}{L^3}} \times \frac{M}{L} = L^2$$

Tyler chamou a expressão  $S$  de módulo de superfície.

Substituindo  $D_1, D_2, D_3$ , etc. pelos seus valores, a equação (2) dá

$$S = c (6,8 P_0 + 3,4 P_1 + 2,4 P_2 + 1,7 P_3 + 1,2 P_4 + 0,86 P_5 + 0,6 P_6 + 0,43 P_7) \quad (4)$$

A fórmula (4) mostra que o campo de variação do módulo da superfície é muito grande, de acôrdo com cada tipo de areia. Assim, para uma areia composta de grãos compreendidos entre as peneiras 10 e 14

$$S_6 = 0,6 \times 100 = 60 C$$

O valor de  $S_0$  ou seja da areia passado pela peneira 100 é  $S_0 = 680$ .

As areias de números *I* e *II*, do quadro n.º *IV*, de mesmo tamanho efetivo e coeficientes de uniformidade têm respectivamente os seguintes módulos de superfície

$$S_1 = 119,26$$

$$S_2 = 196,3$$

XVIII)

## FÓRMULA DE TYLER

Tyler estabeleceu entre o módulo de superfície de areia e a perda de carga a seguinte relação:

$$h = 0,00099 S^{2,25} Q$$

em que  $S$  é o módulo de superfície da areia,

$h$  é a perda de carga em pé por pé de camada de areia,

e  $Q$  a vazão em galões por minuto e por pé quadrado do leito filtrante.

XIX)

## FÓRMULA DO D.A.E.

Determinado o módulo de superfície pelo método por nós já enumerado, é possível exprimir a vazão de um leito de filtração pela fórmula seguinte:

$$Q = \frac{10^6}{S^n} \times \frac{h}{l}$$

em que  $Q$  é a vazão, expressa em litros por segundo por metro quadrado de área filtrante,

$S$  é o módulo de superfície.

$n$  um coeficiente a ser determinado variando em tôrno de 2,3

$h$  a altura d'água

$l$  a altura do leito filtrante.

Estamos tentando determinar experimentalmente o campo de variação do número  $n$ , variando os valores de  $S$  e mantendo constante a temperatura da água. Graças a nímia gentileza da Firma Binyngton & Cia. que prontificou a fornecer um filtro modêlo para provas, e a colaboração de ilustres colegas dêste Departamento, esperamos em breve publicar a série de observações obtidas.

XX) Na elaboração dêste artigo, além das diversas obras sôbre o assunto, foi consultado o excelente artigo, *Areia para Filtros*, do saudoso Eng. Rodolpho Guimarães Valadão, ex-diretor dêste Departamento.