



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

47
2 EJ

FACULTAD DE INGENIERÍA

“MODELACIÓN MATEMÁTICA Y CALIBRACIÓN DE
UN MÉTODO DE LAVADO DE
FILTROS PROFUNDOS”

TESIS

que para obtener el título de

INGENIERO CIVIL

presenta

Cecilia Chávez Lavala

Directora de tesis

Dra. Blanca E. Jiménez Cisneros



FALLA DE ORIGEN

Ciudad Universitaria, D.F., septiembre de 1995.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-1-172/94

Señorita
CECILIA CHAVEZ ZAVALA
Presente.

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso la profesora **DRA. BLANCA E. JIMENEZ CISNEROS**, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**.

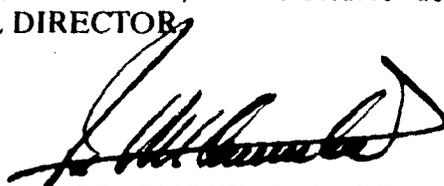
**"MODELACION MATEMATICA Y CALIBRACION DE UN METODO DE LAVADO DE
FILTROS PROFUNDOS"**

- I. INTRODUCCION**
- II. REVISION BIBLIOGRAFICA**
- III. DESARROLLO DEL MODELO MATEMATICO**
- IV. METODOLOGIA EXPERIMENTAL**
- V. RESULTADOS Y ANALISIS**
- VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**
- VII. BIBLIOGRAFIA**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, a 28 de octubre de 1994.
EL DIRECTOR


ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

u. JMCS/RCR*nl1

*D*edicatorias

*Nadie nunca dijo que la vida sería fácil,
a veces parece tan injusta,
pero los altibajos de la vida
nos hacen mejores y más fuertes,*

*Gracias Padre por ser el impulsor de esa gran fortaleza,
por tu prudencia, por tu amor, por tu fidelidad, por tus alegrías, por tus tristezas, por
tus triunfos y fracasos, por tu gran sabiduría en cada acción tuya,
por que no me diste el pez, sino tus experiencias para atraparlo,
por enseñarme a vivir viva.*

*Y que aunque extraño mucho
tu presencia física, sé
que en todo momento estas conmigo.*

*Gracias Padre por ser el mejor amigo,
Gracias amigo por ser el mejor Padre.*

A ti este logro.

A mi madre,
por ser ejemplo de virtud,
mujer por excelencia,
por que sigas cosechando
lo mucho que sembraste
a lado de mi Padre.

A todos mis hermanos,
por compartir juntos las carencias
y abundancias que nos da la vida.

A Laura, Genaro y
Alonso, por la alegría de vivir.

A mis amigos de siempre

Andrés, Mony,

Enrique, Juan,

Claudia, Ivette,

Genaro, Tony,

Luis, Marco,

Por todo lo vivido a lado de cada uno.

Agradecimientos

Mi agradecimiento

A la Universidad Nacional Autónoma de México por abrirme sus puertas al saber humano.

Al Instituto de Ingeniería por el apoyo recibido en todo lo necesario para la elaboración de esta tesis.

Muy especial a la Dra. Blanca Elena Jiménez Cisneros, por el apoyo, asesoramiento y guía para la realización de esta investigación, con todo el respeto, cariño y admiración que ha despertado en mí su incansable labor.

A José Antonio Barrios Pérez por la invitación y motivación a la elaboración de este proyecto.

A Luis López Villanueva por la enseñanza y paciencia brindada en cada etapa de este trabajo.

A José Luis Aldana, Noé Estévez Leal, Carlos Rosendo Flores Torres, Marco Antonio Peña Ramírez y al Señor Pedro Trinidad Nicolás por su colaboración en el proceso constructivo del modelo físico.

A Nonantzin López Alcántara y Luis Gilberto Torres Bustillos, por su ayuda brindada a la revisión del documento en sus primeras impresiones.

Contenido

CONTENIDO

	PAG
LISTA DE FIGURAS	VI
LISTA DE TABLAS	X
LISTA DE FOTOS	XII
NOTACIÓN	XIII
RESUMEN	XIV
1. INTRODUCCIÓN	1
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA:	5
2.1 FUNDAMENTOS DE LA FILTRACIÓN:	6
2.1.1 ANTECEDENTES	6
2.1.2 CLASIFICACIÓN DE FILTROS	8
2.1.2.1 Filtración Superficial	8
2.1.2.2 Filtración a Profundidad	9
2.1.2.2.1 Filtros a gravedad o a ciclo abierto	9
2.1.2.2.2 Filtros a presión	10
2.1.2.2.3 Filtros lentos	10
2.1.2.2.4 Filtros rápidos	11
2.1.2.2.5 Filtro convencional	13
2.1.2.2.6 Filtros directos o de coagulación por contacto	13

2.1.2.2.7	Flujo ascendente	13
2.1.2.2.8	Flujo descendente	14
2.1.2.2.9	Sistema de biflujo	15
2.1.2.2.10	Medio filtrante simple	15
2.1.2.2.11	Medio filtrante múltiple	16
2.2	FACTORES QUE INFLUYEN EN LA EFICIENCIA DEL LAVADO	17
2.2.1	<i>ABRASIÓN</i>	17
2.2.2	<i>DURACIÓN DEL LAVADO</i>	17
2.2.3	<i>GRADIENTE DE VELOCIDAD</i>	19
2.2.4	<i>EFFECTOS DE LA TEMPERATURA</i>	21
2.2.5	<i>ADICIÓN DE REACTIVOS</i>	23
2.3	MÉTODOS DE LAVADO	23
2.3.1	<i>LAVADO CON AGUA</i>	24
2.3.2	<i>LAVADO CON AGUA Y AIRE</i>	24
2.3.3	<i>LAVADO PREVIO CON AIRE</i>	25
2.3.4	<i>LAVADO CON AIRE Y AGUA SIMULTÁNEOS</i>	26
2.3.5	<i>MÉTODOS AUXILIARES DE LAVADO</i>	27
2.4	FILTROS PILOTO	28
2.4.1	<i>COLUMNAS DE FILTRACIÓN</i>	29
2.4.2	<i>SISTEMA DE ENTRADA</i>	30
2.4.3	<i>SISTEMA DE CONTROL</i>	30
2.4.4	<i>SISTEMA DE LAVADO</i>	31
2.4.5	<i>SISTEMAS DE MEDICIÓN DE TURBIEDAD</i>	31
2.4.6	<i>PIEZÓMETROS</i>	31
2.5	CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO	32
2.6	TEORÍA DE LA DIFUSIÓN	36
3.	DESARROLLO DEL MODELO MATEMÁTICO	42
3.1	DESCRIPCIÓN Y MODELACIÓN DEL MÉTODO DE LAVADO PROFUNDO	43

4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	52
4.1 DISEÑO DE LOS FILTROS	53
4.1.1 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN	53
<i>4.1.1.1 Solución empleada</i>	<i>53</i>
<i>4.1.1.2 Tanque mezclador</i>	<i>55</i>
4.1.2 SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN	57
4.1.3 SISTEMA DE FILTRACIÓN	57
<i>4.1.3.1 Columnas de filtración</i>	<i>57</i>
<i>4.1.3.2 Materiales de empaque</i>	<i>57</i>
4.1.3.2.1 Grava y arena	57
4.1.4 SISTEMA DE LAVADO	64
4.1.5 SISTEMA DE MEDICIÓN	65
<i>4.1.5.1 Rotámetro</i>	<i>65</i>
<i>4.1.5.2 Piezómetro y puertos de muestreo</i>	<i>65</i>
<i>4.1.5.3 Medición de turbiedad</i>	<i>65</i>
4.2 CONSTRUCCIÓN DE LOS FILTROS	69
4.2.1 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN	69
<i>4.2.1.1 Tanque mezclador</i>	<i>69</i>
4.2.2 SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN	69
4.2.3 SISTEMA DE FILTRACIÓN	69
<i>4.2.3.1 Columnas de filtración</i>	<i>69</i>
<i>4.2.3.2 Estructuras de soporte</i>	<i>74</i>
4.2.4 SISTEMA DE LAVADO	74
4.2.5 SISTEMA DE MEDICIÓN	78
<i>4.2.5.1 Rotámetro</i>	<i>78</i>
<i>4.2.5.2 Piezómetros y puertos de muestreo</i>	<i>78</i>
4.3 PRUEBAS HIDROSTÁTICAS	78
4.4 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	80
4.4.1 VARIABLES EXPERIMENTALES	80
4.4.2 CORRIDA DE FILTRACIÓN	82
4.4.3 LAVADO	82

5. ANÁLISIS Y RESULTADOS	87
5.1 VALORACIÓN DEL MÉTODO CALIBRADO	88
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	103
7. BIBLIOGRAFÍA	106
ANEXOS	110

LISTA DE FIGURAS

			PAG
FIGURA	2.1	ESQUEMA DE UN FILTRO A PRESIÓN.	10
FIGURA	2.2	FILTRO LENTO DE ARENA.	11
FIGURA	2.3	FILTRO RÁPIDO A CIELO ABIERTO.	12
FIGURA	2.4	FILTRO DE FLUJO ASCENDENTE.	14
FIGURA	2.5	FILTRO DE FLUJO DESCENDENTE.	14
FIGURA	2.6	FILTRO CON SISTEMA DE BIBLUJO.	15
FIGURA	2.7	ESFUERZO CORTANTE EN FUNCIÓN DE LA POROSIDAD PARA MEDIO UNIFORME.	18
FIGURA	2.8	ESQUEMA PARA DEFINIR LA CORRIDA EN TÉRMINOS DE LA PÉRDIDA DE CARGA Y DE LA CALIDAD DEL EFLUENTE.	18
FIGURA	2.9	GRADIENTE DE VELOCIDAD Y EXPANSIONES A DIFERENTES TEMPERATURAS PARA ARENA DE 0.55 mm Y $\rho_s = 2.65$. (DATOS EXPERIMENTALES).	22
FIGURA	2.10	ÍNDICE DE RECUPERACIÓN Y EL POTENCIAL Z.	23
FIGURA	2.11	CONCENTRACIÓN DE PARTÍCULAS	36
FIGURA	2.12	DIFUSIÓN MOLECULAR.	37

FIGURA	2.13	DIFUSIÓN MECÁNICA	37
FIGURA	2.14	RELACIÓN DE VACÍOS	38
FIGURA	2-15a.	CELDA I DE UN TANQUE CON LA NOMENCLATURA DE LAS CELDAS CIRCUNVECINAS	40
FIGURA	2.15b.	CAMBIO TOTAL DE CONCENTRACIÓN EN LA CELDA I	40
FIGURA	3.1	COLUMNA QUE REPRESENTA UNA ALTURA H, DIVIDIDA EN N CELDAS DE ALTURA ΔS	44
FIGURA	3.2	COLUMNA DE FILTRACIÓN IDEALIZADA DIVIDIDA EN N CELDAS, LA INFERIOR ES LA 1 Y LA SUPERIOR LA N.	44
FIGURA	3.3	FORMA DE REALIZAR EL CÁLCULO PARA LOS FLÓCULOS Y PARA LA ARENA EN LAS DOS ETAPAS	47
FIGURA	3.4	DIAGRAMA DE FLUJO, QUE ANTECEDE AL PROGRAMA QUE PERMITE CONOCER EN CADA INSTANTE LA DISTRIBUCIÓN DE CONCENTRACIONES Y VOLÚMENES DENTRO DEL FILTRO, TANTO PARA FLÓCULOS COMO PARA ARENA.	50
FIGURA	4.1	DIAGRAMA DE FLUJO DEL SISTEMA DE FILTRACIÓN.	54
FIGURA	4.2	ESTRUCTURAS DE SOPORTE PARA LAS COLUMNAS DE FILTRACIÓN Y EL TANQUE MEZCLADOR.	56
FIGURA	4.3	COLUMNAS DE FILTRACIÓN.	59
FIGURA	4.4	CURVA GRANULOMÉTRICA. TE 0.8	61
FIGURA	4.5	CURVA GRANULOMÉTRICA. TE 0.6	62
FIGURA	4.6	CURVA GRANULOMÉTRICA. TE 0.4	63

FIGURA	4.7	DETALLES DEL FALSO FONDO DE LA COLUMNA DE FILTRACIÓN.	66
FIGURA	4.8	DISTRIBUIDOR DE LAVADO.	67
FIGURA	4.9	PLACA DIFUSORA.	68
FIGURA	4.10	BRIDA INFERIOR.	71
FIGURA	4.11	BRIDA SUPERIOR.	72
FIGURA	4.12	CONEXIÓN DE MANÓMETROS Y ACCESO DEL EFLUENTE.	75
FIGURA	4.13	ESTRUCTURA DE SOPORTE PARA LAS COLUMNAS DE FILTRACIÓN.	76
FIGURA	4.14	TOMA DE MUESTRAS DE ARENA A DIFERENTES NIVELES DEL LECHO FILTRANTE.	83
FIGURA	5.1	DURACIÓN DEL LAVADO PARA LA ARENA TE 0.8 CON V_s DE 47 m/s A 72 s POR ETAPA.	91
FIGURA	5.2	Nº DE ETAPAS REQUERIDAS PARA PRODUCIR LA TURBIEDAD A 5 UTN EN LA COLUMNA DE TE 0.8	92
FIGURA	5.3	Nº DE ETAPAS REQUERIDAS PARA PRODUCIR LA TURBIEDAD A 5 UTN EN LA COLUMNA DE TE 0.6.	92
FIGURA	5.4	Nº DE ETAPAS REQUERIDAS PARA PRODUCIR LA TURBIEDAD A 5 UTN EN LA COLUMNA DE TE 0.4.	92
FIGURA	5.5	EFICIENCIA DE LAVADO EN FORMA TEÓRICA Y EXPERIMENTAL.	93
FIGURA	5.6	COSTO TOTAL DE LAVADO PARA LA COLUMNA DE TE 0.8 mm QUE COMPRENDE EL VOLUMEN	95

DE AGUA UTILIZADA (m^3) MÁS LA PÉRDIDA DE ARENA (m^3). (Resultados experimentales).

FIGURA	5.7	COSTO TOTAL DE LAVADO PARA LA COLUMNA DE TE 0.8 mm QUE COMPRENDE EL VOLUMEN DE AGUA UTILIZADA (m^3) MÁS LA PÉRDIDA DE ARENA (m^3). (RESULTADOS TEÓRICOS).	96
FIGURA	5.8	PÉRDIDAS DE CARGA REGISTRADAS ANTES Y DESPUÉS DE CADA LAVADO PARA LA COLUMNA DE TE 0.8.	97
FIGURA	5.9	PÉRDIDAS DE CARGA REGISTRADAS ANTES Y DESPUÉS DE CADA LAVADO PARA LA COLUMNA DE TE 0.6	98
FIGURA	5.10	PÉRDIDAS DE CARGA REGISTRADAS ANTES Y DESPUÉS DE CADA LAVADO PARA LA COLUMNA DE TE 0.4.	99
FIGURA	IIIa.	DIAGRAMA DE BLOQUES Y LISTADO (FLÓCULOS).	119
FIGURA	IIIb.	DIAGRAMA DE BLOQUES Y LISTADO (ARENA).	125

LISTA DE TABLAS

	PAG
TABLA 2.1 CLASIFICACIÓN DE LOS FILTROS A PROFUNDIDAD.	9
TABLA 2.2 VELOCIDADES ÓPTIMAS DE LAVADO.	21
TABLA 2.3 VALORES DE b PARA LA CORRECCIÓN POR TEMPERATURA (BEAUDRY, 1984).	22
TABLA 2.4 COMPARACIÓN ENTRE LOS MÉTODOS DE LAVADO (CLEASBY, <i>ET AL.</i> , 1975).	27
TABLA 2.5 INTERVALOS DE LAVADO SEÑALADOS EN LA LITERATURA.	28
TABLA 4.1 ARENA EMPLEADA EN CADA FILTRO.	60
TABLA 4.2 CRIBADO DE LA ARENA TE 0.8	61
TABLA 4.3 CRIBADO DE LA ARENA TE 0.6	62
TABLA 4.4 CRIBADO DE LA ARENA TE 0.4	63
TABLA 4.5 ANÁLISIS DE LA ARENA EMPLEADA.	64
TABLA 4.6 DISEÑO DE EXPERIMENTOS LINEAL PARA DOS FACTORES.	80
TABLA 4.7 DISEÑO DE EXPERIMENTOS LINEAL PARA DOS FACTORES. (con variables experimentales).	81
TABLA 5.1 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS EN EL LABORATORIO.	89

TABLA 5.2	RESULTADOS DEL MODELO MATEMÁTICO PARA PARTÍCULAS DE ARENA Y FLÓCULOS.	90
TABLA 5.3	RESULTADOS DEL MODELO MATEMÁTICO PARA FLÓCULOS.	101
TABLA 5.4	RESULTADOS DEL MODELO MATEMÁTICO PARA PARTÍCULAS DE ARENA.	102
TABLA 6.1	MEJORES CONDICIONES DE LAVADO PARA CADA TETRAEDRO.	104
TABLA 1.1	CARACTERES DE LA ARENA DE LOS FILTROS RÁPIDOS (HAEDIN, 1942).	111
TABLA 1.2	TIPO DE LECHOS FILTRANTES USADOS (HAEDIN, 1942).	112
TABLA II.1	ESCALA DE MOH.	113

LISTA DE FOTOS

		PAG
FOTO 4.1	HOMOGENEIZACIÓN DEL INFLUENTE EN UN TANQUE MEZCLADOR.	58
FOTO 4.2	DISTRIBUCIÓN A LAS COLUMNAS DE FILTRACIÓN.	58
FOTO 4.3	TANQUE MEZCLADOR, ROTOPLÁS DE 1100 LITROS.	70
FOTO 4.4	COLUMNA CON 8 PIEZÓMETROS QUE PERMITEN CONOCER LA PÉRDIDA DE CARGA A TRAVÉS DEL LECHO.	73
FOTO 4.5	EXTREMO INFERIOR DE LA COLUMNA DE FILTRACIÓN QUE ACTÚA COMO FALSO FONDO DONDE SE CONCENTRAN LAS TUBERÍAS DE SALIDA, DISTRIBUCIÓN Y MUESTREO.	77
FOTO 4.6	REALIZACIÓN DE PRUEBAS HIDROSTÁTICAS A LAS COLUMNAS DE FILTRACIÓN.	79
FOTO 4.7	TOMA DE MUESTRAS DE ARENA A DIFERENTES NIVELES DEL LECHO FILTRANTE.	84
FOTO 4.8	LAVADO DE TRES LECHOS FILTRANTE CON TAMAÑO EFECTIVO DE 0.8, 0.6, 0.4 RESPECTIVAMENTE.	86

NOTACIÓN

b	:	FACTOR DE CORRECCIÓN.
C	:	CONCENTRACIÓN DE UNA SUSTANCIA (v_s/v).
C	:	CTE. EMPÍRICA QUE DEPENDE DEL MATERIAL INVOLUCRADO.
°C	:	GRADOS CENTÍGRADOS
Ca(OH)₂	:	HIDRÓXIDO DE CALCIO.
C_L	:	COSTO DE LAVADO.
cm	:	CENTÍMETROS.
cc/min	:	CENTÍMETRO CÚBICO POR MINUTO.
CM	:	CONCENTRACIÓN MÁXIMA DE UNA SUSTANCIA.
CU	:	COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD.
d	:	DIÁMETRO DEL GRANO, (m).
DBO	:	DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO.
DQO	:	DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO.
DS(programa)	:	LONGITUD VERTICAL DE CADA CELDA , (m)
DT(programa)	:	INTERVALO DE TIEMPO, (s).
D₁₀	:	DIÁMETRO EFECTIVO, TAMAÑO DE LA APERTURA DEL TAMIZ QUE RETIENE AL 90 % DE PARTÍCULAS EN PESO.
D₆₀	:	APERTURA DE LA MALLA TAL, QUE EL 60% EN PESO, DEL MATERIAL, SEA IGUAL O MENOR.
e	:	RELACIÓN DE VACÍOS.
F₁	:	CONCENTRACIÓN DE PARTÍCULAS EN LA CELDA 1.
F_N	:	CONCENTRACIÓN DE PARTÍCULAS QUE SALE POR LA PARTE SUPERIOR DE LA COLUMNA.
F_o	:	CONCENTRACIÓN DE PARTÍCULAS QUE ENTRAN POR LA PARTE INFERIOR DE LA COLUMNA.
F_t²	:	PIES AL CUADRADO.

G	:	GRADIENTE DE VELOCIDAD.
Ga	:	NÚMERO DE GALILEO ADIMENSIONAL QUE NO DEPENDE NI DE LA VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN NI DE LA INTERCEPCIÓN DE LOS GRANOS.
g/m²	:	GRAMOS SOBRE METROS CUADRADOS.
g/ml	:	GRAMOS SOBRE MILILITRO.
GPM	:	GALONES POR MINUTO.
h	:	ALTURA QUE OCUPAN LOS GRANOS DESDE EL FONDO DE LA COLUMNA.
h	:	ALTURA TOTAL DEL LECHO FILTRANTE.
H	:	ALTURA DE LA COLUMNA QUE REPRESENTA AL FILTRO.
HCL	:	ÁCIDO CLORHÍDRICO.
h_o	:	ALTURA DE VACÍOS.
h_s	:	ALTURA OCUPADA POR UNA SUSTANCIA.
h_v	:	ALTURA OCUPADO POR LOS HUECOS ENTRE LA SUSTANCIA.
I	:	CELDA I.
J	:	DESIGNA A LAS CONCENTRACIONES AL PRINCIPIO DEL INTERVALO Δt.
J+1	:	DESIGNA A LAS CONCENTRACIONES AL FINAL DEL INTERVALO Δt.
k	:	CTE. EMPÍRICA CON VALORES DIFERENTES PARA CADA MATERIAL. POR EJEMPLO ARENA, ANTRACITA, GRAVA.
k₁	:	$g(\gamma_s - 1)$
K	:	CTE. QUE DEPENDE DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL FLÓCULO.
K₁	:	FACTOR UNO PARA SATISFACER EL PRINCIPIO DE CONTINUIDAD.
K₂	:	FACTOR CORRECTIVO DOS PARA SATISFACER EL PRINCIPIO DE CONTINUIDAD.
l	:	LITROS.
l/min	:	LITROS POR MINUTO.
m	:	METROS
m³	:	METROS CÚBICOS.
m.c.a.	:	METROS DE COLUMNA DE AGUA.
mg	:	MILIGRAMOS.
m/h	:	METROS CÚBICOS SOBRE SEGUNDO

ml/g	:	MILILITROS SOBRE GRAMOS.
mm	:	MILÍMETROS.
mV	:	MILIVOLTS
n	:	EXPONENTE APROXIMADAMENTE IGUAL A 2
n	:	VALOR RELACIONADO EMPÍRICAMENTE CON EL No. REYNOLDS.
N	:	CELDA ENÉSIMA.
N(programa)	:	NÚMERO DE CELDAS.
NaOH	:	HIDRÓXIDO DE SODIO.
NS(programa)	:	NÚMERO DE ETAPAS.
N\$:	NUEVOS PESOS.
P	:	SUMA DE CELDAS DONDE LA CONCENTRACIÓN REAL ES IGUAL O MAYOR QUE MC.
P_A	:	PRECIO UNITARIO DE LA ARENA.
pH	:	POTENCIAL DE HIDRÓGENO.
PR(programa)	:	PORCIENTO DE LA CANTIDAD INICIAL DE MATERIA EN LA QUE SE SUSPENDE EL CÁLCULO.
P_w	:	PRECIO UNITARIO DEL AGUA.
Q_i	:	CONCENTRACIÓN EN EL INSTANTE $t_0 + \Delta t$ EN LA CELDA I.
Q'_i	:	CONCENTRACIÓN REAL APLICANDO EL FACTOR CORRECTIVO K_1 .
Q''_i	:	CONCENTRACIÓN REAL APLICANDO EL FACTOR CORRECTIVO K_2 .
r	:	ÍNDICE DE RECUPERACIÓN.
Re	:	NÚMERO DE REYNOLDS.
s	:	SEGUNDOS.
ss/L	:	SÓLIDOS SUSPENDIDOS POR LITRO.
s^{-1}	:	REVOLUCIONES POR MINUTO, (rps).
S_A	:	VOLUMEN DE AGUA PERDIDA.
SS	:	SÓLIDOS SUSPENDIDOS.
S_w	:	VOLUMEN DE AGUA EMPLEADA.
t	:	PERÍODO DE SERVICIO O CARRERA DEL FILTRO.
T(programa)	:	TIEMPO TOTAL EMPLEADO, (s).
TC(programa)	:	LAPSO QUE DURA EL FLUJO CON VELOCIDAD MÁXIMAS, (s).
T_E	:	TIEMPO DE DURACIÓN DE CADA ETAPA EN CADA CICLO, (cte.).

TE	:	TAMAÑO EFECTIVO.
t₀	:	INSTANTE DE TIEMPO, (s).
u	:	VELOCIDAD HORIZONTAL DE FLUJO EN UNA CELDA.
U	:	GASTO IGUAL A $y_0 u_1 \Delta s$
UTN	:	UNIDADES TÉCNICAS NEFELOMÉTRICAS.
v	:	VELOCIDAD VERTICAL DEL FLUJO EN UNA CELDA.
V_c	:	VELOCIDAD DE CAÍDA DE LAS PARTÍCULAS.
VC(programa)	:	VELOCIDAD DE CAÍDA DE LA ARENA, (m/s).
V_D	:	VOLUMEN DE PARTÍCULAS DENTRO DEL FILTRO EN EL INSTANTE t₀.
VD(programa)	:	VOLUMEN FINAL DE PARTÍCULAS.
VDI-VD(programa)	:	VOLUMEN DE PARTÍCULAS QUE SALIÓ DEL FILTRO.
V_f	:	VELOCIDAD EFECTIVA DE LA CORRIENTE CON QUE VIAJAN LAS PARTÍCULAS IGUAL A $V_c - V_c$.
VREAL(programa):	:	VOLUMEN REAL DE PARTÍCULAS.
V₁	:	VELOCIDAD DE LA CONTRACORRIENTE IGUAL A V_a EN LA PRIMERA ETAPA.
V₂	:	VELOCIDAD DE LA CONTRACORRIENTE IGUAL A $V_a/2$ EN LA 2ª ETAPA.
VS(programa)	:	MÁXIMA VELOCIDAD DEL FLUJO DEL AGUA, (m/s).
VW(programa)	:	VOLUMEN DE AGUA REQUERIDA.
V₁	:	VELOCIDAD DEL AGUA A 18° C.
V_{1(CT)}	:	VELOCIDAD DEL AGUA A LA TEMPERATURA DESEADA.
V*	:	VELOCIDAD DE FLUJO.
w	:	NÚMERO COMPLEMENTARIO DE ENSAYOS.
WREAL	:	VOLUMEN REAL DE AGUA UTILIZADA.
X	:	CTE. EMPÍRICA CON VALORES DIFERENTES PARA CADA MATERIAL. POR EJEMPLO: ARENA, ANTRACITA O GRAVA.
X₁	:	VALORES QUE REPRESENTAN AL TE.
X₂	:	VALORES QUE REPRESENTAN A LA VELOCIDAD DEL FLUJO.
y	:	RESULTADOS DE LOS DIFERENTES ENSAYOS.
y₁	:	ALTURA DE LA CELDA.
z	:	CTE. EMPÍRICA QUE DEPENDE DEL MATERIAL GRANULAR INVOLUCRADO.

Z	:	POTENCIAL ZETA.
Z_1	:	CONCENTRACIÓN EN EL INSTANTE t_0 EN LA CELDA I.
$Z(I)(\text{programa})$:	CONCENTRACIÓN DE ARENA EN LA CELDA I.
ΔC_1	:	CAMBIO TOTAL DE CONCENTRACIÓN EN UNA CELDA I
ΔC°_1	:	INCREMENTO O DISMINUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN EN UN LAPSO DE TIEMPO, POR CAUSAS AJENAS AL FLUJO.
Δh	:	VOLUMEN UNITARIO.
Δh_v	:	VOLUMEN OCUPADO POR LOS HUECOS ENTRE PARTÍCULAS.
Δp_f	:	PÉRDIDAS FINALES.
Δp_i	:	PÉRDIDAS INICIALES.
Δs	:	ANCHO DE UN RECIPIENTE.
Δsh	:	VOLUMEN TOTAL DE UNA SUSTANCIA COLOCADO EN UN RECIPIENTE.
Δt	:	LAPSO DE TIEMPO.
Δv_s	:	VOLUMEN DE PARTÍCULAS QUE SALIÓ DEL FILTRO EN EL LAPSO Δt .
Δv°_s	:	VOLUMEN DE PARTÍCULAS QUE SALIÓ DEL FILTRO EN EL LAPSO $t_0 + \Delta t$.
γ_s	:	PESO ESPECÍFICO DE LOS GRANOS DEL EMPAQUE.
η	:	EFICIENCIA DE LAVADO.
ϕ	:	DIÁMETRO.
(")	:	PULGADA
ρ	:	DENSIDAD DEL AGUA.
ρ_m	:	MASA ESPECÍFICA DEL AGUA.
ρ_s	:	DENSIDAD REAL DE LA ARENA.
τ	:	ESFUERZO CORTANTE.
μ	:	VISCOSIDAD ABSOLUTA DEL AGUA.
μM	:	MICRÓMETRO.
v	:	VELOCIDAD EN COLUMNA VACÍA.
ν	:	VISCOSIDAD CINEMÁTICA.
V	:	VOLUMEN.
V_s	:	VOLUMEN DE CIERTA SUSTANCIA.
V_v	:	VOLUMEN DE VACÍOS.

- V_D : VOLUMEN DE PARTÍCULAS DENTRO DEL FILTRO EN EL INSTANTE t_0 .
- V'_D : VOLUMEN DE PARTÍCULAS EN EL FILTRO EN EL INSTANTE $t_0 + \Delta t$.
- V_f : VOLUMEN REMANENTE DE ARENA.
- V_T : VOLUMEN ORIGINAL DE ARENA.

Resumen

RESUMEN

La filtración y el lavado de los filtros tiene una gran importancia en el tratamiento del agua, tanto en depuración como en potabilización. La falta de un método de lavado que asegure la salida de los sólidos retenidos sin perder el medio filtrante motivaron que el Instituto de Ingeniería desarrollara un sistema diferente.

El lavado de un filtro depende, en primer lugar, del tipo de filtración que se realice. Se tienen dos casos: lavado para los filtros lentos y lavado para filtros rápidos. En los filtros lentos se aplica un lavado superficial por medio de dispositivos mecánicos, o bien, el raspado de la capa superior y su almacenamiento para reposición posterior de la arena. En los filtros rápidos, el lavado se hace con agua o con agua y aire, en ambos casos se introducen los fluidos en sentido ascendente.

En cuanto a la forma del lavado de filtros rápidos que es el caso que nos preocupa existen dos grandes escuelas: la americana y la europea. La práctica americana se caracteriza por utilizar solamente agua, a altas velocidades con expansiones del lecho del 50% o mayores, por lo que el consumo del líquido es importante al igual que la pérdida del medio. Más aún, estudios recientes mencionan que para desprender la película de sólidos formados alrededor de las partículas de arena y evitar la formación de aglomerados es necesaria la fricción entre ellas. Situación que sólo se logra con expansiones del 15 al 25% pero con las cuales no es posible arrastrar la totalidad de los sólidos retenidos hasta la parte superior del filtro para que salgan.

En contraste, la práctica europea se basa en la utilización de agua y aire combinados a velocidades menores y con expansiones máximas del orden 30% que si bien permiten una buena fricción entre granos (y por ende el desprendimiento de los sólidos adheridos a ella), no evitan la pérdida del medio pues las burbujas de aire arrastran el empaque hasta la canaleta que recoge el agua de lavado (fenómeno "air-lift"). A pesar de eso, el buen rendimiento de esta forma de lavado ha ocasionado un claro predominio de esta escuela.

La operación de lavado del filtro se complica aún más porque un buen lavado requiere, aparte del suministro de un flujo adecuado, la distribución uniforme del mismo, de manera que no existan gradientes de velocidad a lo largo o ancho del filtro. Situación que es muy difícil de obtener en la práctica para el aire. De ahí la importancia de modelar y calibrar un nuevo método de lavado de filtros profundos que emplee sólo agua y evite la pérdida del empaque.

Un lavado mal efectuado trae por consecuencia las anomalías siguientes:

- pérdidas de material filtrante.
- acortamiento de las corridas de filtración.
- desacomodo de la grava.

De manera objetiva se puede citar un claro ejemplo de la importancia del lavado de filtros, en 1990 el Instituto de Ingeniería determinó las causas que ocasionaban la pérdida del lecho filtrante durante el lavado de los filtros de la Planta Potabilizadora "Los Berros" del Sistema Cutzamala, ya que este mal funcionamiento traía la pérdida de una cantidad importante de arena, la cual era necesario reponer periódicamente a un costo no despreciable. Considerando únicamente los filtros en los cuales se llevó a cabo el muestreo, salieron de ellos un total de 447.6 m³ de arena, que representa el 48% de pérdidas del total de arena, con un costo de 124,110.328 *nuevos pesos* en cuatro meses aproximadamente. En promedio por filtro y por lavado se perdía 621 l de arena/lavado. De ahí la importancia de un sistema innovador que minimice las pérdidas materiales y económicas.

Este estudio propuesto por el Instituto se efectúa haciendo pasar una corriente de agua que contiene flóculos a través de un medio filtrante constituido por un material granular en donde se retienen esas partículas. Al operar el filtro, las impurezas van taponando el material granular, por lo que la rapidez con que se realiza el proceso disminuye gradualmente. Por eso es necesario lavar el filtro periódicamente. Para hacerlo se inyecta una corriente de agua limpia en sentido contrario a la del filtrado, con el objeto de expandir el material granular y propiciar la salida de los flóculos atrapados. Para expandir el material granular se requiere que la contracorriente tenga una velocidad mayor que la de caída de los granos, por lo cual, si se mantiene demasiado tiempo, acabará por remover no sólo a los flóculos sino también, todo el material granular. Este hecho sugiere la conveniencia de lavar por ciclos sucesivos, de tal manera que en cada uno de ellos haya dos etapas. En la primera, la velocidad de la contracorriente será superior a la de caída de los granos y, en la segunda será menor para propiciar el retorno de los granos hacia el fondo. Como la

velocidad de caída de los granos será notoriamente mayor que la de los flóculos, con esta forma de proceder se logrará que estos últimos viajen hacia la salida más rápidamente en la primera etapa y más despacio en la segunda, sin que por ello se escape del filtro una capacidad muy grande del material granular. Las diferentes variables experimentales analizadas para definir la eficiencia del método propuesto son la altura del filtro, el tamaño del medio, la velocidad, el tiempo y el número de ciclos de un lavado.

Teniendo en cuenta las dimensiones del filtro, las propiedades de los granos y de los flóculos y los precios de agua limpia y del material granular, se realizó un estudio económico-funcional sobre las ventajas y desventajas que plantea la selección del tiempo de duración de cada etapa y la velocidad de la contracorriente para hacer el lavado con el menor costo posible.

Los diferentes ensayos realizados experimentalmente mostraron, que la columna de arena con TE de 0.8 mm, con velocidad máxima de 18 m/h y tiempo de 24 s para cada etapa, arrojó menor pérdida de arena e hizo uso de menor cantidad de agua, esto comprueba lo que afirma la literatura, es más fácil lavar arena gruesa que fina, y además que un número mayor de ciclos cortos a bajas velocidades consiguen una mejor remoción de los flóculos de obstrucción, ya que lo contrario ocasiona que la materia adherida a la arena no alcanzase su desprendimiento por factor de abrasión. El análisis de los registros de pérdida de carga, al inicio y término de cada lavado, refuerza aún más estos resultados, pues se observa que las pérdidas más bajas de arena ocurren en estas mismas condiciones.

Con los ensayos realizados se puede corroborar que el modelo matemático propuesto, describe eficientemente el proceso, ya que entre este y el experimental el promedio de eficiencia de lavado es del 97 % y entre ambos existe una diferencia del 0.5 %, por lo que constituye una herramienta útil de trabajo.

Cabe mencionar que aunque la distribución del flujo de lavado se supone uniforme y por ello es suficiente para trabajar en una sola dimensión, sin embargo se considera recomendable realizar la experimentación en dos direcciones, con lo cual se podrían confirmar más los resultados.

***Modelación matemática y
calibración de un método
de lavado de filtros
profundos***

PAGINACION VARIA

COMPLETA LA INFORMACION

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

El lavado de los filtros es una de las operaciones más importantes en una planta de filtración rápida con arena. Debe hacerse cuando la columna de agua que representa las pérdidas de presión sea igual a la distancia que existe entre la superficie del agua dentro del filtro y el fondo de la capa de arena, o cuando el efluente ya no tenga la calidad requerida.

Un filtro se retrolava cerrando primero la línea del influente, abriendo la válvula de descarga al drenaje y pasando después agua limpia a través del sistema de desagüe inferior del filtro en dirección inversa a una velocidad varias veces superior a la de filtración. El agua sucia que sale de la parte superior del filtro es recogida por medio de colectores de agua de lavado y descargada al drenaje.

Para realizar un buen lavado es necesario producir una expansión del lecho lo que se logra cuando la velocidad con que se inyecta el agua sea superior a la velocidad de caída de los granos de arena. Pero si el flujo con esa velocidad se mantiene demasiado tiempo, se removerá del tanque no sólo las partículas que taponan al filtro, sino también toda la arena. En efecto, al introducirse la corriente de lavado, los granos de arena adquieren una velocidad de ascenso que depende de su tamaño y su densidad y, requieren cierto tiempo para que, con esa velocidad, asciendan hasta la parte superior y empiecen a salirse. Lo mismo ocurre con las partículas que taparon al filtro; pero puesto que son de menor tamaño y densidad que la arena asciendan más rápidamente y salen antes que termine el lavado. En estas condiciones se ha pensado en la posibilidad de lavar por ciclos de dos etapas. En la primera, se introduce un flujo con una velocidad ascendente de valor absoluto mayor a la velocidad de caída de los granos de arena y, cuando ésta empieza a salir, se inicia la segunda etapa, en donde la velocidad del flujo disminuye por debajo de la velocidad de caída de los granos, con lo cual se propicia el retorno de la arena hacia el fondo y tal vez, pero más lentamente, de los flocúlos que obstruyan al filtro. Así, al iniciar un nuevo ciclo, la arena tendría que ascender una altura mayor con una velocidad más pequeña, en tanto que para salirse las partículas viajarían una distancia menor y más rápidamente. Es decir se efectuaría una separación de la arena y de los sólidos en el filtro.

En esta forma, al cabo de varios ciclos podría conseguirse la remoción de los flocúlos de obstrucción. Esta manera de proceder plantea dos opciones ya que, mediante corrientes de lavado de baja velocidad se reduce la pérdida de arena, pero se necesitan muchos ciclos, que implican utilizar un volumen de agua grande. Por el contrario, una corriente de mayor velocidad

requiere menor número de ciclos, emplea menos agua pero se tiene el riesgo de perder un volumen más grande de arena. Así, el problema consiste en determinar la velocidad de la corriente de lavado y los intervalos de tiempo en los que deban tener lugar las dos etapas de cada ciclo, con el objeto de minimizar el volumen de agua empleado y el de arena perdida.

Para simular este proceso se ha elaborado un modelo matemático elemental basado en la ecuación de difusión, teniendo en cuenta que la turbulencia y los choques entre granos y los flocúlos permite tratar a ambos, en una primera aproximación, como una sustancia conservativa que se difundiera en el medio líquido impulsada por una cierta velocidad V^* . Las hipótesis hechas para manejar este modelo numéricamente se indican en el presente escrito.

Para llevar a cabo el cumplimiento de la calibración del modelo matemático planteado para un nuevo método de lavado de filtros profundos de arena, el cual es el objetivo de esta tesis, se ha desarrollado el estudio de 7 capítulos a saber:

Capítulo 1.

INTRODUCCIÓN:

En esta parte se da un bosquejo del método nuevo de lavado de filtros profundos de arena y el alcance de éste mismo.

Capítulo 2.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA:

Se investigó en la literatura los elementos que intervienen y hacen comprender el lavado de los filtros.

Capítulo 3.

DESARROLLO DEL MODELO MATEMÁTICO:

Se presentan las hipótesis y las ecuaciones utilizadas para el manejo de este modelo numérico, así como un programa que nos ayuda a realizar estos cálculos de manera ágil.

Capítulo 4.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL:

Comprende el proceso constructivo del diseño de filtros, las pruebas y los análisis realizados a las columnas y al medio filtrante y el procedimiento experimental que se llevó a cabo para calibrar al modelo.

Capítulo 5.

ANÁLISIS Y RESULTADOS:

Se realiza el análisis de los resultados que arrojó el proceso experimental y se compara con el cálculo teórico.

Capítulo 6.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES:

Contiene la valoración del método nuevo de lavado de filtros y se dan las recomendaciones y sugerencias que pudieran mejorar la calibración.

Capítulo 7.

BIBLIOGRAFÍA:

Se presenta las referencias consultadas.

Capítulo 2

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA:

2.1 FUNDAMENTOS DE LA FILTRACIÓN

2.1.1 ANTECEDENTES

Los filtros en sus inicios fueron utilizados con un fin doméstico, se usaron por mucho tiempo los filtros de piedras porosas colocadas en tinajeros.

En Francia, se difundieron mucho en los siglos XVIII y XIX los filtros de esponja, paño, lana y otros materiales. Cuando se hicieron los primeros filtros no domésticos el agua filtrada no se distribuía por tubería, sino que se vendía por galones al consumidor. Así surgieron las primeras compañías de agua que fueron de carácter privado.

Fue en Inglaterra (Pasley, Escocia) en 1804, donde por primera vez se pensó en hacer una instalación de filtros para toda una población. Más tarde en 1829, en Londres (Chelsea) se construyó la primera planta de filtros lentos de arena hecha por "The Chelsea Water Work Co". A medida que la demanda de agua filtrada aumentaba, se fue estudiando más a fondo el trabajo de los filtros y se halló que ellos no sólo hacían un proceso de cribado sino que también intervenían otros fenómenos. Se formaron dos escuelas: Los que estaban a favor de la filtración descendente y los que creían en la filtración ascendente: Los primeros argumentaban que al filtrar hacia abajo, la mayoría de la materia suspendida quedaba retenida en las primeras capas del lecho, lo que facilitaba la limpieza del filtro, pues bastaba raspar esas capas (procedimiento que todavía se usa en los filtros lentos). Los segundos decían que al filtrar hacia arriba a través de material cada vez más fino, la gravedad producía el asentamiento de la mayoría de las partículas en el fondo del filtro, y las restantes que alcanzaban a subir, podrían ser fácilmente lavadas invirtiendo el sentido del flujo. Lentamente se impuso la primera escuela (filtración descendente) y el uso de los filtros lentos de arena se popularizó tanto en Europa como en América. Con el advenimiento de la microbiología, nacida a mediados del siglo XIX (L. Pasteur, 1822-1895), se le fue dando cada vez mayor importancia al aspecto bacteriológico de la filtración y a fines de dicho siglo muchas ciudades tanto del viejo como del nuevo mundo habían construido plantas de filtración. A partir de 1856, en Francia, aparecieron los filtros a presión: "Fonvielle" y "Souchon", cuyo objetivo era colar los sedimentos del agua.

En Estados Unidos, a mediados del siglo pasado, el mejor conocimiento del proceso condujo al diseño de los filtros rápidos bajo patente. Se les llamó filtros "mecánicos" o "americanos", en contraposición a los "filtros ingleses" que eran lentos. La gran innovación de los filtros rápidos fue en la limpieza del lecho filtrante, pues en lugar de hacerse raspando la capa superior del mismo que era un procedimiento largo y costoso, se hacía invirtiendo el sentido del flujo, que en el proceso de filtrado era de arriba hacia abajo y en el de lavado de abajo hacia arriba, con lo cual se eliminaban las impurezas que habían quedado retenidas en el lecho. Esto facilitaba la operación casi continua del filtro y permitía el uso de cargas superficiales considerablemente mayores (aproximadamente 30 veces más) que la de los filtros lentos.

El sistema de retrolavado facilitó la operación continua del filtro y permitió el uso de cargas superficiales mayores que la de los filtros lentos. Posteriormente, en Bélgica, Alemania y Francia el sistema de coagulación-filtración fue adaptado pero resultó que los filtros se tapaban con demasiada frecuencia (por la falta de un sistema de sedimentación adecuado) sobretodo, cuando la concentración de sólidos en el influente era muy alta. Lo anterior obligaba a gastar mucha agua tratada para el lavado. Fue entonces que en 1880 en Holanda, B. Salbach construyó como pretratamiento un sistema de sedimentadores, coagulación con sulfato de aluminio. Con esta idea en 1898, en Estados Unidos, se introdujo un sistema de coagulación y sedimentación en tanques separados para remover la mayoría de las partículas sedimentables antes de llegar a los filtros rápidos. Aparece así la concepción de las plantas de potabilización modernas, en las que todos los tratamientos son preparativos o complementarios a la filtración y cuyos principios se han aplicado al tratamiento del agua residual. De tal forma que las operaciones básicas en una planta potabilizadora de agua son: Coagulación, Sedimentación, Filtración y Desinfección.

En las plantas potabilizadoras de gran tamaño el tipo de filtro que más se usa es el rápido, con arena, flujo descendente y por gravedad. Se instalan en tanques rectangulares de concreto donde se colocan sobre un sistema de drenaje, una capa de grava (10 a 30 cm) y otra de arena (60 a 1.20 cm). La selección del medio y de la tasa máxima con que puede trabajar un filtro está condicionada por la calidad del agua que entra y por el período de trabajo. La tasa óptima es aquella que proporciona la mejor calidad del efluente y la mínima cantidad de agua de lavado.

A partir de la segunda década del presente siglo hasta la actualidad ha sido el de perfeccionamiento de la operación y se prestó mucha atención al acondicionamiento apropiado del agua para la filtración. El ablandamiento del agua, la corrección de sabores y olores, la prevención de la corrosión y la eliminación del hierro y del manganeso han sido también desarrollados hasta un alto grado de perfeccionamiento durante los últimos años.

2.1.2 CLASIFICACIÓN DE FILTROS:

La filtración del agua es un proceso físico-químico que separa los sólidos suspendidos y la materia coloidal de la fase líquida por medio de un material poroso. Entre otras características la filtración:

- **Disminuye la carga de sólidos y material coloidal en el agua.**
- **Remueve partículas y materia coloidal no sedimentable después de la floculación biológica o química o de ambas.**
- **Incrementa la remoción de sólidos suspendidos, turbiedad, fósforo, DBO, DQO, metales pesados, asbestos, bacterias, virus y otras sustancias.**
- **Mejora la eficiencia y reduce el costo de desinfección a través de la remoción de materia orgánica suspendida y otras sustancias interferentes.**
- **Asegura la operación continua de la planta y una calidad del effluente constante.**

CLASIFICACIÓN:

Se distinguen dos tipos principales de filtración de acuerdo con la forma en que se retienen los sólidos: la superficial y en profundidad.

2.1.2.1 Filtración superficial

El objetivo es retener en superficie las partículas y microorganismos, para ello se emplea un medio poroso poco profundo como soporte. Las membranas deben tener una alta permeabilidad al agua pero baja a otros compuestos. Los materiales empleados en la fabricación de membranas son acetato de celulosa, poliamidas aromáticas y sustancias químicas.

2.1.2.2 Filtración a profundidad

Estos filtros se emplean comúnmente para el tratamiento de agua, tanto en potabilización como en descomposición. La retención de sólidos se realiza en todo el cuerpo del filtro el cual se compone de material granular y permite mayor duración de corrida. Durante la filtración a profundidad, el agua llena los poros del filtro y las impurezas son retenidas en el empaque por adhesión. Una filtración eficiente implica tanto la desestabilización de la partícula como su transporte y retención. Por ello, el empleo de coagulantes es de gran ayuda durante este proceso.

En la TABLA 2.1 se presenta la clasificación para los filtros a profundidad de acuerdo con diversos parámetros.

TABLA 2.1 CLASIFICACIÓN DE LOS FILTROS A PROFUNDIDAD.

FUERZA FILTRANTE	Por gravedad
	A presión
TASA DE FILTRACIÓN	Lentos (0.08 a 0.6 m/h)
	Rápidos (2 a 15 m/h)
TIPO DE PROCESO	Convencional
	Directos
DIRECCIÓN DE FLUJO	Ascendente
	Descendente
	Biflujó
MEDIO FILTRANTE	Simples o únicos
	Combinados o múltiples
SITUACIÓN EN UN SISTEMA DE TRATAMIENTO	Primario
	Secundario
	Terciario

2.1.2.2.1 Filtros a gravedad o a cielo abierto

En estos filtros la acción de la gravedad es la fuerza impulsora. La columna del líquido acumulada sobre el medio provoca el paso del agua a través de él. Se emplean tanto en plantas de aguas

residuales como en plantas de agua potable. Según se sitúe dentro del proceso su tratamiento puede ser primario o terciario. Trabajan en diferentes intervalos de velocidad por lo que existen filtros lentos y filtros rápidos.

2.1.2.2.2 Filtros a presión

Estos filtros se encuentran en tanques metálicos totalmente cerrados donde la fuerza impulsora es ejercida por la presión de bombeo. La selección de la talla efectiva del medio y su altura depende de la velocidad de filtración, de la pérdida de carga hidrostática y el tamaño de partícula que será filtrada. FIGURA 2.1.

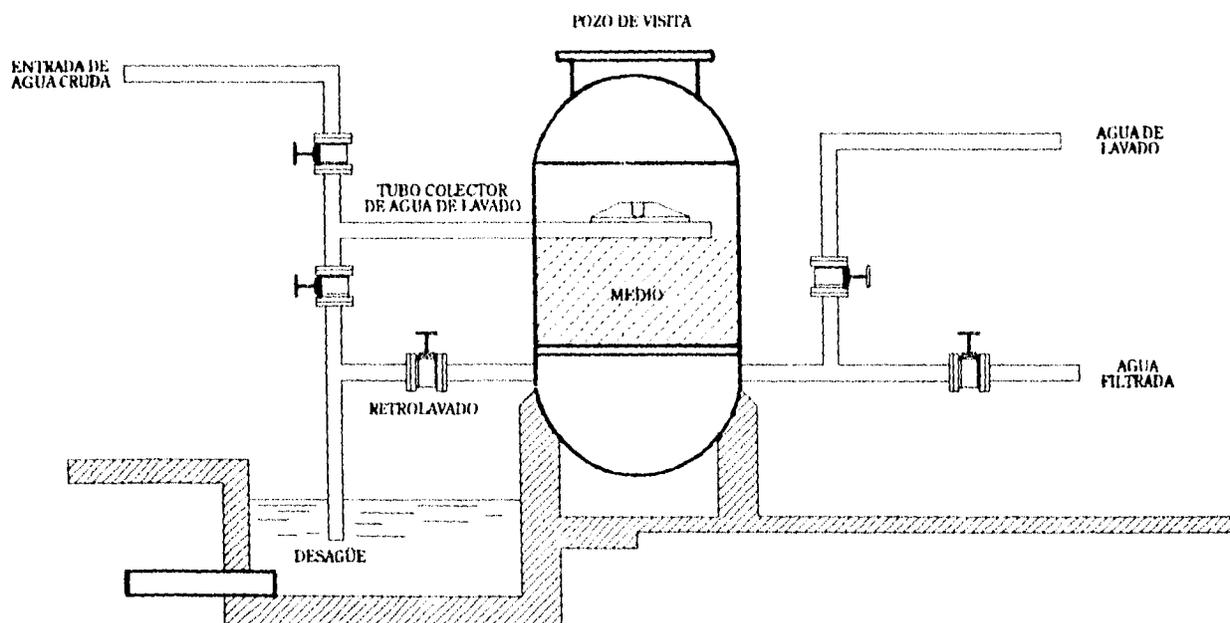
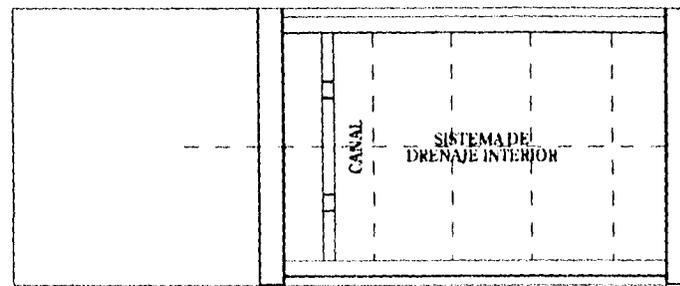


FIGURA 2.1 ESQUEMA DE UN FILTRO A PRESIÓN

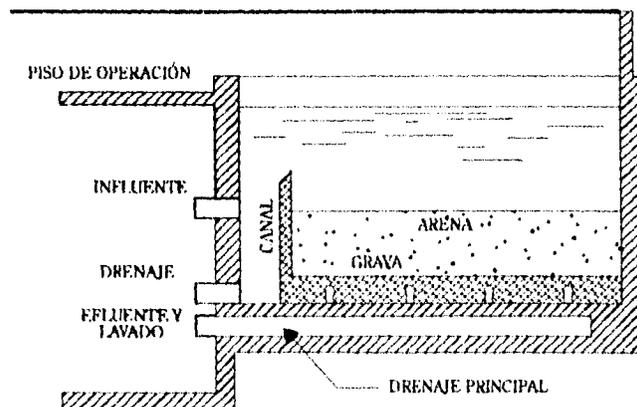
2.1.2.2.3 Filtros lentos

La filtración lenta en arena es una de las técnicas de tratamiento más antiguas que fue desarrollada para producir agua de consumo. Consiste en pasar agua a través de un lecho filtrante de arena entre 0.6 y 1 m, el tamaño efectivo del medio es de 0.15 a 1 mm (Montiel *al. et.*, 1989). Las características principales de los filtros lentos son : la baja velocidad de trabajo (0.08 a 0.60

m/h) y el método de limpiar (por raspado y remoción de la arena). Se clasifican a su vez de acuerdo con el sentido del flujo en : flujo descendente y flujo horizontal. La principal ventaja de la filtración lenta es su bajo costo, la independencia de la operación y el no requerir reactivos químicos. Por sus características, la filtración lenta se puede emplear para el afinamiento de un efluente terciario cuando se tiene disponibilidad de terreno (Steel y McGhee, 1981). (FIGURA 2.2).



PLANTA



CORTE A TRAVES DEL DRENAJE PRINCIPAL

FIGURA 2.2 FILTROS LENTOS DE ARENA

2.1.2.2.4 Filtros rápidos

El término filtración rápida se aplica cuando la tasa de filtración es del orden de 2 a 15 m/h (y algunas veces más). Un filtro rápido consiste en un lecho de profundidad variable entre 80 cm y varios metros. El transporte hasta la superficie del medio filtrante se produce por difusión,

intercepción, sedimentación, choque o transporte hidrodinámico. Este proceso está ayudado por la floculación que tiene lugar en los intersticios del filtro y por la distancia relativamente corta de recorrido necesaria para la eliminación por sedimentación (FIGURA 2.3; Steel y McGhee, 1981).

La fijación de las partículas después de entrar en contacto con el medio filtrante es de naturaleza química y está influenciada por el pH, composición iónica del agua, edad del floculo, las características de la superficie del medio y la naturaleza y dosis del polímero. Tanto el medio filtrante como las partículas suspendidas del agua pueden tener cargas eléctrica relativamente importantes que puedan ayudar o inhibir la fijación. De forma general, las partículas de mayor tamaño y fuertemente ligadas tienen tendencia a ser retenidas en las capas superiores del filtro, dando lugar a grandes pérdidas de carga y poca penetración del floculo. Las partículas suspendidas finas penetran más, especialmente cuando el medio es grueso.

La filtración rápida convencional con arena como medio filtrante, necesita de una agua de baja turbiedad y, por ello, generalmente se ha empleado la coagulación con alúmina o cal, floculación y sedimentación como etapa previa o en el mismo tanque (Steel y McGhee, 1981). El Lavado de estos filtros es con agua o con agua y aire con flujo ascendente. Este proceso se emplea en tratamientos avanzados como complemento de la coagulación-floculación y de la precipitación para asegurar la calidad del efluente.

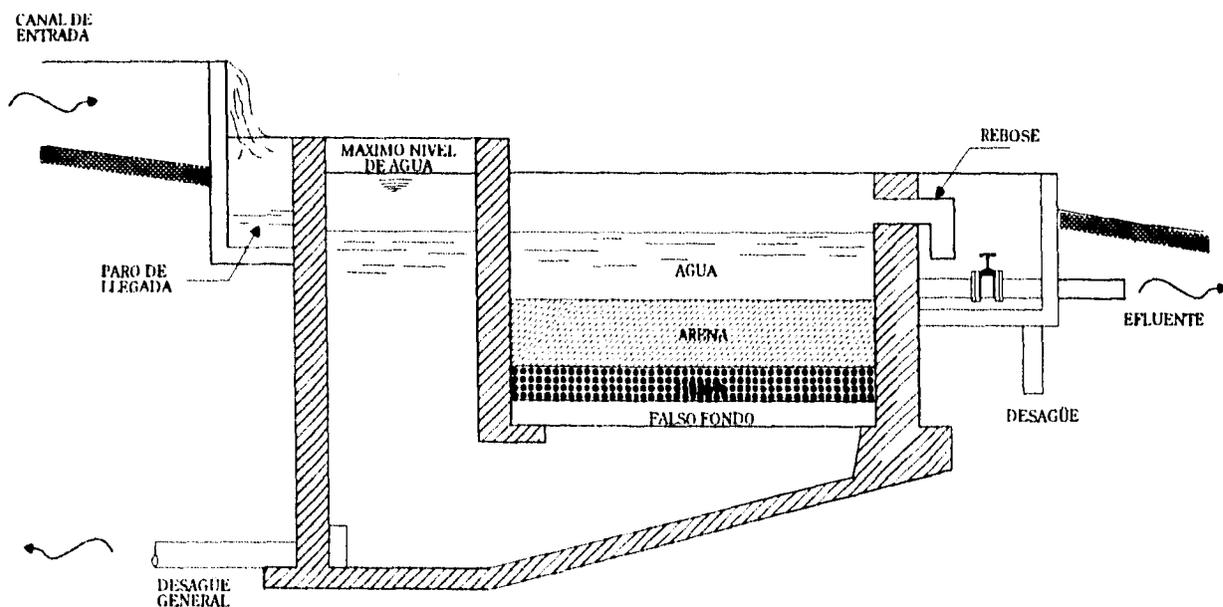


FIGURA 2.3 FILTRO RÁPIDO A CIELO ABIERTO

2.1.2.2.5 Filtro convencional

El agua recibe el esquema habitual de tratamiento, es decir: coagulación, floculación y sedimentación. Se puede utilizar un medio único de arena, medios duales (arena-antracita) o medios múltiples (arena-antracita-granate) (Coronado, 1984).

2.1.2.2.6 Filtros directos o de coagulación por contacto

Es una de las formas recientes de la filtración a profundidad. En ella se agregan los coagulantes antes de entrar al filtro, puede o no tener un proceso previo de floculación. Su característica principal es que no existe sedimentación.

En este caso se recomiendan empaques de diámetro grande para disminuir la pérdida de carga así como añadir el coagulante al influente inmediatamente antes de entrar al filtro para lograr una mejor adhesión de las partículas a los granos del medio. Cuando esto ocurre así, específicamente se denomina al proceso "Floculación por Contacto-Filtración". Este tipo de filtración fue desarrollado por los rusos.

La filtración directa permite tratar influentes con concentraciones superiores a 15 mg SS/L, Así mismo, se utiliza para la eliminación de fósforo el cual ofrece mejores resultados que los procesos combinados de coagulación/sedimentación o flotación o para la precipitación de metales. De los tres tipos de filtración ésta ha sido la más frecuentemente empleada en trenes avanzados y, al igual, que la filtración rápida se realiza a cielo abierto o a presión.

2.1.2.2.7 Flujo ascendente

En este tipo de filtros, el flujo asciende a través del medio granular. Se ha mencionado que son más eficientes debido a que permiten una penetración mayor de los sólidos en suspensión dentro del lecho del filtro (FIGURA 2.4).

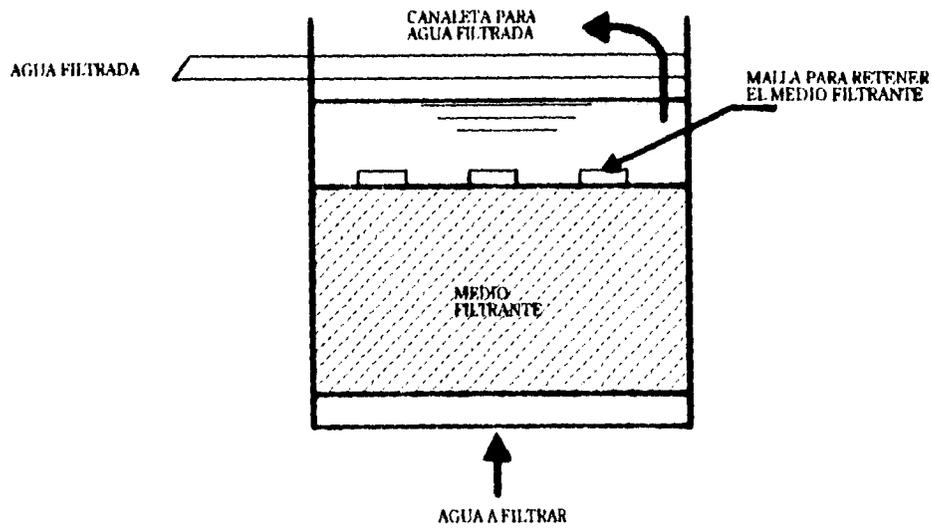


FIGURA 2.4 FILTRO DE FLUJO ASCENDENTE

2.1.2.2.8 Flujo descendente

El agua por filtrar entra por la parte superior. Este filtro es menos eficiente debido a que los sólidos de mayor tamaño son retenidos por los poros más pequeños del lecho filtrante, lo que implica que el filtro tenga mayores pérdidas de carga y se tenga que lavar con mayor frecuencia (FIGURA 2.5).

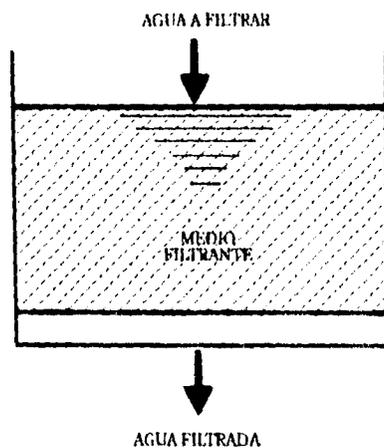


FIGURA 2.5 FILTRO DE FLUJO DESCENDENTE

2.2.2.9 Sistema de biflujo

Las características de ambos filtros -flujo ascendente y descendente- se combinan en este filtro. El agua filtrada es recogida por medio de una tubería perforada situada dentro del lecho del filtro. El lavado se consigue simplemente aumentando el caudal hacia el fondo del filtro (FIGURA 2.6).

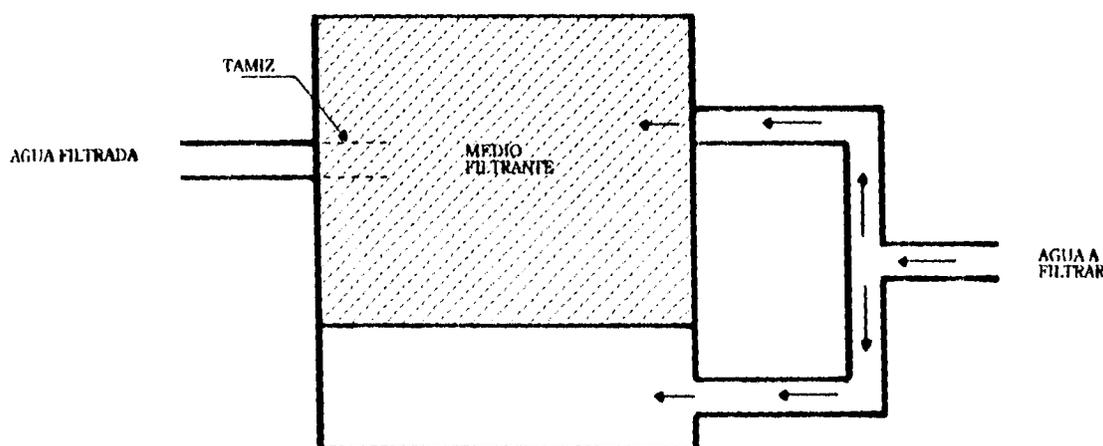


FIGURA 2.6 FILTRO CON SISTEMA DE BIFLUJO

MEDIO FILTRANTE

Los materiales filtrantes empleados son muy variados y van desde los granos angulosos (material triturado), hasta los redondos (arena de río y mar). Cuando se tiene una misma granulometría en el lecho filtrante la pérdida de carga es menor que con granos angulosos, ya que estos se acoplan y dejan secciones de paso mayores. El medio filtrante frecuentemente usado es la arena sílica. Pero no se descartan los medios duales y mixtos.

2.1.2.2.10 Medio filtrante simple

El medio filtrante puede ser de arena, grava, antracita, etc. Esta disposición, presenta la desventaja, de que las partículas removidas, se concentran en la capa superior del filtro y la mayor parte de la profundidad de medio permanece sin utilizar

2.2.2.11 Medio filtrante múltiple

Los filtros mixtos generalmente se componen de dos capas; antracita y arena (medio doble) o tres; antracita arena y granate o ilmenita (medio triple). Experimentalmente se han usado hasta cinco; polistirene, antracita, arena, granate y magnetita (Mohanca, 1969). Cuando más medios se usen mejor graduación de gruesos a fino se puede conseguir.

La ventaja sin embargo, de producir una estratificación del lecho cercana a la ideal, no resulta en la práctica tan deseable ya que la eficiencia del filtro depende más de las características del flóculo afluente que las del lecho filtrante. Cuando el flóculo es blando cualesquiera que sean las especificaciones de los medios usados, tenderán a romperse y salirse y, en cambio, cuando el flóculo es duro tenderá por el contrario, a quedar retenido en la superficie. Dice por eso Robeck (1965): "En lugar de gastar dinero en medios exóticos, sería más apropiado seleccionar la dosis adecuada de coagulante para un medio grueso que pueda colocarse encima de una arena barata", y más abajo opina: *"Indudablemente el diseñador y el operador tienen un cierto grado de control sobre la calidad del agua filtrada, seleccionando el medio, la rata de filtración y la dureza del flóculo; pero el último de estos tres parámetros es más flexible y por tanto puede ser ajustado a las condiciones variables del agua cruda"*.

Algunos de los diversos materiales experimentados en filtración rápida son los granos de polistirene, antracita pesada, antracita liviana, carbón bituminoso, arena de peña, arena triturada, arena de granete, granito, magnetita, e ilmenita.

El uso de medios filtrantes con material de diferentes densidades no es nuevo. Baylis, en 1935, realizó experimentos en la Planta de tratamiento de Chicago, con filtros compuestos de un "lecho de material filtrante de baja gravedad específica sobre un lecho de material más fino". Posteriormente, el mismo autor en 1939 volvió a realizar nuevos ensayos con lechos de arena de 0.5 mm de tamaño efectivo, sobre los cuales se pusieron 7.5 cm de antracita de 1.5 mm. Al respecto, Baylis decía, "este sistema disminuye grandemente la tasa a la cual la pérdida de carga se incrementa en el filtro. Experimentos previos indican que éste es medio práctico de prolongar las carreras de filtración y por eso, lechos de los dos materiales están siendo usados en varias plantas de tratamiento.

En América Latina, se utilizaron también lechos dobles hace algún tiempo. La planta de Vitelma (Bogotá Colombia), reemplazó desde 1940 a los 30 cm superiores del medio filtrante por antracita, se decía que esto permitía aumentar la tasa de filtración en un 25%.

2.2 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA EFICIENCIA DEL LAVADO

2.2.1 ABRASIÓN

Amirtharajah (1978) demostró que la máxima turbulencia ocurre a porosidades entre 0.65 y 0.70 y que las colisiones en un lecho fluidificado con esas condiciones son nulas. Sin embargo, las propiedades a que hace referencia (turbulencia, transferencia de calor y de masa, y el mezclado) tienen una capacidad de eliminar los sólidos inferior al provocado por las colisiones entre partículas. Además, señala que porosidades de 0.65 a 0.75 implican expansiones del orden de 100% para medios uniformes y de 40 a 50% para arena graduada con TE de 0.45 mm y CU de 1.58.

La FIGURA 2.7 muestra la variación del esfuerzo cortante en función de la porosidad. Debido a la forma de la curva se deduce que el situarse exactamente en valor óptimo de lavado no es relevante ya que varía muy poco, sobre todo si se emplean porosidades ligeramente inferiores en un 10 a 20 %.

Amirtharajah concluye que puesto que las colisiones entre las partículas son prácticamente inexistentes durante la fluidificación con agua y que a partir de la experimentación resulta que es este fenómeno el que más favorece la limpieza, cualquier mecanismo que las propicie generará un lavado más eficiente. De ahí que el empleo de un lavado superficial como el desarrollado por Baylis o el uso de aire en Europa resulten eficaces. Siendo el segundo método más conveniente ya que propicia la abrasión entre todos los granos del medio y no sólo en la capa superficial.

2.2.2 DURACIÓN DEL LAVADO

La duración del lavado debe ser determinado experimentalmente. Durante el lavado, la turbiedad del agua que sale disminuye progresivamente. Un lavado completo implicaría la salida del agua sin turbiedad. Beaudry (1984), considera que, desde el punto de vista económico una turbiedad de salida de 75 U_{TN} es conveniente (FIGURA 2.8).

ABRASIÓN

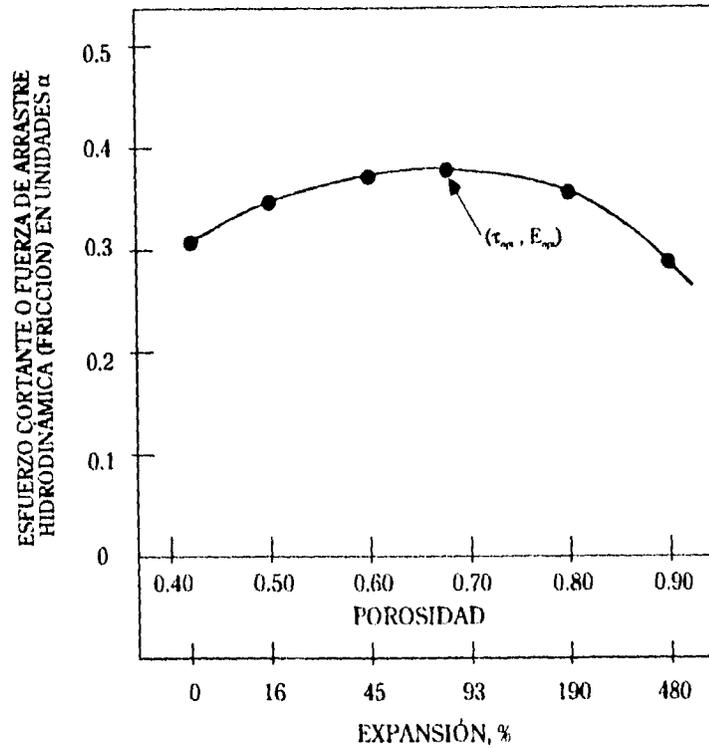


FIGURA 2.7 ESFUERZO CORTANTE EN FUNCIÓN DE LA POROSIDAD PARA MEDIO UNIFORME

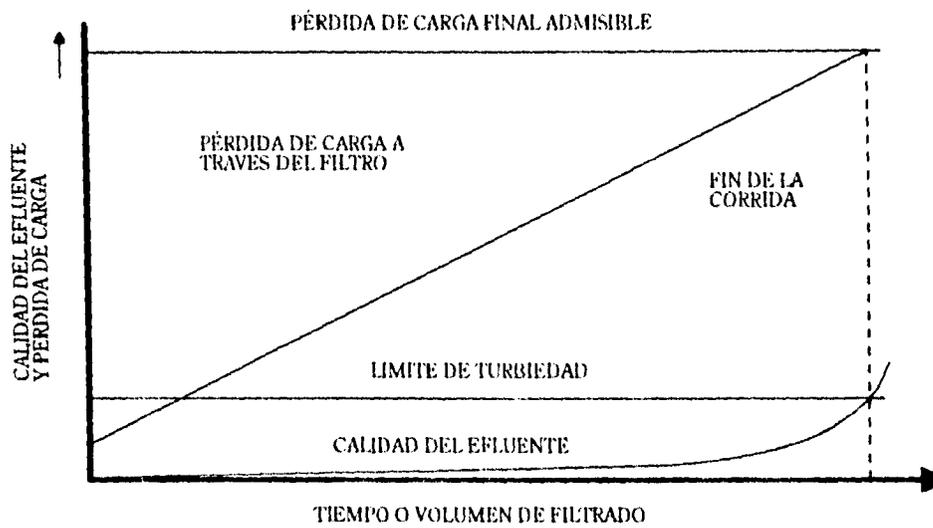


FIGURA 2.8 ESQUEMA PARA DEFINIR LA CORRIDA EN TÉRMINOS DE LA PÉRDIDA DE CARGA Y DE LA CALIDAD DEL EFLUENTE

2.2.3. GRADIENTE DE VELOCIDAD

Arboleda y Cleasby (1979) basados en que la energía suministrada se disipa como:

- Esfuerzo cortante que separe la película del grano.
- Colisiones elásticas entre granos.
- Aumento de temperatura del agua.
- Sonido.

y puesto que no se ha observado ni aumento de temperatura ni se ha escuchado ruido que implicara un consumo importante de energía, despreciaron estos dos términos y desarrollaron la siguiente ecuación para calcular la eficiencia del proceso y el gradiente de velocidad, G :

$$G = \left[K_1 v \left[1 - \left(\frac{vd}{\nu Re} \right)^{1/n} \right] \left(\frac{vd}{\nu Re} \right)^{-1/n} \right]^{(1/2)} \quad (21)$$

donde

- G : gradiente de velocidad.
 K_1 : $g (\gamma_s - 1)$.
 γ_s : peso específico de los granos del empaque.
 v : velocidad en columna vacía, (m/s).
 d : diámetro del grano, (m).
 ν : viscosidad cinemática, ($1.01 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ a 20°C).
 Re : número de Reynolds, calculado con la relación empírica dada por Cleasby y Baumann (1977).

$$R_e = K Ga^x \quad (2.2)$$

- k y x** : constantes empíricas con valores diferentes para cada material. Por ejemplo: arena, antracita o grava.
- Ga** : número de Galileo, adimensional que no depende ni de la velocidad de sedimentación ni de la intercepción de los granos.

$$Ga = \frac{d^3 (\rho_s - \rho) \rho_m}{\mu^2} \quad (2.3)$$

- d** : diámetro del grano, (m)
- ρ_m** : masa específica del agua, (101.48 kgs²/m⁴).
- ρ_s** : densidad real de la arena, (kg/m³).
- ρ** : densidad del agua, (kg/m³)
- μ** : viscosidad absoluta del agua (1.03 x 10⁻⁴ kgf s/m² a 20°C).
- n** : valor relacionado empíricamente con el número de Reynolds.

$$n = CRe^z \quad (2.4)$$

C y z : constantes empíricas que dependen del material granular involucrado.

De la ec. 2.1 se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- El gradiente de velocidad (o la fuerza de fricción) que se produce sobre un grano para remover la película adherida se incrementa proporcionalmente con el peso específico y al tamaño de éste. Esto confirma que es más fácil lavar la arena gruesa que la arena fina.
- Las partículas de antracita, que son más ligeras que la arena, producen un gradiente menor a 60 m/h.
- El empleo del gradiente óptimo de lavado es prácticamente imposible desde el punto de vista económico ya que implica tasas muy elevadas (TABLA 2.2).

TABLA 2.2 VELOCIDADES ÓPTIMAS DE LAVADO

MEDIO	TAMAÑO (mm)	TEMPERATURA °C	TASA (m/h)
Arena	0.5	14	80.4
Arena	1.0	14	126.09
Antracita	1.0	14	63.6
Antracita	2.0	14	111.0

d) Generalmente, los gradientes de velocidad producidos durante el lavado son bajos. Para arena gruesa los gradientes de velocidad son alrededor de 400 s^{-1} y para arena fina alrededor de 300 s^{-1} . Mientras que para la antracita varía entre 150 y 300 s^{-1} . Como referencia se señala que para la floculación se emplean generalmente gradientes de 80 s^{-1} y que es suficiente para formar un flóculo que no se desintegre incluso a 100 s^{-1} . Esto indica que los gradientes producidos durante el lavado pueden ser insuficientes para remover los flóculos adheridos al filtro, necesitándose métodos auxiliares de lavado. Por ejemplo introducción de aire.

e) La expansión del lecho disminuye al aumentar la temperatura del agua. Pero ello no implica que la eficiencia del lavado disminuya, ya que el gradiente de velocidad también aumenta. Esto se debe a que la viscosidad del líquido disminuye con la temperatura al igual que la expansión y porosidad del lecho. Así, resulta que aumentar el flujo de agua en la época de calor no se justifica desde este punto de vista (FIGURA 2.9). En efecto para mantener la misma expansión a 5 °C y 20 °C se requiere aumentar la velocidad en 45 m/h pero eso sólo cambia G en 3% (de 324 a 334 s^{-1}). Es decir, el criterio de una expansión determinada no es el adecuado.

2.2.4 EFECTO DE LA TEMPERATURA

Para una misma expansión con agua fría es necesario disminuir el gasto mientras que con agua caliente la cantidad de agua empleada es mayor. Para calcular la variación de la velocidad en función de la temperatura se emplea la ecuación siguiente:

$$V_{1(T)} = b V_1 \quad (2.5)$$

donde:

$V_{1(T)}$: velocidad del agua a la temperatura deseada.

V_1 : velocidad del agua a 18 °C.
b : factor de corrección.

El valor de **b** se presenta en la TABLA 2.3.

TABLA 2.3 VALORES DE **b** PARA LA CORRECCIÓN POR TEMPERATURA. (BEAUDRY, 1984)

TEMPERATURA DEL AGUA, °C	0	5	10	25	30
FACTOR DE CORRECCIÓN, b	0.84	0.89	0.93	1.06	1.10

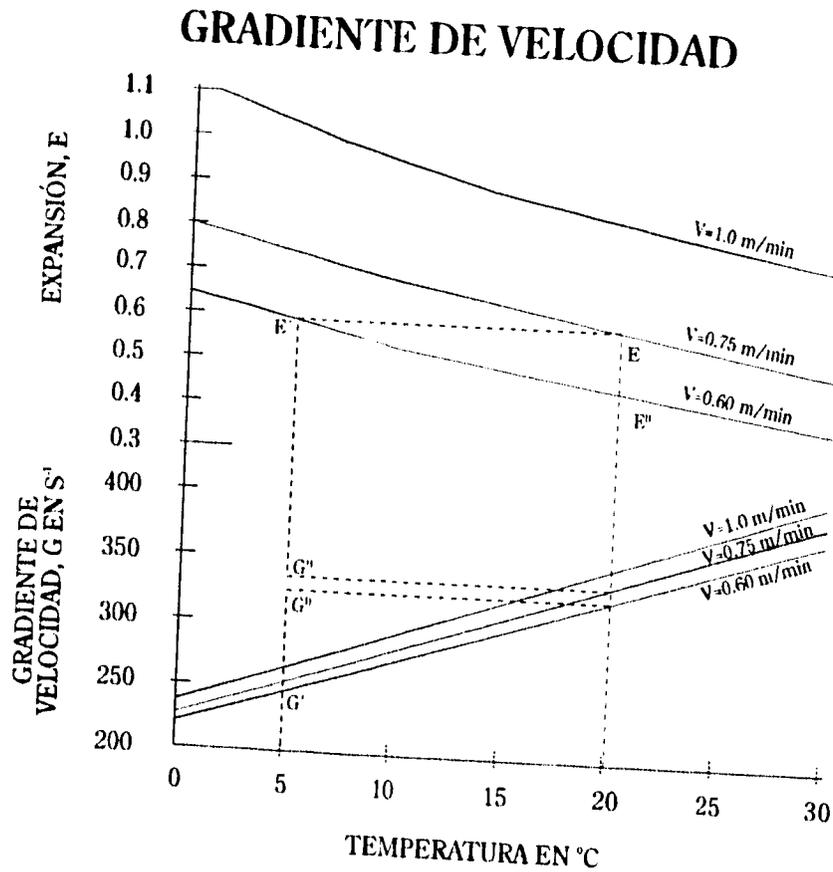


FIGURA 2.9 GRADIENTE DE VELOCIDAD Y EXPANSIONES A DIFERENTES TEMPERATURAS PARA ARENA DE 0.55 mm Y $\rho_s=2.65$. (DATOS EXPERIMENTALES).

2.2.5 ADICIÓN DE REACTIVOS

La fuerza de adhesión, que de hecho también determina el rendimiento de limpieza, depende de la cantidad de reactivos químicos que se hayan añadido al agua. Los reactivos disminuyen el potencial Zeta de los sólidos en suspensión haciendo que las fuerzas de repulsión entre ellas disminuyan y los flóculos crezcan. El potencial Z crece de -28 a 0 mV y el r máx aumenta y por consiguiente la fuerza de adhesión de un aglomerado decrece. Cuando el potencial Z sobrepasa el valor de 0 mV la fuerza de adhesión aumenta (r máx disminuye). Se pudiera esperar que a medida que el potencial Z aumenta la adhesión disminuye, pero lo que más afecta la adhesión es el tamaño de los aglomerados (FIGURA 2.10).

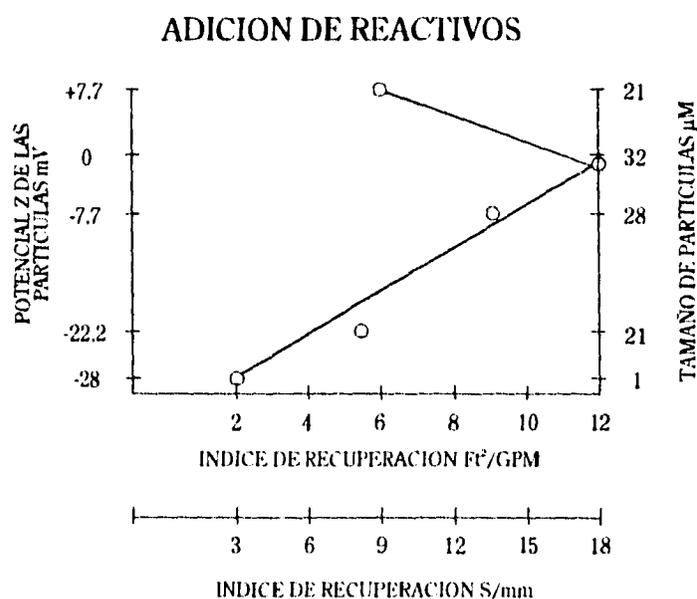


FIGURA 2.10 ÍNDICE DE RECUPERACIÓN Y EL POTENCIAL Z

2.3 MÉTODOS DE LAVADO

Los principales métodos de lavado de filtros profundos son básicamente dos:

- a) Lavado con agua
- b) Lavado con agua-aire

- b.1) Lavado con agua y aire simultáneos
- b.2) Lavado previo con aire.

2.3.1 LAVADO CON AGUA

El lavado con agua consiste en que la tasa de agua empleada produce tanto la fluidificación del lecho como el arrastre de las partículas retenidas, es decir, se suministra una cantidad de agua suficiente para producir una expansión entre 20 y 50% , aunque se han encontrado valores desde 16 hasta 75% .

Si se utilizara la expansión óptima establecida con el criterio de Amirtharajah resultaría que las velocidades deberían aumentar en un 80% a 100% causando pérdidas del medio y desacomodo de la cama de soporte además de emplear una cantidad importante de agua. Por tanto, se aconseja tener una expansión inferior al 50%, aunque el filtro casi siempre queda sucio y se formen aglomerados difíciles de eliminar. Este método es el más antiguo y se aplica mucho en plantas potabilizadoras.

En cuanto a los criterios de velocidad el intervalo oscila entre 19 y 69 m/h. Para medios entre 0.5 y 0.6 mm la velocidad es de 33 a 55 m/h con el señalamiento de que a velocidades bajas es conveniente auxiliarse con aire para el desprendimiento de sólidos y que a velocidades elevadas se pierde el efecto de limpieza por falta de abrasión entre los granos.

Un factor importante de señalar es que el lavado con agua a altas velocidades hace que un medio simple se estratifique. Camp, 1971 demostró que al colocar arena y fluidificarla en un solo lavado el tamaño de los granos localizados en la parte superior es 23% menor que los de la parte inferior.

El lavado con sólo agua se recomienda para medios múltiples puesto que se desea mantener la estratificación. Sin embargo, los medios empleados deben ser tales que la capa superior del medio inicie su fluidificación a una velocidad igual a ligeramente superior que las capas más bajas del medio.

2.3.2 LAVADO CON AGUA Y AIRE

Este método fue adoptado al inicio de la década de los sesenta por Estados Unidos de América. Con medios simples, provoca un intermezclado que es benéfico para la filtración, pero que

requiere un enjuague a una velocidad menor que la de fluidificación para sacar las burbujas de aire retenidas. El aire provoca la fricción entre granos, siempre y cuando el lecho no se encuentre expandido.

A partir de estudios experimentales se ha concluido que las colisiones entre las partículas son prácticamente inexistentes durante la fluidificación con agua, por lo tanto cualquier otro mecanismo que las provoque propician un lavado más eficiente. De ahí que el empleo del aire resulte más eficaz, ya que proporciona la abrasión entre todos los granos del medio y no sólo en la capa superficial.

Cuando se emplea para el lavado sólo agua, ésta debe realizar las funciones de desprendimiento y arrastre, mientras que, si se combina con aire, el agua sirve únicamente como transporte y, dadas las diferentes velocidades de caída de las partículas del medio filtrante (76 a 770 m/h) y de los floculos (6 a 10 m/h), el ahorro en la cantidad de agua empleada resulta interesante. Además este procedimiento es muy efectivo para desbaratar aglomerados.

2.3.3 LAVADO PREVIO CON AIRE

Particularmente, se señala que el lavado con agua sola no es adecuado ya que no se logra remover los sólidos retenidos en las capas más profundas por falta de agitación. Además, de la literatura se desprende que la fluidificación del lecho que ocurre durante la filtración puede estar ocasionada por lavados deficientes que generan el aligeramiento del medio con el tiempo. A este respecto existen varios señalamientos sobre que es necesario introducir aire a presión antes del lavado.

Para el lavado, se baja el nivel del agua en el filtro unos centímetros por debajo del medio y se hace circular aire a presión, a una velocidad señalada en la literatura entre 15 y 90 m/h. Una vez que se han aflojado los sólidos (3 a 120 min) se introduce agua a una velocidad entre 12 y 55 m/h con el objeto de expandir ligeramente el lecho y sacar los sólidos del filtro. Los intervalos más comunes para el aire son de 15 a 30 m/h y, para el agua de 12 a 18 m/h.

Recientemente, se ha encontrado que el uso de aire solo en un lecho con agua causa la compactación del medio. El aire sirve de gran ayuda para desprender los sólidos adheridos a los granos pero dificulta su salida del lecho por su compactación (Cleasby *et al.*, 1977).

Otro método consiste en introducir agua hasta obtener una expansión del 10 al 15%. Posteriormente, se inyecta aire a razón de 15 a 36 m/h por un lapso de 2 a 3 min. Se suspende el flujo de aire y se aumenta la velocidad de agua hasta 36 o 46 m/h.

Una derivación del método anterior, que es especial para arena fina, consiste en bajar el nivel del agua unos centímetros por debajo del nivel del medio filtrante e introducir aire entre 15 y 36 m/h durante 3 a 5 min y, posteriormente agua de 18 a 36 m/h hasta que el agua alcance el nivel de las canaletas de lavado, momento en el cual se suspende la introducción de aire para la pérdida de arena.

2.3.4 LAVADO CON AIRE Y AGUA SIMULTÁNEOS

El método de lavado con agua y aire simultáneos ha sido desarrollado básicamente por los europeos y se ha adoptado en otros países debido a su buen rendimiento.

Durante el lavado con agua y aire se presenta la "fluidificación agregativa o no homogénea", ésta ocurre cuando uno de los fluidos es un gas y se comporta como burbuja, atravesando el medio en forma independiente. Como resultado, en presencia de aire no se puede definir la interfase del lecho expandido (agua-aire) en forma precisa, sino que se observa una interfase relativamente estable que es distorsionada por la salida de burbujas de aire que arrastran consigo arena, deforman la superficie y llevan al empaque por alturas mucho más altas a las definidas por la expansión.

El procedimiento se divide en dos etapas, la primera consiste en suministrar aire y agua al mismo tiempo, el agua con una velocidad entre 10 y 40 m/h, el aire con una velocidad de 20 a 146 m/h con duración entre 2 y 10 minutos. Los intervalos del agua y del aire simultáneamente son de 54 a 90 m/h y 15 a 19.6 m/h respectivamente. La segunda es sólo con agua para sacar los sólidos desprendidos y burbujas de aire.

Tanto el aire como el agua deben introducirse en forma progresiva hasta alcanzar la tasa deseada para evitar el desacomodo del medio. Para medios mixtos reestratificar con agua.

De esta revisión podemos concluir que el lavado con agua y aire simultáneas es el más adecuado, el aire favorece la salida de arena por el burbujeo por lo que su aplicación debe ser en forma controlada.

2.3.5 MÉTODOS AUXILIARES DE LAVADO

Otros métodos fueron empleados utilizando rastras mecánicas, chorros de agua, aire, y pulsaciones. Como resultado el uso de aire fue abandonado en los Estados Unidos alrededor de 1900. Así, aún cuando en la actualidad se considera que el aire es el mejor método auxiliar se emplea también los torniquetes hidráulicos.

Los torniquetes hidráulicos son colocados en la parte superior del filtro. El lavado se realiza con agua generando una expansión del 20 al 40 %, el torniquete debe girar con agua a razón de 4.5 m/h y presión superior de 6 m.c.a. en 3 min.

Este lavado se emplea mucho en los Estados Unidos (Cleasby *et al.*, 1975), se recomienda mantener los torniquetes durante todo el lavado. Para medios múltiples se pueden colocar torniquetes en cada una de las interfases; se pueden instalar fácilmente en casi todo tipo de filtros construidos, de esta manera se puede reducir la cantidad total de agua de lavado ordinario.

En la tabla 2.4 y 2.5 se presenta un resumen de los intervalos señalados en la literatura para los diferentes métodos de lavado.

TABLA 2.4 COMPARACIÓN ENTRE LOS MÉTODOS DE LAVADO (CLEASBY *ET AL.*, 1975).

PARÁMETRO	TIPO DE LAVADO		
	AGUA SOLA	AGUA Y AIRE COMBINADOS	AGUA CON TORNIQUETES
Prueba de abrasión ml/g (antes del lavado)	33.7	9.0	11.3
Número de ciclos de lavado	5	3	2
SS desprendidos en el último ciclo (g/m ²)	72	18	28
Cantidad total de sólidos desprendidos	883	1612	228
Prueba de abrasión después del lavado (ml/g)	15.3	1.9	2.9

TABLA 2.5 INTERVALOS DE LAVADO SEÑALADOS EN LA LITERATURA

MÉTODO	VELOCIDAD DE AGUA (m/h)	VELOCIDAD DEL AIRE (m/h)	DURACIÓN (min)
Sólo agua	19 - 60		
Aire seguido de agua	12 - 55	15 - 90	2 - 10
Aire y agua simultáneos	10 - 40	20 - 146	3 - 5

2.4 FILTROS PILOTOS

Los modelos de filtros pueden construirse para obtener información que puede usarse en el diseño de nuevas instalaciones o controlar la operación de filtros existentes en funcionamiento, en ambos casos el tipo que se suele instalar es bastante parecida, pero el programa de trabajo es diferente.

Una estación experimental de filtro puede constar de las siguientes partes:

- a) Columnas de filtración.
- b) Sistema de entrada.
- c) Sistema de salida (control de la velocidad de filtración).
- d) Sistema de lavado.
- e) Tablero de piezómetros.
- f) Sistema de medición de turbiedad.

Hay que tener en cuenta que no se puede establecer verdaderos modelos del proceso de filtración. Dado que las partículas que se tratan de filtrar no pueden reproducirse a una escala menor, sino que conservan su tamaño natural durante los ensayos. Los otros parámetros que influyen en el proceso tales como el diámetro del medio filtrante, la porosidad (o área de paso del flujo), la profundidad del lecho, etc., deben hacerse con la misma escala del prototipo.

Lo único que se puede disminuir es el área superficial del filtro, para que trabaje con un flujo varias veces menor y sea más fácil de medir y controlar.

La relación entre el flujo con que trabaja el prototipo y el flujo del modelo no tiene mayor significado, ya que la filtración depende más de las características de la suspensión y del medio granular que de la forma y tamaño de la estructura en donde se realiza.

Hay que observar sin embargo, que al hacer el filtro cada vez más reducido, la relación entre el perímetro y su área aumenta y por tanto cuanto más pequeño sea el modelo, proporcionalmente mayor cantidad de granos están en contacto con las paredes del recipiente.

Como los poros formados por los granos y la superficie de las paredes son diferentes a los que existen dentro del lecho, esto puede crear una restricción al tamaño mínimo del filtro experimental que se construya.

Empíricamente se ha establecido que la relación entre el tamaño máximo del grano y el diámetro del filtro no debe ser menor de 1 a 50. Lo cual significa que si se usa un medio filtrante cuyas partículas más grandes tienen 2 mm de diámetro, el tubo en el que se coloquen no debe ser menor de 100 mm (4").

Como regla general podría decirse que los experimentos sobre filtración no deben realizarse en tubos menores de 10 cm (4"), y preferentemente 15 cm (6") para esquivar la influencia de las paredes.

2.4.1 COLUMNAS DE FILTRACIÓN

Las columnas de filtración pueden hacerse prismáticas o cilíndricas con materiales opacos o traslúcidos, el uso de plásticos transparentes es altamente recomendable, pues ofrecen la facilidad de poder observar el proceso de filtración y de lavado, mientras se realice éste.

El gasto dado por las columnas experimentales se suele aforar en l/min o cc/min. Estos aforos pueden hacerse con un rotámetro colocado a la entrada del filtro, o volumétricamente tomando a la salida del mismo, el tiempo que tarde en llenarse un cilindro graduado de uno o dos litros.

El medio filtrante se coloca en el modelo en la misma forma en que va en el prototipo. La altura mínima de la columnas es de 1.0 m, si se elimina los lechos de grava y se tiene 60 cm de lecho granular que se expande el 50 % durante el lavado. La carga adicional sobre el filtro se puede construir dejando un tubo de menor diámetro sobre la columna. Es preferible, sin embargo, usar alturas de 1.60 a 2.00 m, para que quede amplio espacio para expandir el lecho sin que pierda medio filtrante.

2.4.2 SISTEMA DE ENTRADA

La entrada al filtro se puede hacer por bombeo o por gravedad. En este último caso hay que dejar un tanque de carga constante con objeto de mantener el mismo nivel de agua en los filtros. Este tanque debe diseñarse de tal modo que no ocurra sedimentación dentro de él, lo que alteraría las características del afluente.

La forma más simple de conservar el nivel constante, consiste en que se deje en él un verdadero de reboso que funcione permanentemente, lo cual tiene la ventaja adicional de mantener una mayor velocidad en las tuberías y disminuir así la posibilidad de depósito de lodos dentro de ellas. sin embargo, el consumo de agua de la instalación piloto en este caso es mucho mayor.

2.4.3 SISTEMA DE CONTROL

El sistema de control puede hacerse a la entrada o a la salida. Si se hace a la salida puede consistir en: (a) una válvula de aguja y (b) un flotador que oprima una manguera elástica. Puede también comprarse válvulas especiales reguladoras del gasto. El tipo (a) está formado por un flotador que acciona una válvula de aguja. Para que trabaje debe haber presión atmosférica en la caja. El tipo (b) es una forma de restringir el flujo en una manguera de goma, para mantener una carga constante sobre la salida. Pueden colocarse dos válvulas: una para abrir o cerrar el flujo y la otra par regular el gasto, ambas pintadas de colores diferentes.

Debe tenerse en cuenta en que todo regulador de flotador, éste se hunde más o menos según la presión que necesita ejercer para oprimir la manguera o mover el émbolo, y por tanto el nivel de agua en la caja sube y el gasto es un poco mayor que cuando el filtro está sucio y el flotador se hunde menos. La variación de nivel puede ser de uno a dos centímetros entre el principio y el final de la carreta. Para compensar esto, la manguera que se use debe ser muy elástica y la caja de 40-50 cm de lado, a fin de disminuir el efecto de los cambios de nivel del agua, sobre la válvula efluente.

La regulación de la velocidad en los filtros puede hacerse también a la entrada dividiendo el flujo por medio de vertedores u orificios entre las distintas unidades de manera que les entre un flujo constante. En este caso se requiere permitir una variación de nivel sobre el lecho del filtro de 1.8 a 2.4 m.

2.4.4 SISTEMA DE LAVADO

El agua para el lavado puede bombearse de un tanque o sacarse por gravedad de un depósito a presión. Para medir el flujo de lavado se puede usar un rotámetro o se puede hacer volumétricamente colocando un recipiente calibrado al cual se le ha dejado una manguera externa sobre una escala graduada para apreciar la altura del agua en él. El aforo de dicho tanque se puede hacer con un cilindro de laboratorio, vertiendo diferentes volúmenes y marcándolos en la escala.

Al comenzar el lavado e iniciarse la expansión del medio granular a veces éste se aglutina y hay necesidad de golpear las paredes del tubo para conseguir que ascienda uniformemente. Esta operación puede durar algo menos de un minuto, mientras se consigue expandir el lecho hasta la altura que se desea. Manualmente se puede regular el flujo para mantener este nivel. Sin embargo, durante esta primera parte, la razón de lavado no es la normal. Hay que esperar hasta que la columna del lecho filtrante se estabilice para medir el caudal, observando durante un tiempo predeterminado el aumento de volumen en el tanque de lavado.

2.4.5 SISTEMAS DE MEDICIÓN DE TURBIEDAD

Generalmente se toma la turbiedad como el parámetro básico para evaluar la eficiencia del proceso de filtración ya que en sí engloba otros factores. Esta se puede medir tanto en el afluente y en el efluente del filtro, así como a diferentes alturas dentro del lecho filtrante. La turbiedad puede determinarse constantemente con un monitor apropiado o tomando muestras a intervalos regulares. Cuando se quiere analizar la remoción de partículas efectuada por cada capa del lecho, se pueden tomar muestras internas dentro de él, cada cierto tiempo en diferentes puntos. Para este trabajo no se usan monitores de turbiedad por cuanto el volumen de agua que requieren es relativamente grande.

2.4.6 PIEZÓMETROS

El control de la pérdida de carga a diferentes niveles del lecho filtrante es una de las observaciones más valiosas que se pueden hacer en un proceso de filtración. Analizando la forma cómo la pérdida de carga se desarrolla dentro del filtro, se puede saber dónde queda retenida la mayor cantidad de materia suspendida y qué tanto penetra el flóculo en profundidad. También permite localizar los sectores donde se produce presión inferior a la atmosférica, cuando la hay.

Los piezómetros deben penetrar ligeramente dentro del filtro y tener un diámetro no muy superior al del medio granular en donde están colocados. Por lo general se hacen de 0.5 a 1.0 mm de diámetro interno. Para evitar que se tapen, debe dejárseles facilidades de drenaje. Igualmente, hay necesidad de cerrar la entrada de agua a ellos, cuando se hace el lavado, para evitar que puedan penetrar granos del lecho o salir chorros de agua. El cuerpo principal del piezómetro se puede hacer de vidrio o de manguera plástica transparente; por su precio, es preferible esta última. De cualquier forma, el diámetro interno debe estar alrededor de 1/2" para evitar burbujas de aire.

Todos los piezómetros se llevan a un tablero, donde se marca cero, para el nivel superior del filtro y de 10 a 10 cm hacia abajo, de tal manera que la pérdida de carga se puede leer directamente. Para facilitar las lecturas, se puede colocar una bolita de caucho negro en cada uno, a fin de señalar mejor la altura del agua en ellos. La forma más segura, aunque no la más barata de leer los piezómetros, es tomándoles una fotografía a intervalos regulares. En otros casos, se observa directamente cada uno y se anota los valores en una tabla especialmente preparada para el efecto.

2.5 CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO

La arena (producto de la desintegración natural de ciertas rocas por la meteorización y la erosión) es el material más empleado para la filtración tanto en los procesos lentos, como en los rápidos, pero, en los últimos años el cuarzo, el tezontle, la antracita y otros materiales triturados mecánicamente han sido propugnados para reemplazar a la arena.

Uno de los primeros trabajos de examen de la arena fue el de Allen Hazen para la Junta de Sanidad del Estado de Massachusetts en 1892. Hazen estableció dos factores "Tamaño Efectivo" y "Coeficiente de Uniformidad" que se emplean para caracterizar al medio filtrante. Se entiende por TE el tamaño de la apertura de un tamiz que deja pasar al 10 por ciento, en peso, y que retiene al 90 por ciento. El CU es la relación entre el tamaño de la apertura del tamiz que retiene al 60 por ciento de la muestra y el que retiene al 10 %.

$$CU = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (2.6)$$

donde

- D₆₀:** Apertura de la malla tal, que el 60% en peso, del material, sea igual o menor.
- D₁₀:** Diámetro efectivo; tamaño de la apertura del tamiz que retiene al 90 % de partículas en peso.

En sí esta relación es un coeficiente de no uniformidad, pues su valor numérico decrece cuando la uniformidad aumenta. Los suelos con CU de 3 se consideran muy uniformes; las arenas naturales más uniformes rara vez presenta un CU de 2, en filtración se recomienda un CU de 1.5 a 1.7.

El examen granulométrico se hace generalmente con tamices de 8 pulgadas de diámetro aproximadamente porque 1000 gramos es la cantidad que se usa normalmente para el análisis de tamices. La arena se seca y se coloca en el tamiz de mayor tamaño. Los tamices encajan unos en otros y cuentan con una tapa en la parte superior y una bandeja en el fondo. Los tamices pueden sacudirse a mano, pero en general se emplea una máquina sacudidora, que están engranadas de modo que 150 vueltas de la manivela producen 700 sacudidas a los tamices, que es lo que se considera suficiente. Con este procedimiento, una prueba requiere 20 a 30 minutos en máquinas manuales, en general, se especifica un tamizado de 15 minutos para máquinas sacudidoras automáticas. Cuando se ha terminado de sacudir, se pesa y se anota la cantidad de arena retenida en cada una y se calcula el porciento retenido así como el que pasó.

Siempre que se cuente con suficiente número de puntos, la representación gráfica de la distribución granulométrica debe preferirse a la numérica. La gráfica granulométrica suele dibujarse con porcentajes como ordenadas en una escala aritmética y tamaños de las partículas como abscisas en la escala logarítmica. El empleo de papel semilogarítmico se recomienda ya que se dispone de mayor amplitud en los tamaños finos y muy finos, que en escala natural resultan muy comprimidos. Además la forma de la curva proporcionada una idea de la distribución granulométrica del material; un medio constituido por partículas de un solo tamaño, estará representado por una línea vertical (pues el 100% de sus partículas, en peso, es de menor tamaño que un valor dado, mientras que una curva muy tendida indica gran variedad de tamaños (material bien graduado).

La arena empleada para la filtración puede obtenerse de las playas, de los lechos de los ríos, de los bancos de arena o triturando el cuarzo. Se compone principalmente de cuarzo pero puede contener silicatos duros. La arena se encuentra frecuentemente mezclada con arcilla u

otras partículas finas que deben quitarse mediante lavado antes de emplearla en la filtración.

En la elección de la arena (ANEXO I) para los filtros de acción rápida es indispensable tomar en consideración dos factores: primero, el descenso del agua a través de la arena; segundo, el paso del agua limpia hacia arriba a través de la arena. Después de numerosos experimentos, Armstrong (1928) llegó a las siguientes conclusiones.

- * Desde el punto de vista de la filtración conviene tener una arena que:
 - a) Evite el paso de flóculos a través de los filtros,
 - b) Detenga los flóculos lo más flojamente posible para facilitar el lavado y evitar la formación de depósitos de lodo, y
 - c) Detenga el mayor volumen posible de flóculos sin obstruirse.

- * Desde el punto de vista del lavado, conviene tener una arena que:
 - a) Se limpie sola y quede libre de flóculos adherentes al final de un lavado,
 - b) Permita el peso de agua con suficiente velocidad para quitar todos los sedimentos sin perder arena.

Los métodos actuales tienden hacia un mejor tratamiento preliminar del agua, una arena más gruesa y velocidades más altas de lavado, con el lavado de superficie como parte esencial de la instalación. En 1936 un informe de un comité de la Asociación Americana de Ingenieros Civiles sobre este tema dió este bien formulado sumario:

La tendencia actual de los métodos de ingeniería indica una variación en el tamaño efectivo de la arena entre los límites aproximados de 0.4 mm y 0.5 mm, con cierta indicación de preferir arenas gruesas cuando es posible tomando en consideración los diversos factores que entran en el proyecto de la planta y su mantenimiento. Los resultados del trabajo experimental de Armstrong parece, en general, justificar este método.

Aunque estos estudios no abarcan todas las variables de las condiciones de una planta, las arenas gruesas indican la siguiente tendencia general:

- a) Una duración más larga de los filtros.
- b) Presentan a un mejor lavado.
- c) Permiten una mayor penetración de los flóculos y por lo tanto se necesita una capa más gruesa de arena.

Otros estudios dicen que la arena que se usa en los filtros rápidos es de menos de 2.0 mm de diámetro, y está compuesta de material silíceo con un dureza de 7 en la escala de Moh (ANEXO II) y un peso específico no menor de 2.6. Deberá estar limpia: sin barro ni materia orgánica, y no más del 1 % podrá ser material laminar o micáceo.

La solubilidad en HCl al 40 % durante 24 horas tiene que ser menor del 5 % y la pérdida por ignición menor del 0.7. Con coeficiente de uniformidad menor o igual que 2. Los diseñadores europeos suelen preferir este tipo de arena con diámetros entre 0.8 y 1.0 mm. La práctica americana utiliza arena con coeficiente de uniformidad entre 1.50 y 1.70 y tamaño efectivo entre 0.40 y 0.70, con preferencia entre 0.45 y 0.55. No más del 1 % debe ser mayor de 2 mm o menor de 0.3 mm.

Baylis (1937) considera que la longitud de la carrera de filtración, puede establecerse a partir del tamaño efectivo del medio filtrante.

$$t = K TE^n \quad (27)$$

donde:

- t: período de servicio o carrera del filtro,
- TE: tamaño efectivo,
- K: constante que depende de las características del floc,
- n: exponente aproximadamente igual a 2

Pequeñas variaciones en el tamaño efectivo puede significar notables cambios en las carreras de filtración, dado que el tiempo t varía en forma exponencial con respecto a TE.

Cuando se lava el lecho filtrante con flujo ascendente, la arena se estratifica según la ley de Stokes por sus pesos y tamaños, quedando los granos más gruesos en la parte inferior y los más finos en la superior. Estos últimos son los que crean mayor resistencia al paso del agua y, por eso, deben removerse cuando son menores de 0.3 mm.

La porosidad de la arena se relaciona con su forma: las arenas redondeadas tienen porosidades que varían entre 40 y 44 % y las arenas angulares tienen, porosidades mayores (entre 42 % y 46 %). La porosidad varía según el grado de compactación del lecho y la limpieza del mismo. Los lechos sucios tienen bajas porosidades, y al progresar la carrera de filtración se compactan. Comúnmente a menor porosidad mejor es la calidad del efluente, pero la pérdida de carga

aumenta más rápidamente debido a una menor capacidad de almacenaje de partículas en los poros.

Las arenas angulosas o trituradas, si bien tienen una mayor porosidad, producen una pérdida de carga inicial más alta y son más difíciles de lavar. Se prefiere por eso las arenas de río, de formas redondeadas o esferoidales.

La situación actual de la técnica de filtración incluye muchos factores que no están determinados. No se puede fijar límites definidos para el tamaño de la arena sin tomar en consideración otros factores, como los costos de inversión y operación.

2.6 TEORÍA DE LA DIFUSIÓN: FLUJO DE PARTÍCULAS

A partir de las experiencias y teorías planteadas en el Instituto de Ingeniería (S. Bribiesca, F. Mariles, Jiménez C.), se ha desarrollado un método de lavado denominado por criba hidráulica. Los fundamentos teóricos de este método se presentan a continuación.

Cuando en un recipiente de volumen ∇ como el mostrado en la figura 2.11 se pone un volumen ∇_s de cierta sustancia, se dice que la concentración de esa sustancia en el recipiente está dada por el cociente:

$$C = \nabla_s / \nabla \quad (28)$$

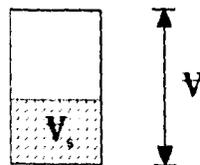


FIGURA 2.11 CONCENTRACIÓN DE PARTÍCULAS

Puede suceder que, si la sustancia está formada por partículas muy pequeñas y dentro del recipiente hay un fluido, en atención a los movimientos brownianos de las moléculas de éste, la sustancia se difunda "espontáneamente" en todo el recipiente de modo que al cabo de cierto

tiempo, se tenga lo que se muestra esquemáticamente en la figura 2.12. este tipo de difusión se llama molecular.

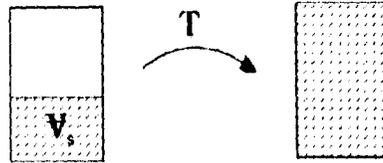


FIGURA 2.12 DIFUSIÓN MOLECULAR

Si la sustancia está formada por partículas de diversos tamaños las más grandes se precipitarán al fondo, a menos que se agite el recipiente como lo indica la figura 2.13, en cuyo caso se dirá que se trata de una difusión mecánica. Debido a la turbulencia, el paso de una corriente de líquido puede ocasionar este tipo de difusión, arrastrando a las partículas que viajarán en suspensión, con lo cual la concentración podrá variar, en el tiempo, en cada zona del recipiente. Naturalmente que si la corriente cesa, las partículas retornarían al fondo.



FIGURA 2.13 DIFUSIÓN MECÁNICA

Ahora bien las partículas acumuladas en el fondo alcanzarían una altura h como se indica en la figura 2.14a, pero se acomodarían de tal modo que habría huecos entre ellas. Así, se imagina que si todo el volumen ocupado por las partículas se reuniera, se alcanzaría una altura h_s , por lo que habría un complemento h_e para dar la altura total h , según se muestra en la figura 2.14b. Suponiendo que el ancho del recipiente fuera Δs y que tuviera un espesor unitario, podría escribirse para el volumen que

$$\Delta sh = \Delta s (h_s + h_e) \quad (2.9)$$



FIGURA 2.14 RELACIÓN DE VACÍOS

Por otra parte, $\Delta s h_s = \nabla_s$, será el volumen de la sustancia colocada en el recipiente, por lo cual $\Delta s h_v$ será el volumen ocupado por los huecos entre partículas, de modo que la relación anterior también podrá escribirse como

$$\Delta s h = \nabla_s + \nabla_v = \nabla_s \left\{ 1 + \frac{\nabla_v}{\nabla_s} \right\} \quad (2.10)$$

Se llama relación de vacíos al cociente $e = \nabla_v / \nabla_s$, y es un valor característico de cada sustancia granular. De esta manera, de la ec 2.10 se obtiene

$$h = \frac{\nabla_s}{\Delta s} (1 + e) \quad (2.11)$$

Esta interesante relación tiene dos implicaciones de importancia. La primera es que, conocido el volumen de la sustancia granular y su relación de vacíos, se podrá conocer la altura sobre el fondo que alcance el volumen de sustancia al depositarse en el fondo. La segunda es que, si se conoce la altura h , como la relación de vacíos es una constante, el volumen ∇_s quedaría definido de tal manera que la concentración de la sustancia acumulada en el fondo no podrá exceder un cierto valor máximo CM.

En adición deberá tenerse presente que, en ciertas ocasiones, si las partículas son relativamente grandes y la corriente no es muy fuerte, las partículas viajarán por el fondo. Pero, si sucede lo

contrario, podrá suponerse que ellas viajan en suspensión y que, en tal caso las leyes de la difusión mecánica permitirán conocer sus concentraciones.

En la figura 2.15a se muestra la celda I de un tanque y se indica la nomenclatura de las celdas circunvecinas. Puede suponerse que según se muestra en la figura 2.15b, durante un lapso Δt , proveniente de la celda I-N ingresará un volumen de sustancia a la celda I de valor $C_{Ij-N} u_{I-N} \Delta t$ y que, en el mismo intervalo y hacia I + N saldrá de la celda I el volumen $-C_{Ij} u_I \Delta t$; al mismo tiempo ingresaría, desde I+1 un volumen $C_{Ij+1} v_{I+1} \Delta t$ y saldrá hacia I-1 un volumen $-C_{Ij} v_I \Delta t$. Si además la sustancia incrementa o disminuye su concentración en ΔC_I^* en ese lapso por causas ajenas al flujo, sucederá que el cambio total de concentración ΔC_I que se produzca en la celda I en el intervalo Δt se podrá valorar por medio de

$$\Delta C_I y_I \Delta_s^2 = \Delta C_I^* Y_I \Delta_s^2 + (C_{Ij-N} u_{I-N} - C_{Ij} u_I + C_{Ij+1} v_{I+1} - C_{Ij} v_I) \Delta t \quad (2.12)$$

Si J designa a las concentraciones al principio del intervalo Δt y J+1 al final de él, de la ec. 2.12 se concluye que

$$C_{Ij+1} = C_{Ij} + \Delta C_{Ij+1}^* + (C_{Ij-N} u_{I-N} + C_{Ij+1} v_{I+1} - C_{Ij} u_I - C_{Ij} v_I) \frac{\Delta t}{y_I \Delta_s^2} \quad (2.13)$$

La ec. 2.13 muestra un sencillo criterio para ir conociendo la evolución de las concentraciones en un cuerpo de agua, a partir de valores iniciales supuestos para la concentración en cada celda, si se conoce el patrón de flujo en ese cuerpo. Evidentemente se trata de un proceso iterativo.

Esta ecuación a pesar de su aparente simplicidad debe manejarse con mucho cuidado, en efecto, puede conducir a concentraciones "negativas", lo cual es absurdo, o a una concentración mayor que la máxima permisible CM. Por este motivo debe considerarse que dicha ecuación indica solamente una tendencia en la evolución de las concentraciones en el tiempo, de tal manera que los resultados que de ella se obtengan deberán compensarse en cada iteración. Los criterios de compensación variarán con el tipo de problema por resolver, si bien muchas veces estarán basados en el principio de continuidad. También deberán tomarse precauciones adicionales para estudiar las celdas en donde principia o termina el flujo de partículas.

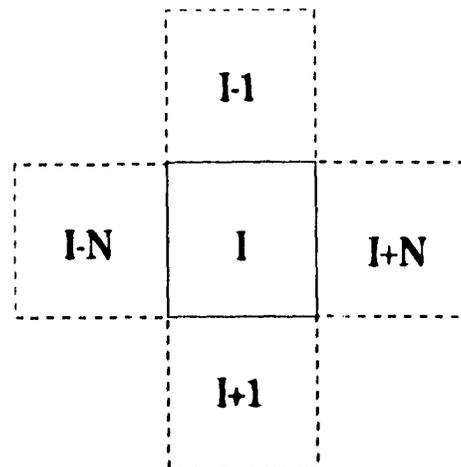


FIGURA 2.15a CELDA / DE UN TANQUE CON LA NOMENCLATURA DE LAS CELDAS CIRCUNVECINAS

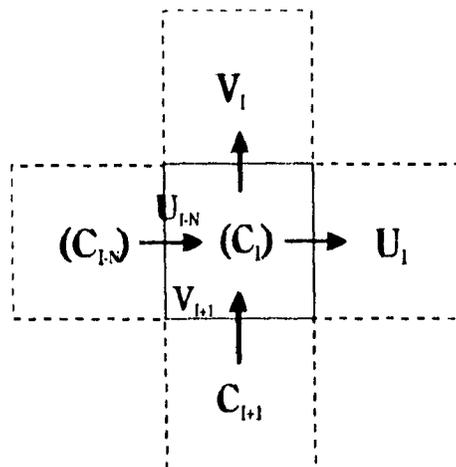


FIGURA 2.15b CAMBIO TOTAL DE CONCENTRACIÓN EN LA CELDA /

Por lo demás, si se recuerda que el gasto está dado por $U_I = \gamma_{I-1} u_I \Delta s$, en muchos problemas γ_I puede ser igual o prácticamente igual en todas las celdas, además de manera que, si se considera que ΔC_I es nula, de la ec. 2.12 puede obtenerse:

$$\frac{\Delta C_I}{\Delta t} = \frac{C_{I-N} u_{I-N} - C_I u_I}{\Delta s} + \frac{C_{I+1} v_{I+1} - C_I v_I}{\Delta s} \quad (2.14)$$

$$\frac{\Delta C_I}{\Delta t} = \frac{\Delta(Cu)}{\Delta s} + \frac{\Delta(Cv)}{\Delta s} \quad (2.15)$$

$$\frac{\Delta C_I}{\Delta t} = u \frac{\Delta C}{\Delta x} + v \frac{\Delta C}{\Delta y} + C \left(\frac{\Delta u}{\Delta x} + \frac{\Delta v}{\Delta y} \right) \quad (2.16)$$

Así que por definición de derivada parcial podrá escribirse

$$\frac{\partial C}{\partial t} = u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + C \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (2.17)$$

De tal manera que por la ecuación de continuidad, se obtendrá la forma más conocida de establecer la ecuación de la difusión mecánica, que es igual a:

$$u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (2.18)$$

En muchas ocasiones y según el sistema de referencia empleado, la ecuación aparece igualada a cero.

Capítulo 3

DESARROLLO DEL MODELO MATEMÁTICO

3. DESARROLLO DEL MODELO MATEMÁTICO

3.1 DESCRIPCIÓN Y MODELACIÓN DEL MÉTODO DE LAVADO PROFUNDO

En el tratamiento de agua, uno de los pasos más importantes es la filtración, el cual se efectúa haciendo pasar una corriente de agua que contiene flóculos a través de un medio filtrante constituido por un material poroso en donde se retienen esas partículas. Al operar el filtro las impurezas van taponando el material granular, por lo que la rapidez con que se realiza el proceso disminuye gradualmente. Por eso es necesario lavar el filtro periódicamente. Para hacerlo se inyecta una corriente de agua limpia en sentido contrario de la filtración, con objeto de expandir el material granular y propiciar la salida de los flóculos atrapados.

Para expandir el material granular se requiere que la contracorriente tenga una velocidad mayor que la de caída de los granos, pero, si ella se mantiene demasiado tiempo, acabará por remover no sólo a los flóculos sino, también, a todo el material granular. Al introducirse la corriente de lavado, los granos de arena tendrán una cierta velocidad de ascenso que dependerá de su tamaño y de su densidad y, como estos granos estarán situados hacia el fondo del tanque, transcurrirá cierto tiempo para que, con esa velocidad, asciendan hasta la parte superior y empiecen a salir. De igual manera ocurrirá con las partículas que hubieran taponado al filtro; mas considerando que ellas tendrán menor tamaño y densidad que los granos de arena, es muy lógico que asciendan más rápidamente al introducirse la corriente de lavado.

Esto sugiere la conveniencia de lavar por ciclos sucesivos, de tal manera que en cada uno de ellos haya dos etapas. En la primera la velocidad de la contracorriente será superior a la de caída de los granos, en la segunda será menor para propiciar el retorno de los granos hacia el fondo. La velocidad de caída de los granos será notoriamente mayor que la de los flóculos, lo que producirá que estos últimos viajen hacia la salida más rápidamente en la primera etapa y más despacio en la segunda, sin que por ello se escape del filtro una cantidad muy grande del material granular.

Partiendo de los datos como la geometría del filtro, las propiedades de los granos y de los flóculos y el costo del agua de retrolavado y del material granular, se elaboró un modelo

matemático (Bribiesca 1990) con el fin de obtener la eficiencia del lavado, así como minimizar el costo de los volúmenes de agua empleada y arena perdida.

Este análisis empezará por idealizar al filtro representado por una columna de altura H , dividido en N celdas de altura Δs , la inferior es la 1 y la superior es la N , donde los granos ocuparán una altura h desde el fondo, con el máximo de concentración posible, MC , además a lo largo de esta altura se encontrarán distribuidos los floculos de obstrucción, el ancho del filtro es de Δs y su espesor, normal al papel, es unitario (FIGURA 3.1 y 3.2).

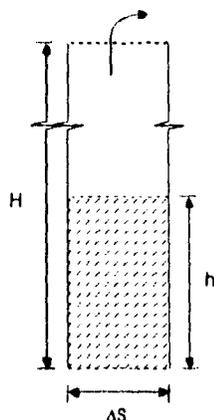


FIGURA 3.1 COLUMNA QUE REPRESENTA UNA ALTURA H , DIVIDIDA EN N CELDAS DE ALTURA Δs

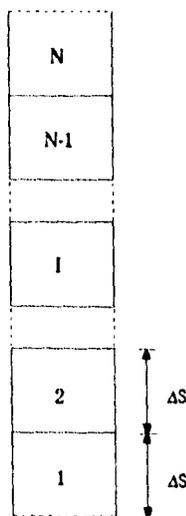


FIGURA 3.2 COLUMNA DE FILTRACIÓN IDEALIZADA DIVIDIDA EN N CELDAS, LA INFERIOR ES LA 1 Y LA SUPERIOR LA N .

Para simplificar el análisis se supondrá que el tiempo T_E de duración de cada etapa en cada ciclo es constante y que la velocidad de la contracorriente será $V_s = V_a$ en la primera etapa y $V_s = V_a/2$ en la segunda. Se considerará además que la velocidad de caída de las partículas es V_c , por lo tanto la velocidad real de la corriente con que viajarán las partículas será $V_f = V_s - V_c$, de tal modo que si $V_f > 0$ las partículas tenderán a subir y podrán salir por la parte superior del filtro, en tanto que si $V_f < 0$ las partículas se precipitarán hacia el fondo. Se usa $\Delta t = 1s$ por facilidad de cálculos.

Cuando la corriente de partículas sube, consideramos a Z_1 como la concentración en el instante t_0 en la celda I y Q_1 la concentración en esa misma celda, en el instante $t_0 + \Delta t$. La ecuación de balance durante el intervalo de tiempo Δt , se plantea como:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Partículas que} \\ \text{entran a la celda I} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{Partículas que} \\ \text{salen de la celda I} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Cambio de cantidad} \\ \text{en la celda I} \end{array} \right\} \quad (3.1)$$

Para las etapas de lavado con $V_f > 0$ la ecuación anterior corresponde a

$$Z_{1-1} \Delta_s |V_f| \Delta t - Z_1 \Delta_s |V_f| \Delta t = (Q_1 - Z_1) \Delta_s^2 \quad (3.2)$$

En esta forma se sabe que por la parte inferior de la celda I no entran partículas, y se establece que $F_0 = 0$.

Al despejar Q_1 de la ec. 3.1 se tiene

$$Q_1 = \frac{Z_{1-1} \Delta_s |V_f| - Z_1 \Delta_s |V_f| \Delta t - Z_1 \Delta_s^2}{\Delta_s^2} \quad (3.3)$$

Si se considera

$$F_1 = Z_1 |V_f| \Delta t / \Delta_s \quad (3.4)$$

Entonces la ecuación 3.2 puede escribirse como:

$$Q_1 = Z_1 + F_{1-1} - F_1 \quad (3.5)$$

Esto significa que cuando la corriente de partículas ascienda la expresión anterior permitirá calcular la concentración en cada celda en el instante $t_0 + \Delta t$, a partir de la concentración en el instante t_0 en la celda y en la situada debajo en ella.

Además, el volumen de partículas que podría salir del filtro en el lapso Δt está dado por

$$\Delta V_s = F_N \Delta s^2 \quad (3.6)$$

Si la corriente de partículas desciende, en lugar de la ecuación (3.2) se tendrá que:

$$Z_{1+1} \Delta s |V_f| \Delta t - Z_1 \Delta s |V_f| \Delta t = (Q_1 - Z_1) \Delta s^2 \quad (3.7)$$

Al despejar Q_1 de la ec.(3.7), se tiene

$$Q_1 = \frac{Z_{1+1} \Delta s |V_f| - Z_1 \Delta s |V_f| \Delta t + Z_1 \Delta s^2}{\Delta s^2} \quad (3.8)$$

3

De tal manera que si para este caso se establece que:

$$F_1 = Z_{1+1} |V_f| \Delta t / \Delta s \quad (3.9)$$

La ecuación 3.7 resulta ser

$$Q_1 = Z_1 + F_1 - F_{1-1} \quad (3.10)$$

En este caso se tendrá que las partículas no saldrán por la parte inferior de la celda por lo que $F_0 = 0$ y dado que el flujo de partículas es hacia abajo $F_N = 0$, por lo tanto

$$\Delta V_s = 0 \quad (3.11)$$

De manera esquemática se puede observar en la FIG. 3.3 la forma de realizar el cálculo para los flóculos y para la arena en las dos etapas de cada ciclo.

COLUMNA DE UN TANQUE DE FILTRADO

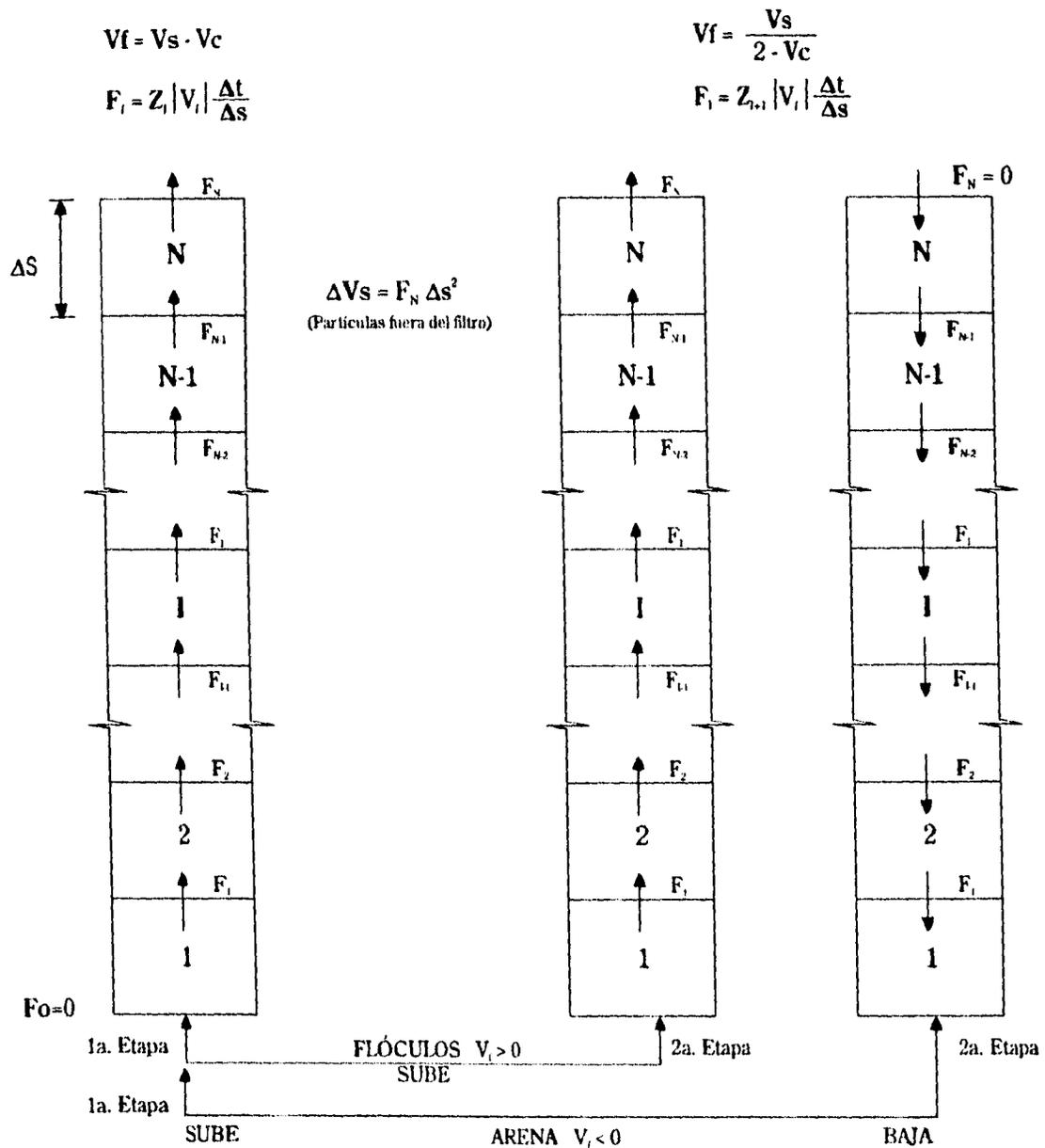


FIGURA 3.3 FORMA DE REALIZAR EL CÁLCULO PARA LOS FLÓCULOS Y PARA LA ARENA EN LAS DOS ETAPAS

Los resultados que se obtienen mediante las ecuaciones 3.5 y 3.9 dan únicamente la tendencia de los valores de las concentraciones, pero teniendo en cuenta que estas deberán cumplir con la condición $0 = Q_1 = MC$, se utilizará el principio de continuidad, es decir, es necesario hacer compensaciones.

Si V_D es el volumen de partículas dentro del filtro en el instante t_0 y para $t_0 + \Delta t$ se calculan las concentraciones Q_1 en cada celda, algunos de estos valores podrán resultar negativos. Entonces $(\sum Q_1) (\Delta s)^2$ sería el volumen de partículas en las celdas en donde $Q_1 > 0$, de modo que si en el lapso Δt el volumen de partículas que salió del filtro es ΔV_s se pondrá suponer que en las celdas con $Q_1 < 0$ ya no hay partículas, por lo que mediante un factor K_1 se podrá satisfacer el principio de continuidad si se establece que $K_1 [(\sum Q_1) (\Delta s)^2] + \Delta V_s = V_D$. Resulta que

$$K_1 = \frac{[V_D - \Delta V_s]}{[(\sum Q_1) (\Delta s)^2]} \quad (3.12)$$

En esta forma podrá considerarse que una primera compensación requiere que las concentraciones "reales" estén dadas por

$$Q'_1 = 0 \quad \text{si} \quad Q_1 < 0 \quad (3.13)$$

$$Q'_1 = K_1 Q_1 \quad \text{si} \quad Q_1 > 0 \quad (3.14)$$

Puede resultar que algunos valores de Q'_1 fueran iguales o mayores que MC . Si la suma del número de celdas en donde ocurriera esto fuera igual a P , entonces $\sum Q'_1 (\Delta s)^2$ sería el volumen de partículas en donde $Q'_1 < MC$, de modo que podría considerarse un segundo factor correctivo K_2 con el cual nuevamente se cumpliera el principio de continuidad al establecer que $P(MC)(\Delta s)^2 + K_2 [(\sum Q'_1) (\Delta s)^2] + \Delta V_s = V_D$ así que ahora

$$K_2 = \frac{[\nabla_D - \Delta \nabla_s - P(MC) (\Delta s)^2]}{[(\Sigma Q'_i) (\Delta s)^2]} \quad (3.15)$$

Se establece que las concentraciones "reales" son:

$$Q''_1 = MC \quad \text{si} \quad Q'_1 > MC \quad (3.16)$$

$$Q''_1 = K_2 Q' \quad \text{si} \quad Q'_1 < MC \quad (3.17)$$

Entonces el volumen de partículas que habrá en el filtro en el instante $t_0 + \Delta t$ será:

$$\nabla'_D = \nabla_D - \Delta \nabla''_s \quad (3.18)$$

Para comprender de manera más objetiva la relación que existe entre estas ideas, se muestra el siguiente diagrama de flujo de la FIGURA 3.4, del cual parte la elaboración de un programa (ANEXO III) que permite conocer en cada instante la distribución de concentraciones y los volúmenes de partículas dentro del filtro, tanto para flóculos como para la arena.

Por otra parte, debe tenerse en cuenta que la ecuación de balance de la cantidad de partículas, que dio lugar a las ecuaciones 3.4 y 3.9 es un caso especial de la ecuación de difusión. Para que estas ecuaciones, que están en diferentes finitas, permitan encontrar resultados con una aproximación adecuada, el intervalo de tiempo debe ser pequeño. En la selección del tamaño de Δt es conveniente considerar que el máximo valor que puede tomar Δt es prácticamente igual al tiempo que tardan en viajar el promedio de partículas por una celda de altura Δs con una cierta velocidad.

En una primera instancia, el programa se corre dando las concentraciones originales de flóculos que existen en cada celda del filtro, y así obtener el número de etapas necesarias para conocer la remoción a la cual se quiere llegar. En seguida se dan las concentraciones de la arena en cada celda y con el mismo número de etapas que se estableció en la corrida anterior, se determina el volumen remanente, ∇_R , es decir si el volumen original de arena fuera ∇_T , la pérdida sería

$$S_A = \nabla_T - \nabla_R \quad (3.19)$$

DIAGRAMA DE FLUJO

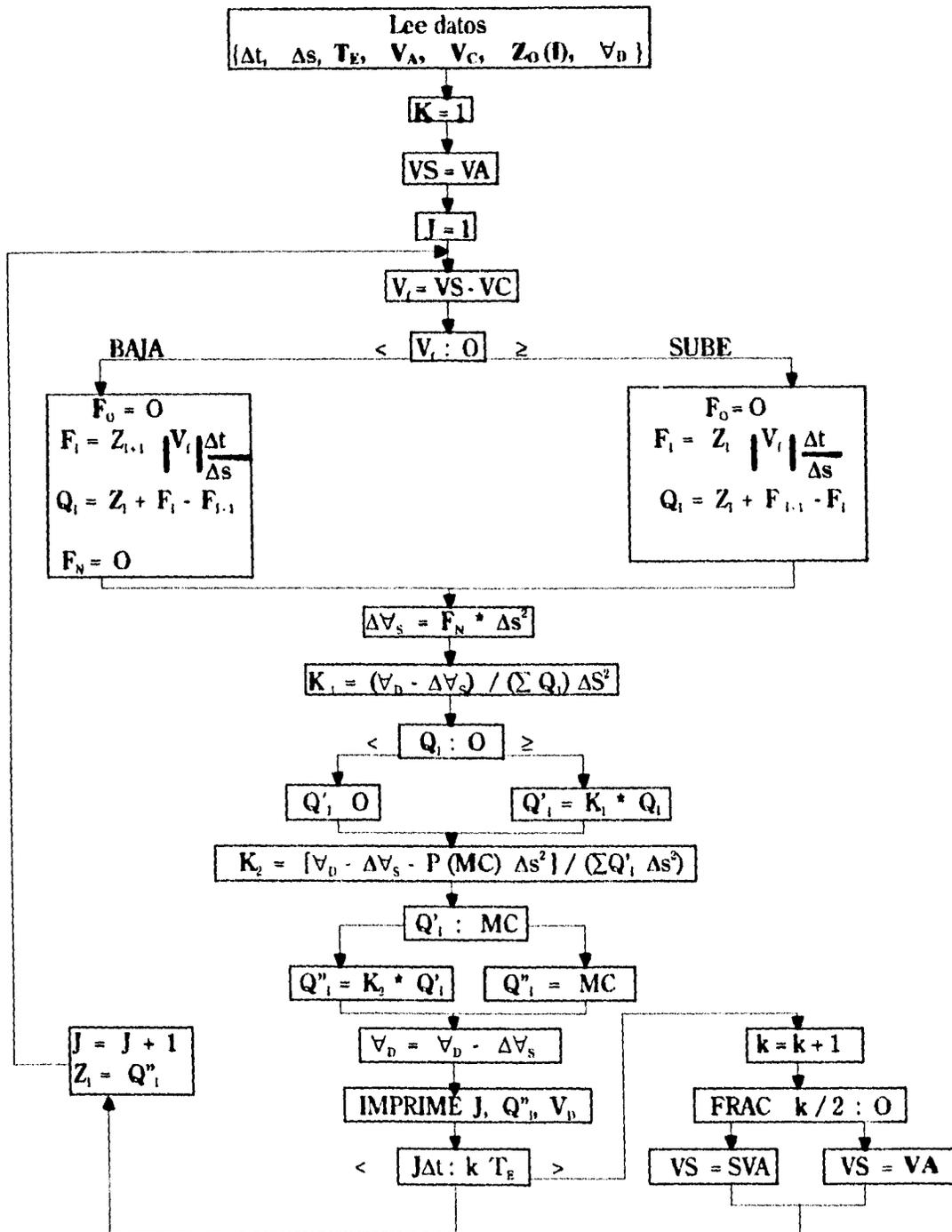


FIGURA 3.4 DIAGRAMA DE FLUJO, QUE ANTECEDE AL PROGRAMA QUE PERMITE CONOCER EN CADA INSTANTE LA DISTRIBUCIÓN DE CONCENTRACIONES Y VOLÚMENES DENTRO DEL FILTRO, TANTO PARA FLÓCULOS COMO PARA ARENA.

Así resulta que para un filtro de altura H , con un lecho filtrante de altura h , si se conocen las velocidades de caída de la arena y de los flóculos y sus máximas concentraciones, se puede elegir la mejor combinación de velocidades de ascenso V_A y de los tiempos de duración de etapa T_E que de una mayor limpieza a los filtros con menos pérdida de arena y de agua, este último volumen será $(V_A) (\Delta s) (T_E)$ ó $(V_A)(\Delta s)(T_E) / 2$, de suerte que conociendo el número de etapas necesario para obtener la reposición de flóculos especificada, y sumando estos valores se podrá conocer el volumen de agua empleada que sería $S_w = \Sigma V_w$.

Finalmente para hacer más explícito esta eficiencia, se determinarán los respectivos costos de lavado, conociendo el precio unitario de la arena, P_A y del agua P_w , de tal manera que el costo total será:

$$C_L = P_A S_A + P_w S_w \quad (3.20)$$

Capítulo 4

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Para poder calibrar el modelo matemático desarrollado para representar el método de lavado ya descrito, fue necesario el diseño y la construcción de 3 filtros profundos de arena, operados con sólo agua, realizándose las pruebas hidrostáticas necesarias antes de efectuar las pruebas experimentales. Esta metodología, que enseguida se describe, es seccionada para su mejor estudio en cinco sistemas que conforman el complejo de filtración mostrado en el diagrama de flujo de la FIGURA 4.1.

- a) Sistema de alimentación
- b) Sistema de distribución
- c) Sistema de filtración
- d) Sistema de lavado
- e) Sistema de medición

4.1 DISEÑO DE LOS FILTROS

Los filtros se diseñan tanto para efectuar una correcta eliminación de sólidos como para llevar a cabo el lavado del empaque. A continuación se describe el dimensionamiento de cada uno de los elementos que conforman el sistema de filtración.

4.1.1 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN

4.1.1.1 Solución empleada

La suspensión empleada es similar a la encontrada en las plantas potabilizadoras, según Espinal (1985), y que se prepara en 700 litros de la llave agitada con aire y con:

- | | |
|-----------|----------------------|
| a) 1383 g | Bentonita |
| b) 0552 g | Caolín |
| c) 0021 g | Sulfato de Aluminio |
| d) 0016 g | Ca (OH) ₂ |

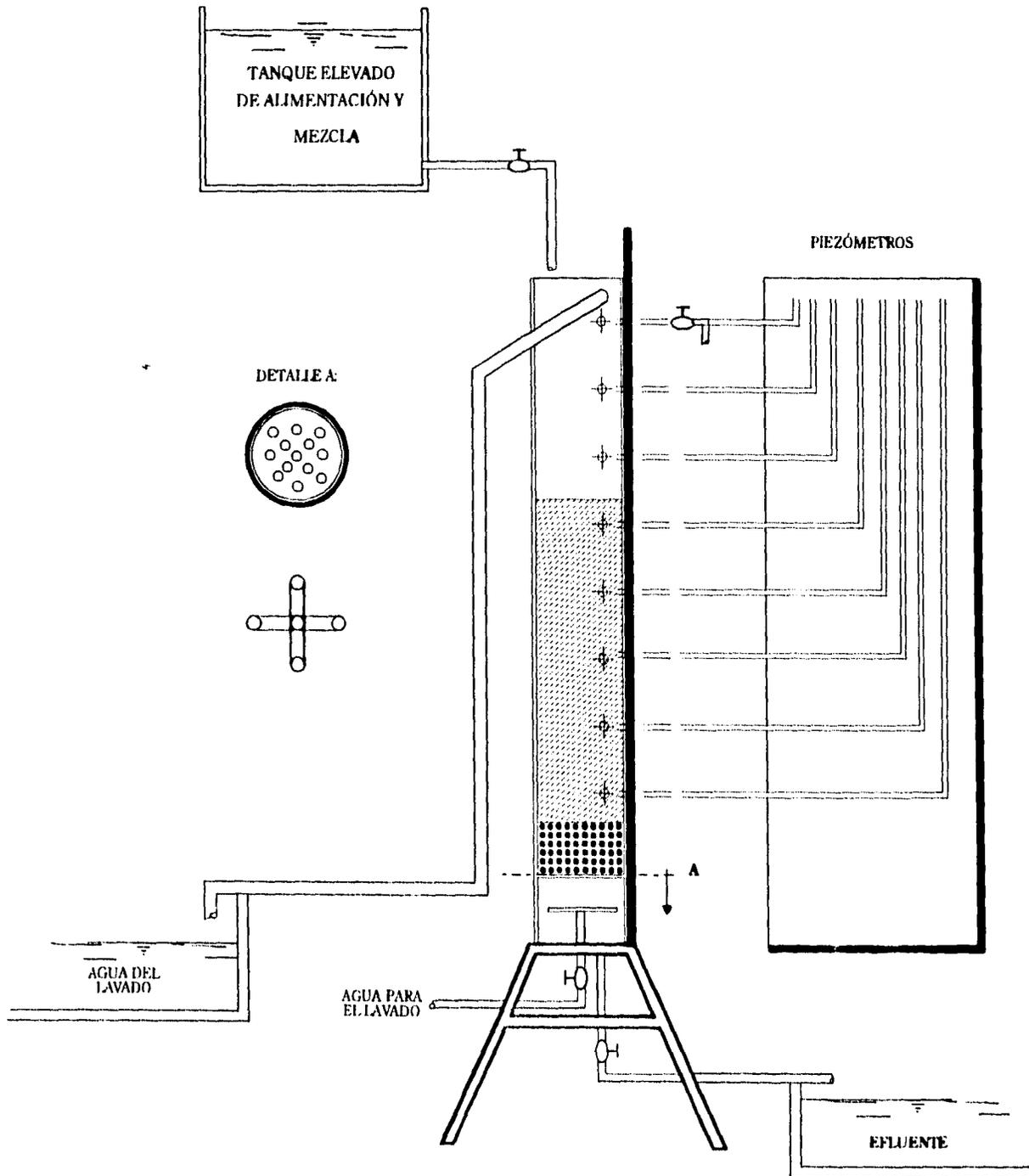


FIGURA 4.1 DIAGRAMA DE FLUJO DEL SISTEMA DE FILTRACIÓN

Para calcular la cantidad de arcilla necesaria para cada corrida, se tomó en cuenta el volumen y la porosidad del medio, así como un factor de ensuciamiento.

El Sulfato de Aluminio se agregó como coagulante a la suspensión de arcillas, con el objeto de formar flóculos de tamaño adecuado para ser retenidos en el filtro. El Ca(OH)_2 se agregó para controlar el pH a una dosis de 75 % de la del sulfato de aluminio.

La solución preparada se agregó al tanque mezclador, situado en la parte superior de las columnas, de éste mismo fueron alimentadas hasta obtener el ensuciamiento total del filtro.

4.1.1.2 Tanque mezclador

Para obtener las turbiedades deseadas fue necesario contar con un sistema para la preparación del influente. Básicamente, este es un tanque mezclador donde se hace llegar la suspensión con la turbiedad preparada.

Cálculo del volumen:	$V = Q t_r$
a) Número de unidades por alimentar:	3
b) Tasa de filtración:	5 m/h
c) Superficie total de filtración:	0.0942 m ²
d) Gasto total:	0.4712 m ³ /h
e) Tiempo de retención:	1 h
d) Volumen mínimo:	471.23 l
e) Factor de seguridad (para almacenamiento):	1.5
f) Volumen mínimo requerido	706.8 l

Tomando el valor mínimo y considerando la disponibilidad comercial de los tanques se optó por comprar un rotoplás de 1100 litros, para estar dentro del intervalo de los diferentes lavados a realizar. De esta forma el factor de seguridad (Fs) es la capacidad del tanque comercial entre volumen mínimo requerido igual a 2.334. La FIGURA 4.2 muestra la instalación de este sobre la estructura de soporte.

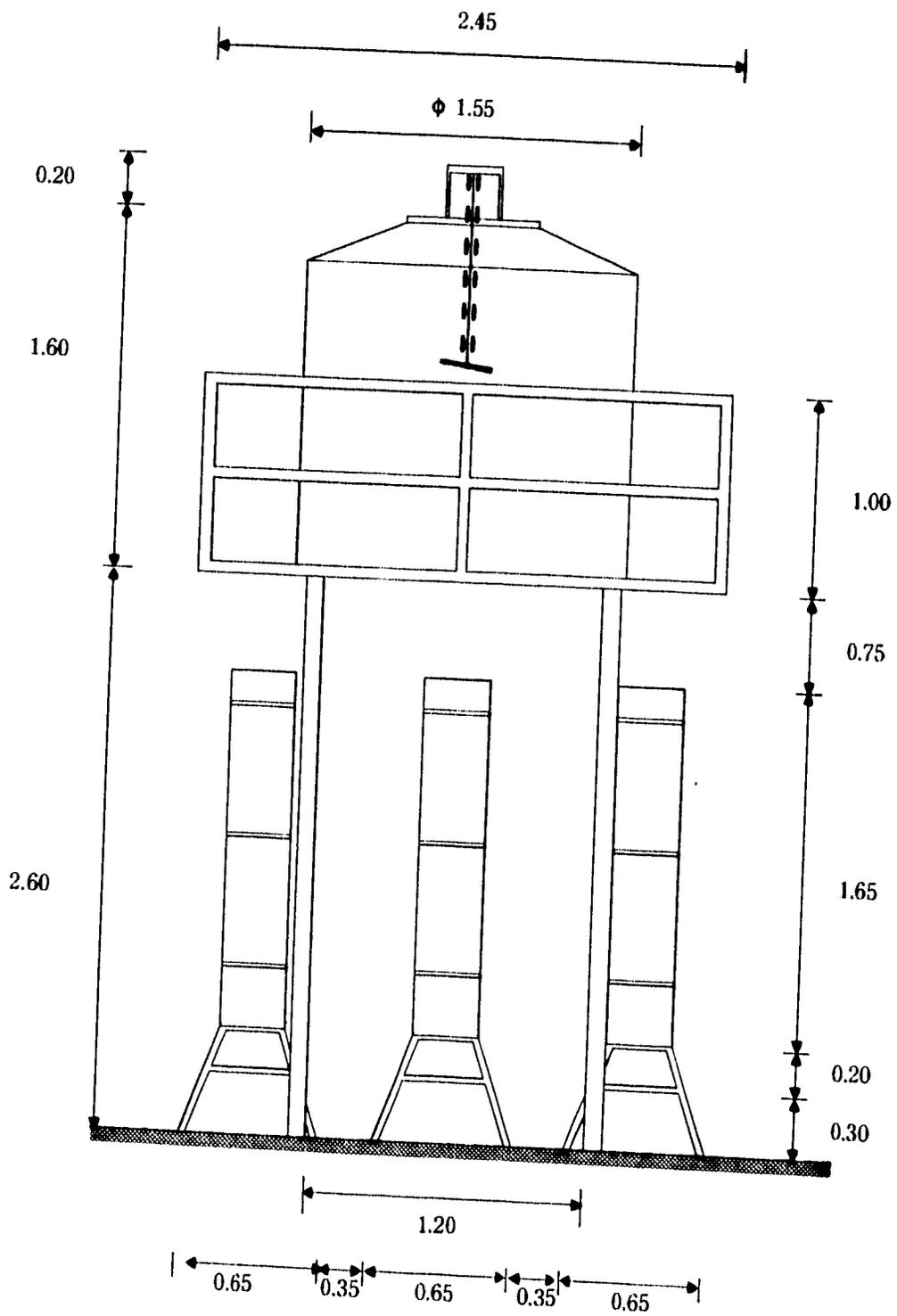


FIGURA 4.2 ESTRUCTURAS DE SOPORTE PARA LAS COLUMNAS DE FILTRACIÓN Y EL TANQUE MEZCLADOR.

4.1.2 SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN (ALIMENTACIÓN)

La distribución de la solución preparada y homogeneizada en el tanque mezclador a las columnas de filtración se llevó a cabo mediante tubos de PVC y manguera plástica de 2" de diámetro, logrando una alimentación uniforme con el uso de un difusor de 0.2 m de diámetro y controlada con la ayuda de válvulas de compuerta (FOTO 4.1 y 4.2).

4.1.3 SISTEMA DE FILTRACIÓN

4.1.3.1 Columnas de filtración

Se seleccionó un diámetro de 0.2 m de acuerdo con las recomendaciones de Adin *et al*, 1979 y de Metcalf & Eddy, 1977 para evitar el fenómeno de pared.

Para la altura se tomó en cuenta:

- El espesor de lecho, 0.7 m
- El espesor de la gravilla, 0.1 m
- El espesor del falso fondo, 0.15m
- La salida del efluente debe estar colocada al menos 0.30 m sobre el medio filtrante.

Por lo que la altura mínima requerida es de: $0.7 + 0.10 + 0.15 + 0.30 = 1.25$ m

De esta manera las columnas fueron construidas de 1.54 m de altura total, con el fin de permitir la expansión necesaria para lograr el adecuado lavado del medio, (FIGURA 4.3).

4.1.3.2 Materiales de empaque

4.1.3.2.1 Grava y arena

De la bibliografía se sabe que la práctica americana utiliza arena con coeficiente de uniformidad entre 1.5 y 1.7 y tamaño efectivo entre 0.4 y 0.7, con preferencia entre 0.45 y 0.55. No más del 1% debe ser mayor de 2 mm o menor de 0.3 mm.

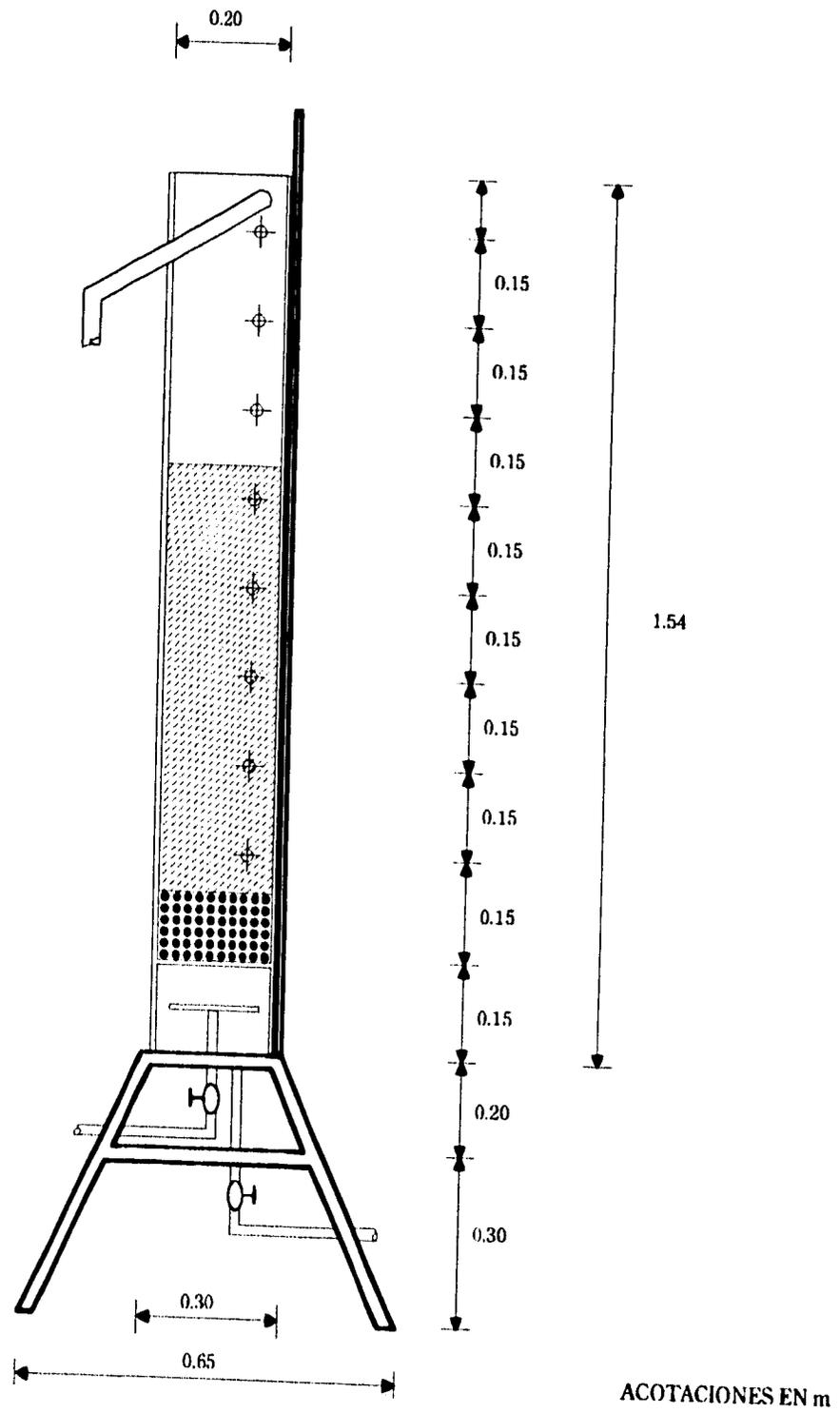


FIGURA 4.3 COLUMNA DE FILTRACIÓN

Por tal razón, para el diseño se utilizaron tres tamaños efectivos, un máximo, un mínimo y un medio, 0.8, 0.6 y 0.4, respectivamente (TABLA 4.1), los cuales permiten abordar un intervalo representativo de las diferentes condiciones en que se realizan los lavados. Estos tres tamaños de arena con características que no están disponibles comercialmente, se tuvieron que conformar en el laboratorio. El Banco de arena que proporcionó las características más cercanas al material de empaque deseado, fue el de Coatzacoalcos Veracruz, Rancho Alegre S.A. de C.V. Para estos fines se adquirió la siguiente arena:

1. Arena Sand Blast "A" malla 20-30
2. Arena Sand Blast "F" malla 30-40
3. Gravilla 1/4 + 1/8
4. Gravilla 1/2 + 1/4

El material requerido fue preparado en el laboratorio, mediante cribado y combinación de las fracciones obtenidas en diferentes proporciones para obtener el CU y TE dados. (TABLA 4.1).

TABLA 4.1 ARENA EMPLEADA EN CADA FILTRO

ARENA	TE	CU
1	0.40	1.6
2	0.60	1.6
3	0.80	1.6

En las FIGURAS 4.4, 4.5 y 4.6, se presentan las características de cada arena, así como su curva granulométrica obtenida.

Para cada filtro se prepararon 28 kg de arena para alcanzar una altura de lecho de 0.70 m, y contar con la cantidad necesaria para las pérdidas de arena que se pudieran presentar durante el lavado. La grava de 0.10 m de espesor se preparó con 2 kg de gravilla de 1/2 + 1/4 y 2.5 kg de gravilla 1/4 + 1/8.

A la arena propuesta, se le aplicaron las técnicas analíticas presentadas a continuación. Obteniendo los resultados de la TABLA 4.5.

- a) Solubilidad en HCl y NaOH
- b) Pérdida por ignición (%)
- c) Densidad real (g/ml)
- d) Densidad aparente (g/ml)
- e) Porosidad.

CARACTERIZACIÓN DE LA ARENA

TE : 0.8

CU : 1.6

D₆₀ : 1.28

D₁₀ : 0.80

CU : D₆₀/D₁₀

TABLA 4.2 CRIBADO DE LA ARENA TE 0.8

MALLA No.	Ø (mm)	(%)	(gr)
8	2.38	90	100
10	1.68	78	120
12	1.41	68	100
14	1.19	48	200
16	1.13	40	80
18	0.96	21	190
20	0.80	10	110
30	0.59	0	100

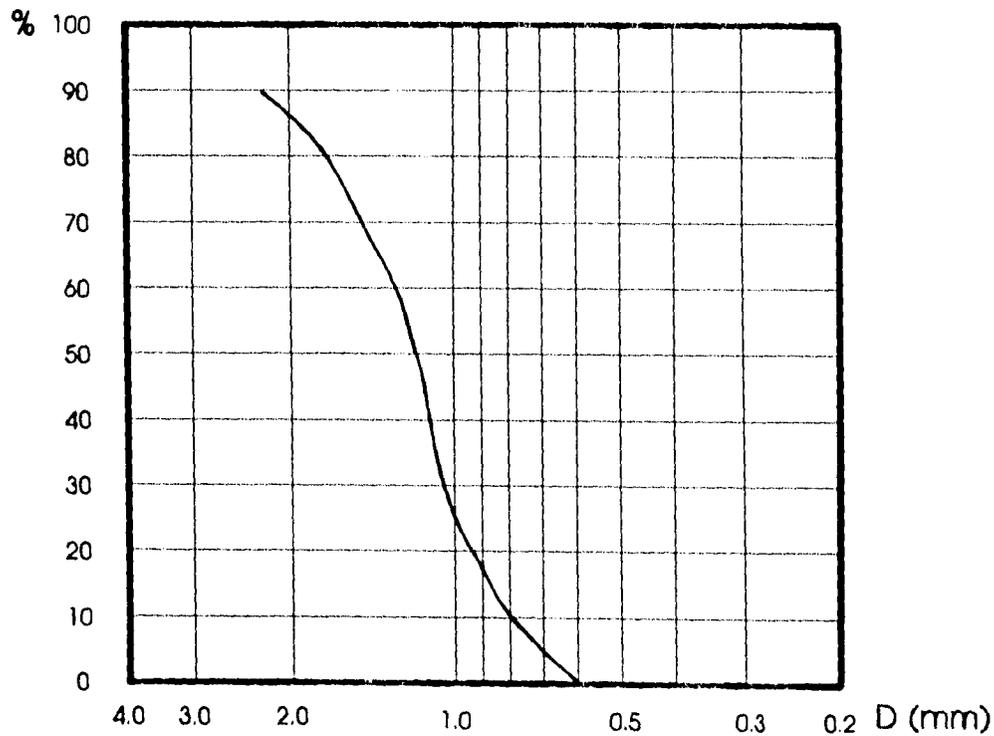


FIGURA 4.4 CURVA GRANULOMÉTRICA TE 0.8

CARACTERIZACIÓN DE LA ARENA

TE : 0.6 CU. : 1.6
 D₆₀ : 0.96 D₁₀ : 0.60

CU : D_{60} / D_{10}

TABLA 4.3 CRIBADO DE LA ARENA TE 0.6

MALLA No.	Ø (mm)	(%)	(gr)
12	1.41	86	140
14	1.19	78	80
16	1.13	75	30
18	0.96	60	150
20	0.80	36	240
30	0.59	9	270
35	0.50	2	70
40	0.42	0	20

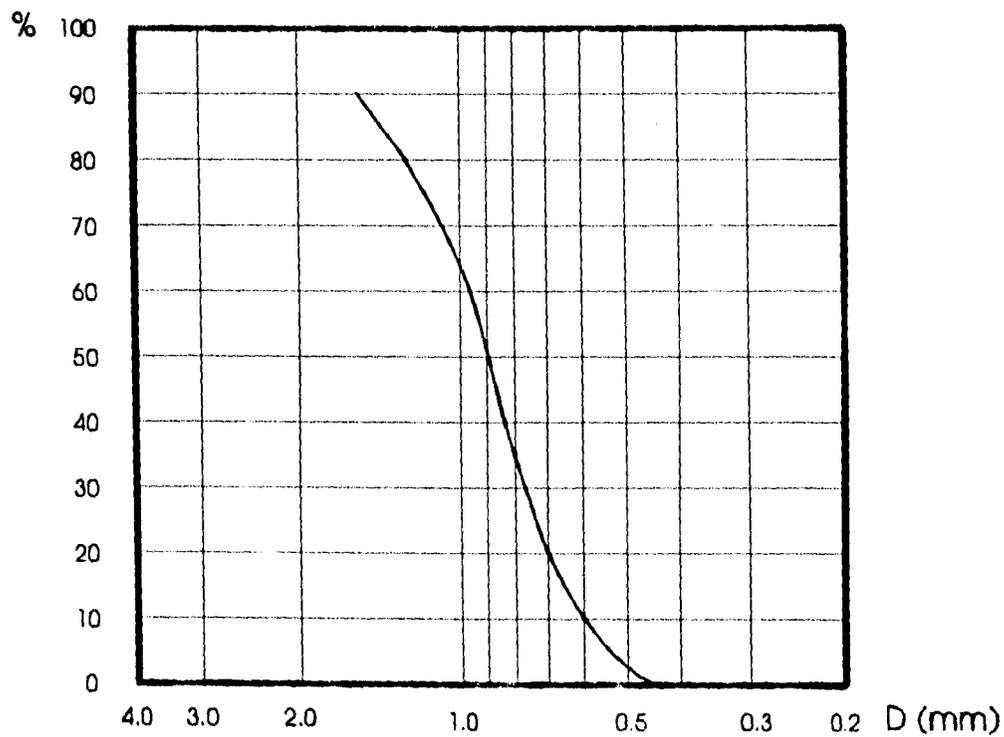


FIGURA 4.5 CURVA GRANULOMÉTRICA TE 0.6

CARACTERIZACIÓN DE LA ARENA

TE : 0.4 CU : 1.6
 D₆₀ : 0.64 D₁₀ : 0.40

CU : D_{60}/D_{10}

TABLA 4.4 CRIBADO DE LA ARENA TE 0.4

MALLA No.	Ø (mm)	(%)	(µ)
18	0.96	96	120
20	0.80	80	90
30	0.59	59	300
35	0.50	50	240
40	0.42	42	130
50	0.297	29	100
60	0.250	25	20

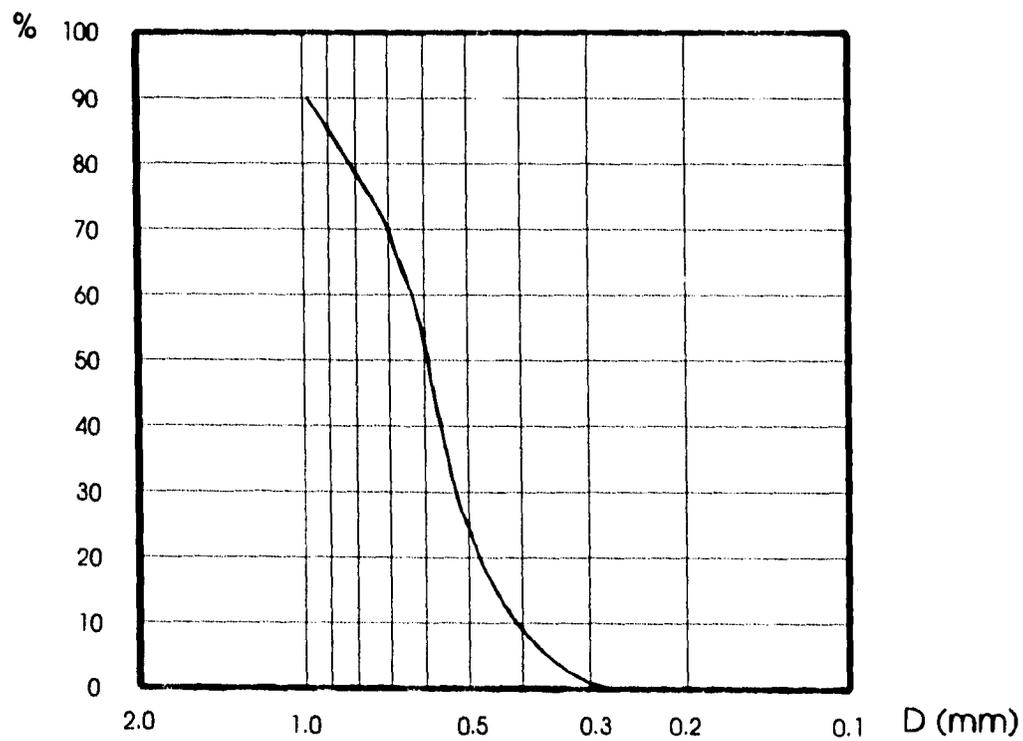


FIGURA 4.6 CURVA GRANULOMÉTRICA TE 0.4

TABLA 4.5 ANÁLISIS DE LA ARENA EMPLEADA

TAMAÑO EFECTIVO (mm)	CU	SOLUBILIDAD		PERDIDAS POR IGNICIÓN %	DENSIDAD REAL (g/ml)	DENSIDAD APARENTE (g/ml)	POROSIDAD
		HCL 10%	NaOH 10%				
0.4	1.6	0.6	0.9	0.3	2.572	1.65	0.36
0.6	1.6	0.5	0.8	0.2	2.573	1.63	0.37
0.8	1.6	0.5	0.7	0.3	2.579	1.66	0.36

De acuerdo con los resultados mostrados en la tabla se concluye que la arena del Banco Coatzacoalcos Veracruz, la cual es utilizada en varias plantas potabilizadoras, cumple con las especificaciones que propone el Cepis (1976), presenta pérdidas por ignición cercanas a 0.7 % que es la recomendada, y menores a 5 y 2% para la solubilidad de HCl y NaOH respectivamente, por tal motivo se decidió utilizarla para los filtros piloto. (ANEXO IV).

4.1.4 SISTEMA DE LAVADO

La parte inferior de cada columna (0.15m), sirve como falso fondo y a ella llegan las tuberías de diámetro 3/4" que alimentan el lavado, así como las tuberías que permiten el desalojo del agua filtrada (FIGURA 4.7). Fue conectado a la tubería de alimentación de lavado un distribuidor de fierro galvanizado de 1/2" de diámetro construido en forma de cruz, con 17 perforaciones de 1/8 " de diámetro. Para unificar esta llegada de flujo se colocó arriba de este distribuidor una placa de acrílico de 0.20 m de diámetro y grosor de 1/2" con 69 orificios, estos detalles se pueden observar en las FIGURAS 4.8 y 4.9. Para el control de las entradas y salidas de flujo se colocaron válvulas de compuerta abajo de este sistema.

4.1.5 SISTEMA DE MEDICIÓN

4.1.5.1 Rotámetro

De acuerdo a las velocidades de flujo utilizadas y recomendadas en el lavado para el diseño experimental (47, 32.5 y 18.0 m/h), se adquirió un rotámetro para agua potable con una capacidad de sensibilidad entre 0.1 y 2 litros por segundo, conectado enseguida de la toma domiciliaria, para registrar y controlar estos aforamientos.

4.1.5.2 Piezómetro y puertos de muestreo

Debido a que para el presente estudio se requirió conocer el comportamiento del filtro a diferentes profundidades del lecho, se realizaron a lo largo de las tres columnas 8 perforaciones de 0.01 m de diámetro, a cada 0.15 m a partir de la placa difusora, que permitieron medir la pérdida de carga a través del lecho. En la parte superior se colocó una perforación de 2" de diámetro la cual tenía como función principal la salida del influente. En el extremo inferior, en la base de la columna se realizó otra perforación de 1" utilizándose como otro puerto de muestreo.

4.1.5.3 Medición de turbiedad

La suspensión que se empleó como sustituto de las encontradas en las plantas potabilizadoras, así como el agua muestreada durante el lavado, estaban dentro del intervalo entre 1 y 200 UTN (unidades técnicas nefelométricas), para ello se adquirió un turbidímetro "Hach" con la suficientemente sensibilidad para registrar esta serie de turbiedades.

- | | | |
|--|-----------------------------------|--------------------------------|
| 1. ϕ Exterior del Tubo acrílico = 21 cm | 7. Sujetador inferior | 13. Cruz de 1/2" |
| 2. ϕ Exterior de la Brida = 29 cm | 8. Placa con orificios | 14. 4 Tubos de 1/2" por 7.5 cm |
| 3. Empaque | 9. Tornillos 1/2" | 15. 4 Tapones de 1/2" |
| 4. Brida inferior | 10. Sujetador superior | 16. Niple de 1" |
| 5. Tornillos 1/2" | 11. Reducción campana 3/4" a 1/2" | |
| 6. Niple 3/4" | 12. Tubo de 1/2" por 3 cm | |

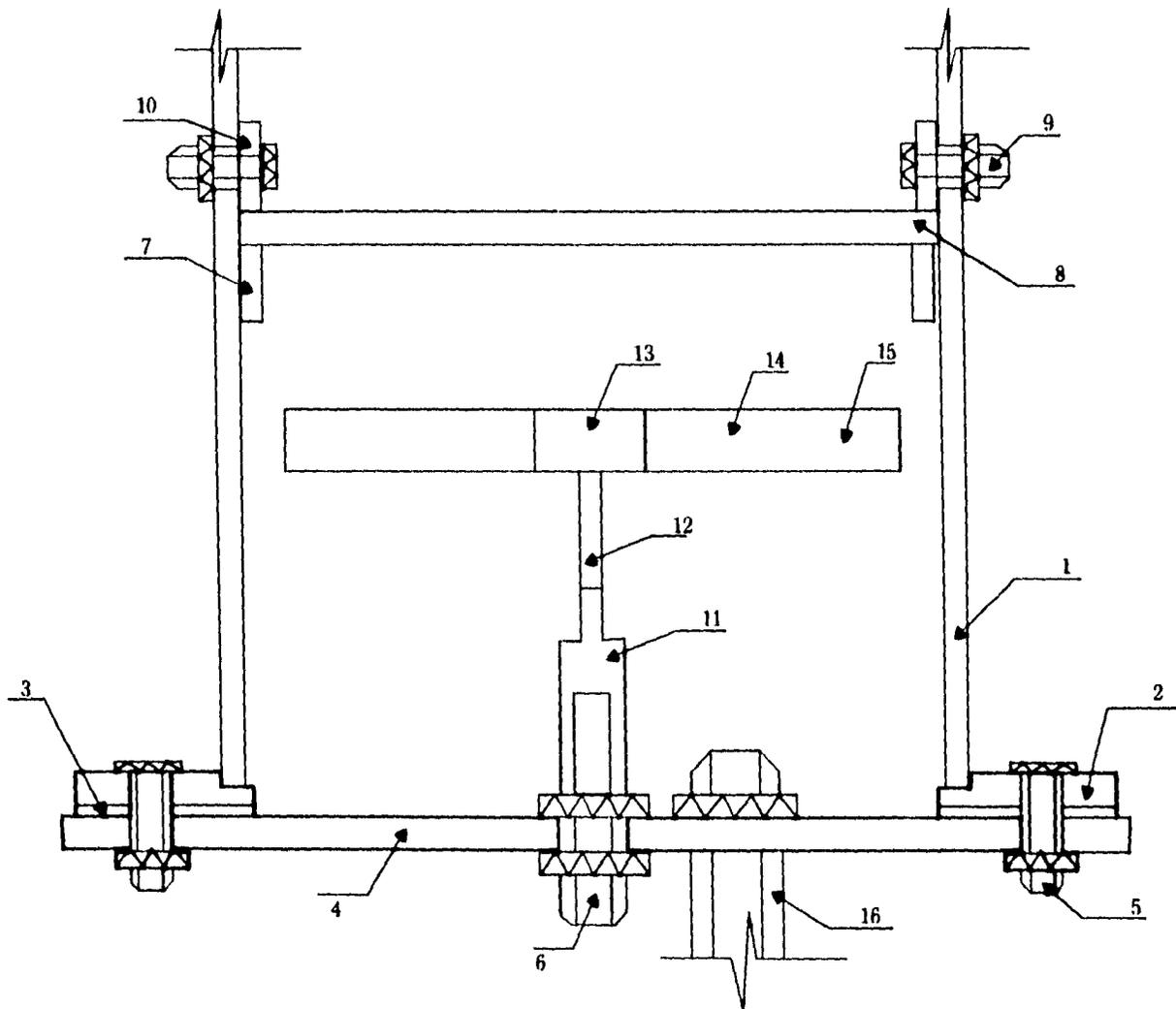


FIGURA 4.7 DETALLES DEL FALSO FONDO DE LA COLUMNA DE FILTRACIÓN

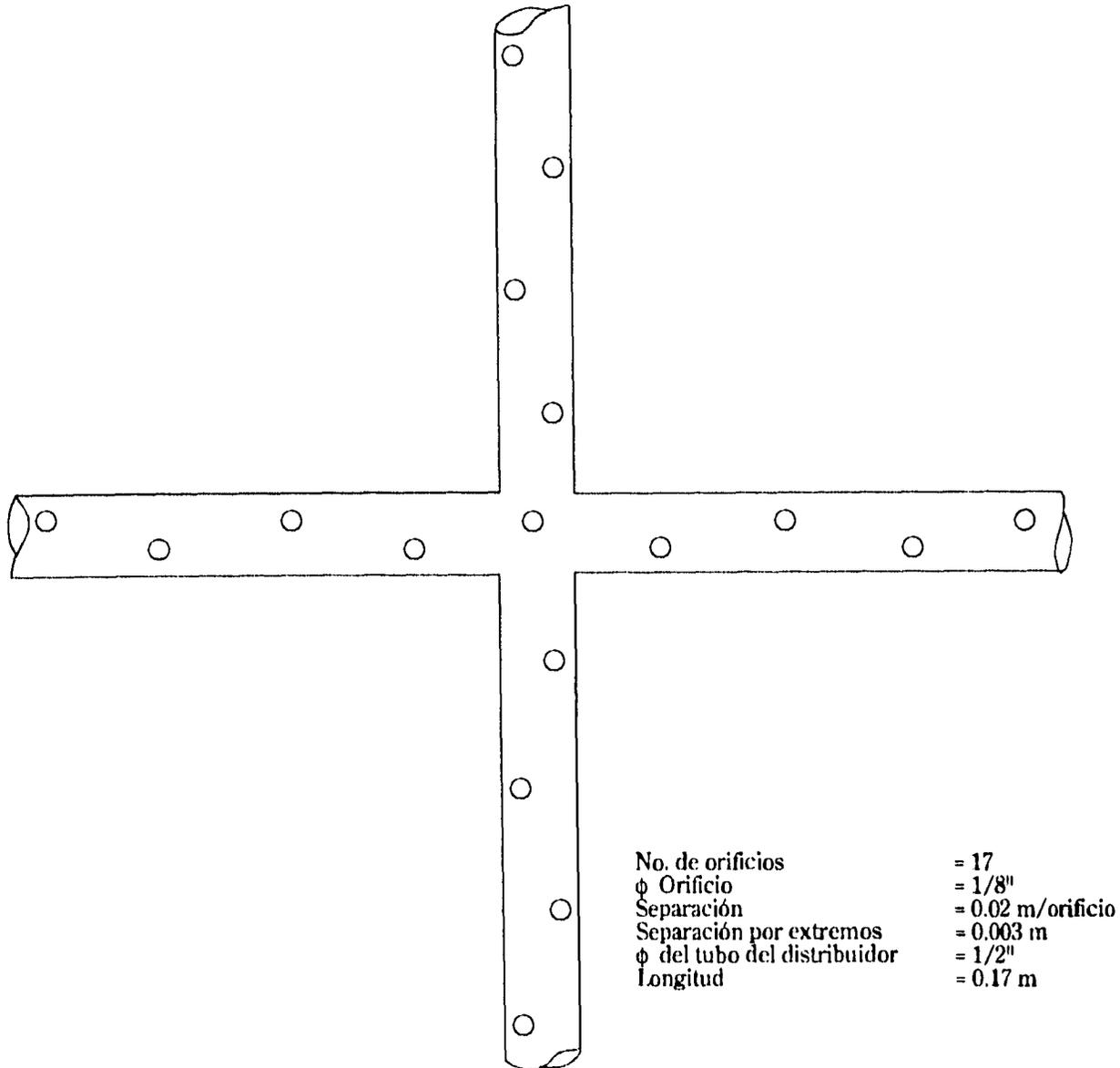
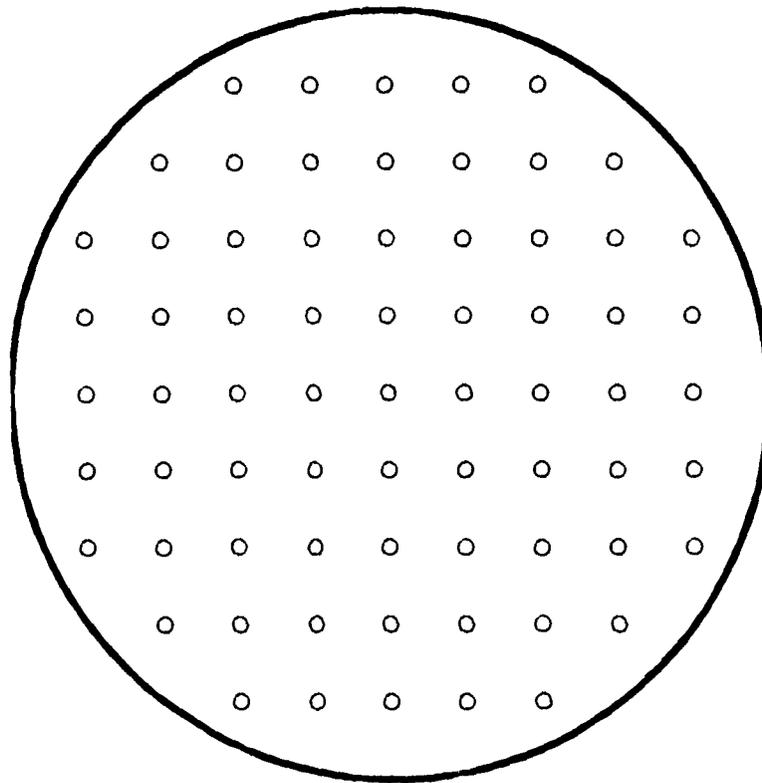


FIGURA 4.8 DISTRIBUIDOR DE LAVADO

**PLACA DE ACRÍLICO QUE SOPORTA
AL LECHO FILTRANTE**



φ Placa:	8" = 200 mm
φ Orificios:	1/8" = 3.1 mm
No. de orificios:	69
Espesor:	1/2" = 12.7 mm
Separación entre orificios:	20 mm

FIGURA 4.9 PLACA DIFUSORA

4.2 CONSTRUCCIÓN DE LOS FILTROS

4.2.1 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN

4.2.1.1 Tanque mezclador

Se utilizó un rotoplás de 1100 litros donde se realizaba la homogeneización de la solución preparada, esta mezcla fue hecha con Caolín, Bentonita, Sulfato de Aluminio, Ca(OH)_2 y agua, el agua era conducida a este tanque de la toma domiciliaria con un sifón hecho con manguera de 1.5" de diámetro y controlando con una válvula de compuerta y mediante un sistema de recirculación se logró la completa incorporación de cada uno de los componentes de la suspensión. El tanque fue colocado sobre una estructura de soporte de perfil tubular de 4 x 2", 1.5" y soleras de 2" a una altura de 2.60 m (FOTO 4.3).

4.2.2 SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

En la parte inferior del tanque mezclador donde se realizó la homogeneización de la solución se colocó un conducto de PVC de 0.2m de diámetro debidamente empacado para evitar fugas, éste se dividió en tres conductos más del mismo material hasta unirlos con manguera plástica la cual permitía la maniobrabilidad de la operación del difusor, en cada derivación se instaló una válvula de compuerta para el control del aforamiento de la mezcla hacia cada columna de filtración, el material utilizado para el sellado fue pegamento para PVC, cinta teflón y abrazaderas para unir la manguera y el tubo.

4.2.3 SISTEMA DE FILTRACIÓN

4.2.3.1 Columnas de filtración

Se construyeron 3 columnas de filtración para el TE requerido (0.8, 0.6 y 0.4 respectivamente), cada una con un tubo de acrílico de 1.54 m de altura, 0.20 m de diámetro interior y espesor de 0.005 m (FIGURA 4.3 y FOTO 4.1). Conectada por la parte inferior a la estructura de soporte por medio de bridas como se muestran en las FIGURAS 4.10 Y 4.11, donde nace el falso fondo de 0.15 m de altura que se ha mencionado en el sistema anterior.

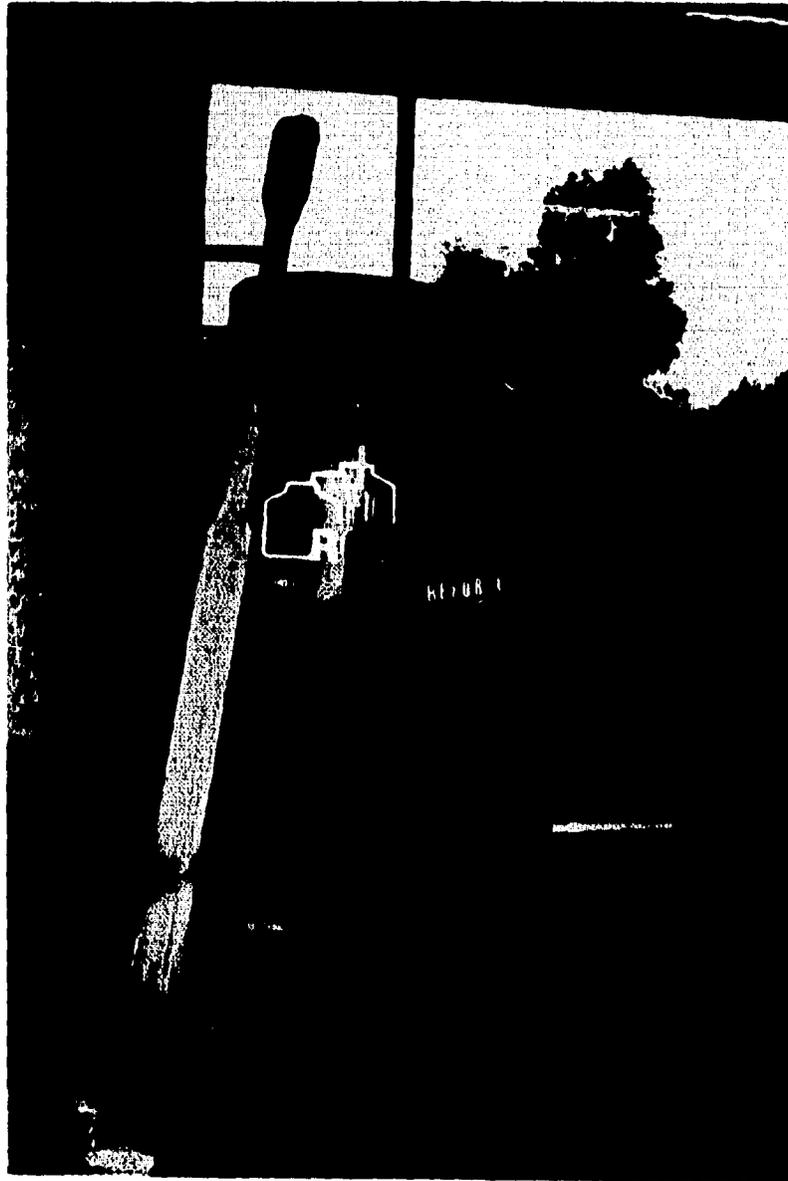
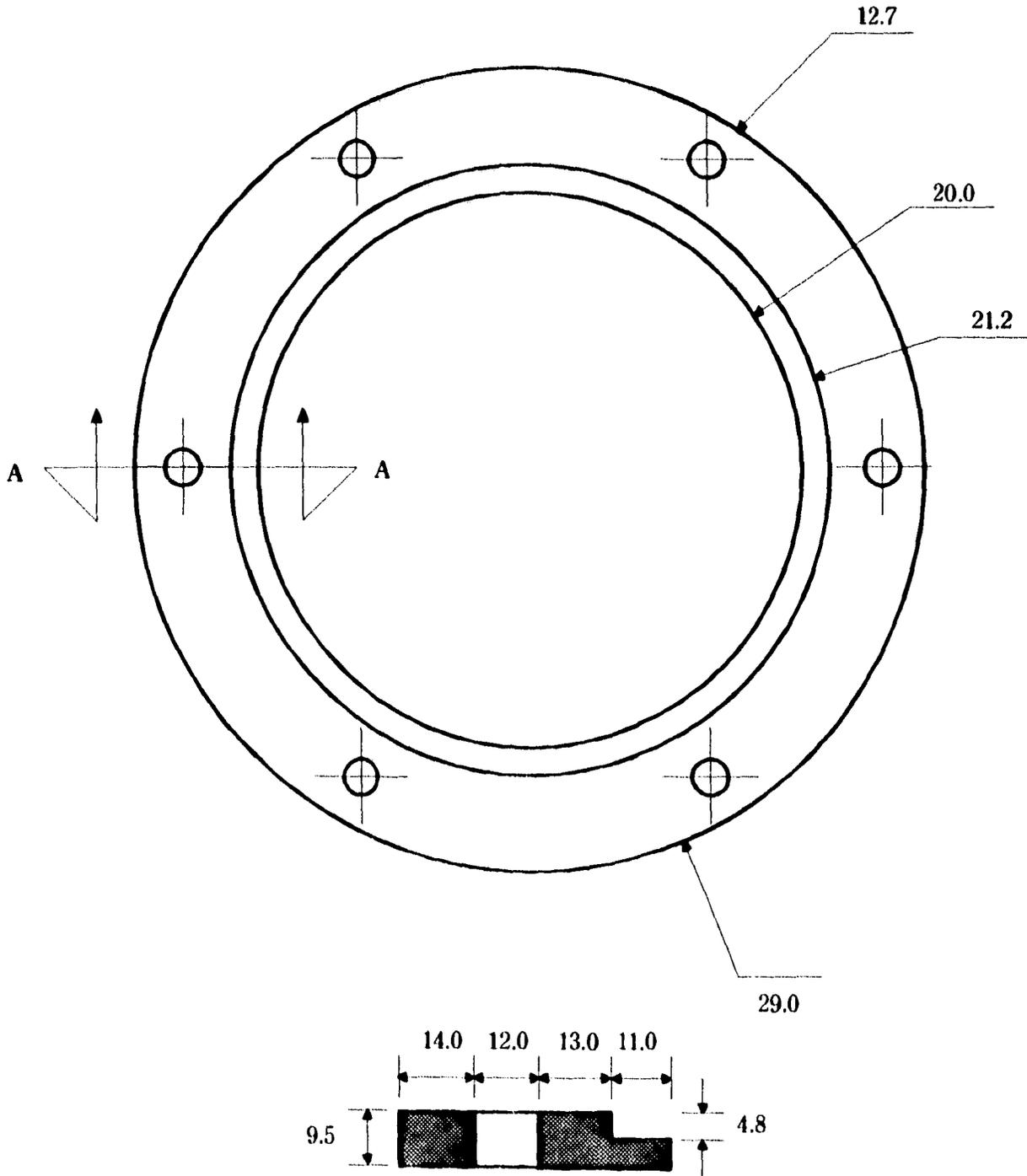


FOTO 4.3 TANQUE MEZCLADOR ROTOPLÁS DE 1100 LITROS.



ACOTACIONES EN mm

FIGURA 4.11 BRIDA SUPERIOR



FOTO 4.4 COLUMNA CON 8 PIEZÓMETROS QUE PERMITEN CONOCER LA PÉRDIDA DE CARGA A TRAVÉS DEL LECHO.

A lo largo de cada columna se realizaron 8 perforaciones de 0.01 m de diámetro donde fueron conectados puertos de muestreo y piezómetros.

En la parte superior, a 0.06 m abajo de este extremo, se colocó un tubo de acrílico de 2" de diámetro para dar paso a la salida del agua de retrolavado conectada a la vez a una manguera del mismo diámetro, para hacerlo llegar a un tubo de PVC donde se realizó la descarga (FIGURA 4.12).

Para conformar el lecho filtrante se colocó primero la cantidad preparada de gravilla para alcanzar una altura de 0.010 m sobre la placa difusora, con el fin de homogeneizar la entrada del flujo de lavado e impedir el escape de la arena de menor diámetro. Sobre esta capa de gravilla se agregó la arena con la granulometría dispuesta para cada columna, dando como resultado una cama de 0.70 m de altura.

4.2.3.2 Estructuras de soporte

Las columnas descansan sobre una estructura de acero construidas con ángulo de fierro de 1.5" y solera de 1/2", abrazadas con una solera de 1" en la parte media de cada una de ellas (FIGURA 4.13) que permiten además sostener una placa de madera de 0.4 x 2.40 m donde se encuentran instalados los piezómetros (FOTO 4.4).

4.2.4 SISTEMA DE LAVADO

La FOTO 4.5 muestra la construcción del falso fondo donde llegan las tuberías que alimentan el lavado, así como las tuberías que permiten el desalojo del agua filtrada, todas ellas de fierro galvanizado debidamente selladas con empaques plásticos y cinta teflón. La placa de acrílico que sirve para unificar la llegada de flujo así como el distribuidor de este mismo material se construyó en el taller de tornos con las especificaciones dadas en el diseño, conectándolo a la tubería de alimentación de lavado, así como la placa de acrílico que sirve para unificar la llegada del flujo; las válvulas de compuerta que sirven para el control de las entradas y salidas de flujo se instalaron abajo de este sistema, extendiendo esta conducción hasta la toma domiciliaria por medio de manguera, unidas de un material a otro con abrazaderas del mismo diámetro.

PERFIL DE LA PARTE SUPERIOR DE LA COLUMNA DE FILTRACION

1. "T"
2. Malla de cobre
3. Válvula

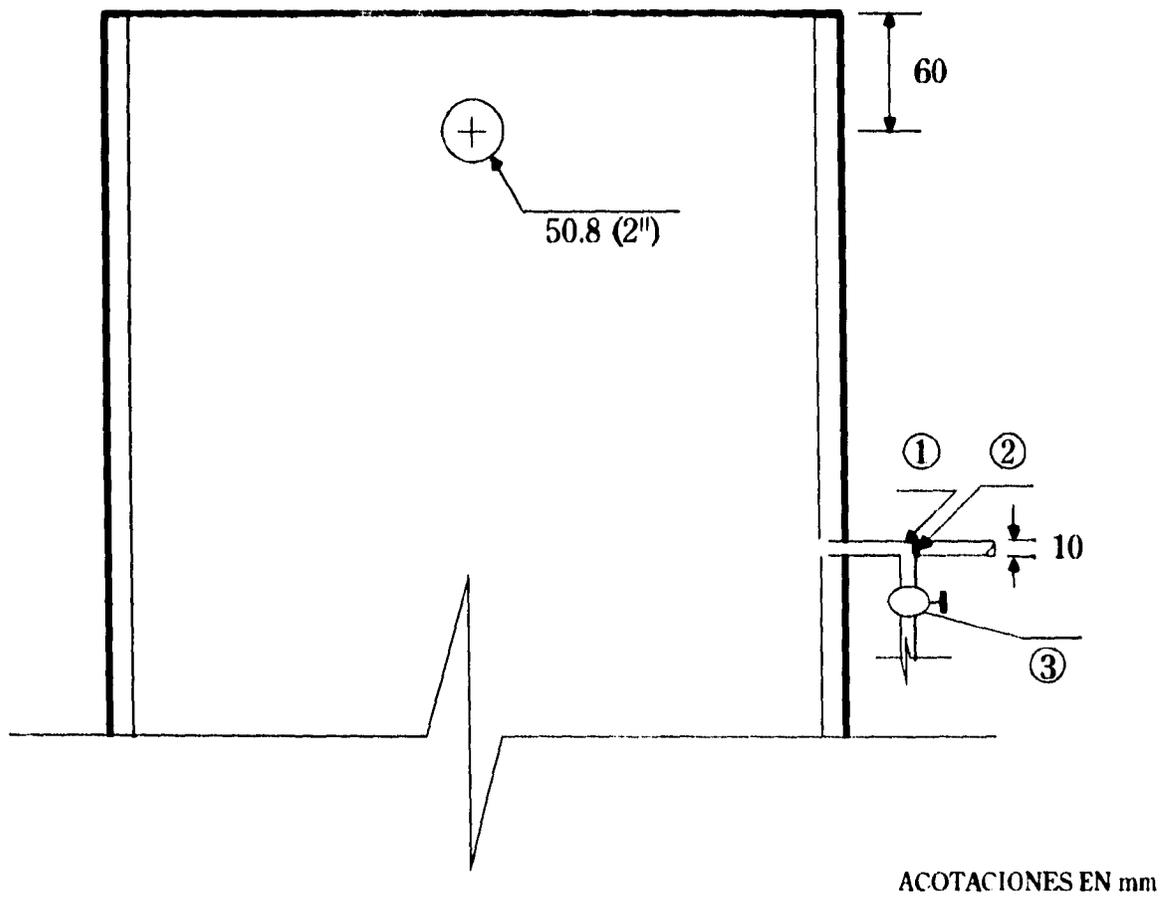
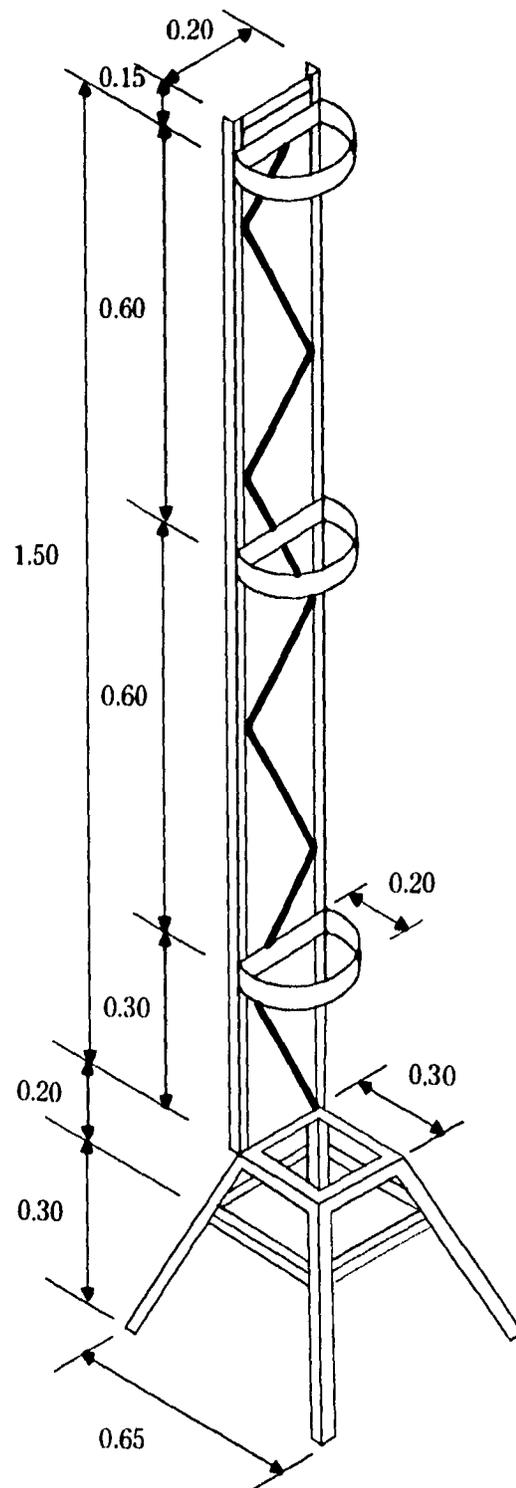


FIGURA 4.12 CONEXIÓN DE MANÓMETROS Y ACCESO DEL EFLUENTE.



ACOTACIONES EN m

FIGURA 4.13 ESTRUCTURA DE SOPORTE PARA LAS COLUMNAS DE FILTRACIÓN.



FOTO 4.5 EXTREMO INFERIOR DE LA COLUMNA DE FILTRACIÓN QUE ACTÚA COMO FALSO FONDO DONDE SE CONCENTRAN LAS TUBERÍAS DE SALIDA, DISTRIBUCIÓN Y MUESTREO.

4.2.5 SISTEMA DE MEDICIÓN

4.2.5.1 Rotámetro

El sistema de lavado consta de tres válvulas de compuerta las cuales permiten el paso del flujo dirigidas hacia un rotámetro por medio de mangueras de 3/4" de diámetro, este rotámetro permite unificar el flujo a una velocidad constante hacia cada columna, su capacidad es de 0.1 a 2.0 l/s.

4.2.5.2 Piezómetros y puertos de muestreo

Las 8 perforaciones efectuadas a lo largo de las columnas a cada 0.15 m se realizaron con una broca de 1/8" de diámetro, en ellas se pegaron tubitos de acrílico del mismo diámetro para ser conectadas a llaves de tres pasos que permiten la recolección de muestras y determinar las caídas de presión, además se colocó una placa de malla fina de bronce antes de estas derivaciones para evitar la pérdida y el taponamiento de arena. El cuerpo principal del piezómetro está hecho de manguera plástica transparente de 0.01 m de diámetro. Todos estos piezómetros descansan sobre un tablero de triplay de 0.40 x 2.40 m forrada de papel milimétrico (melamine) con el fin de realizar fácilmente las lecturas (FIGURA 4.1, Y FOTO 4.4).

4.3 PRUEBAS HIDROSTÁTICAS

Terminada la instalación de los filtros se procedió a verificar la no existencia de fugas. Esto se realizó llenando los filtros tanto con la operación del sistema de alimentación como con la del lavado. Se identificaron y marcaron aquellos puntos por donde salía agua, o donde, el empaque no funcionaba correctamente. Se vació el sistema y esperando el secado se procedió a sellar perfectamente, en algunos casos se requirió desmontar y cambiar las piezas seleccionadas. Este proceso se repitió las veces necesarias para constatar que no quedara ninguna fuga (FOTO 4.6).

ESTO TIENE QUE SER
SALIR DE LA PANTALLA

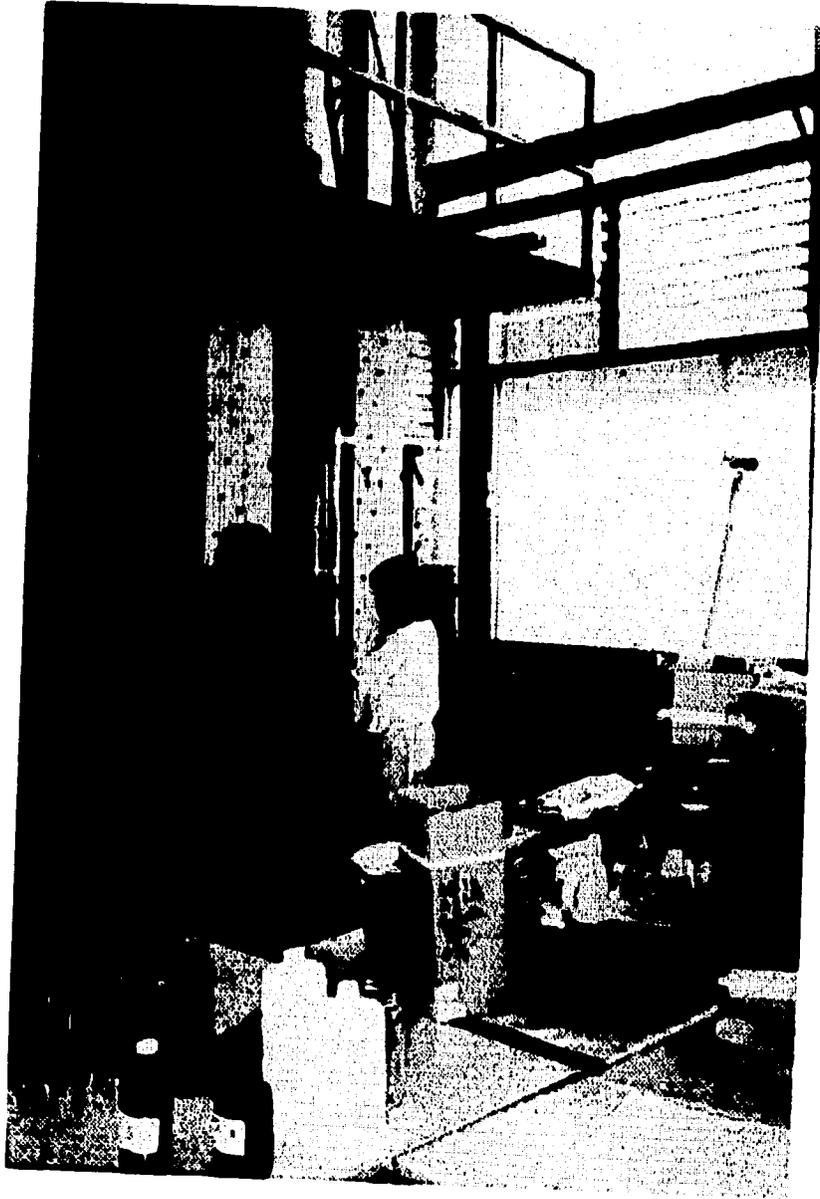


FOTO 4.6 REALIZACIÓN DE PRUEBAS HIDROSTÁTICAS A LAS COLUMNAS DE FILTRACIÓN.

4.4 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

4.4.1 VARIABLES EXPERIMENTALES

Al realizar un experimento, cuyo fin último sea el poder predecir un resultado a partir de datos conocidos, se suele estar interesado en tres aspectos:

- Cuáles son los datos necesarios, es decir, qué factores determinan el resultado.
- Qué número de ensayos es el mínimo por realizar.
- Qué tan posible es encontrar un fórmula que prediga el resultado a partir de los datos.

En muchos diseños de experimentos se atiende solamente a los dos primeros aspectos; sin embargo, en ocasiones el tercero es de gran interés.

Se debe observar que una cosa es determinar cuáles son los factores que determinan a "y", y otra muy distinta, es saber si varía linealmente con ellos. Sin embargo, suponiendo que la variación fuera lineal podría pensarse, como primer paso para la experimentación, en contrastar los valores de X_1 y X_2 en cada uno de los ensayos que se hiciera. Para ello, se escogen alternativamente los valores máximos y mínimos que pudieran tomar. Los cuatro primeros renglones de la TABLA 4.6 muestran los valores de y_i que se encontrarían de acuerdo con este criterio y que se representan con +1 los valores máximos y con -1 los mínimos.

Además, con el fin de ver en qué medida se cometería un error al obtener el resultado, es conveniente hacer un cierto número w de ensayos complementarios con el valor medio que sería el promedio de los valores máximos y mínimos que X_1 y X_2 pudieran tomar (valores centrales ó 0). Los tres últimos renglones de la TABLA 4.6 muestran los valores que y_i tomaría en ese caso.

TABLA 4.6 DISEÑO DE EXPERIMENTOS LINEAL PARA DOS FACTORES

ENSAYO	X_1	X_2	y		
1	+1	+1	y_1	n	
2	-1	+1	y_2	n	
3	+1	-1	y_3	n	
4	-1	-1	y_4	n	
5	0	0	y_5	n	w
6	0	0	y_6	n	w
7	0	0	y_7	n	w

Se desea obtener la eficiencia del lavado de los filtros, para determinar este parámetro se manejarán las siguientes variables experimentales:

- a) Lecho filtrante: H
 0.7 m

- b) Tamaño efectivo: TE
 0.4 mín
 0.8 máx
 0.6 central

- c) Velocidad del agua: (m/h)
 18 mín
 32.5 central
 47 máx

Con ayuda de la TABLA 4.7 y las variables experimentales mencionadas, se puede conocer el número mínimo de ensayos por realizar.

TABLA 4.7 DISEÑO DE EXPERIMENTOS LINEAL PARA DOS FACTORES

ENSAYO	H	X ₁	X ₂	y		
1	0.7	0.8	47	y ₁	n	
2	0.7	0.4	47	y ₂	n	
3	0.7	0.8	18	y ₃	n	
4	0.7	0.4	18	y ₄	n	
5	0.7	0.6	32.5	y ₅	n	w
6	0.7	0.6	32.5	y ₆	n	w
7	0.7	0.6	32.5	y ₇	n	w

En todos estos ensayos X_1 corresponde a los diferentes tamaños efectivos de arena y X_2 a las velocidades del flujo (V_s) a que es sometido el lavado, en la primera etapa y $V_s/2$ en la segunda de cada ciclo.

4.4.2 CORRIDA DE FILTRACIÓN

Una vez realizadas las pruebas preliminares para verificar que no existieran fugas dentro de todo el modelo físico y preparado el medio con los análisis correspondientes, para colocar la arena en cada filtro hasta una altura de 0.7 m lavándola previamente con objeto de eliminar partículas de densidad menor (basura, hojarasca, etc.), se inició la alimentación del influente al filtro a razón de 5 m/h durante 3 horas (Metcalf & Eddy, 1979), hasta que el medio se encontrara completamente obstruido o hasta tener una pérdida de carga de 0.85 m.

Ensuciado el medio se tomaron muestras de arena a cada 0.14 m, para obtener la concentración de flocos y arena en cada celda, (ANEXO V), estas muestras se tomaron con el muestreador como lo indica la FIGURA 4.14 y FOTO 7. Posteriormente se procedió a aplicar el método de lavado por criba hidráulica.

4.4.3 LAVADO

El lavado se inició cada vez que las columnas se encontraban totalmente obstruidas por la suspensión empleada, esto se apreciaba cuando la columna de agua que representa la pérdidas de presión era igual a la distancia que existía entre la superficie del agua dentro del filtro y el fondo de la capa de arena (0.85 m).

Cada filtro se lavó cerrando primero la línea del influente, abriendo la válvula de descarga al drenaje y estableciendo la alimentación de lavado a la velocidad de experimentación, considerando la velocidad de caída de las partículas (FOTO 4.8). Se estableció para ello ciclos con 2 etapas cada uno, la velocidad del flujo (V_s) de la primera etapa fue mayor que la velocidad de caída de las partículas (V_c) y en la segunda la velocidad del flujo ($V_s / 2$) fue menor que la velocidad de caída de las partículas, estas etapas operaron con tiempos de 24, 48 y 72 s para cada velocidad propuesta y para cada tipo de arena empleada (TABLA 5.1).

CICLO:	1ª Etapa	$V_s > V_c$
	2ª Etapa	$V_s < V_c$

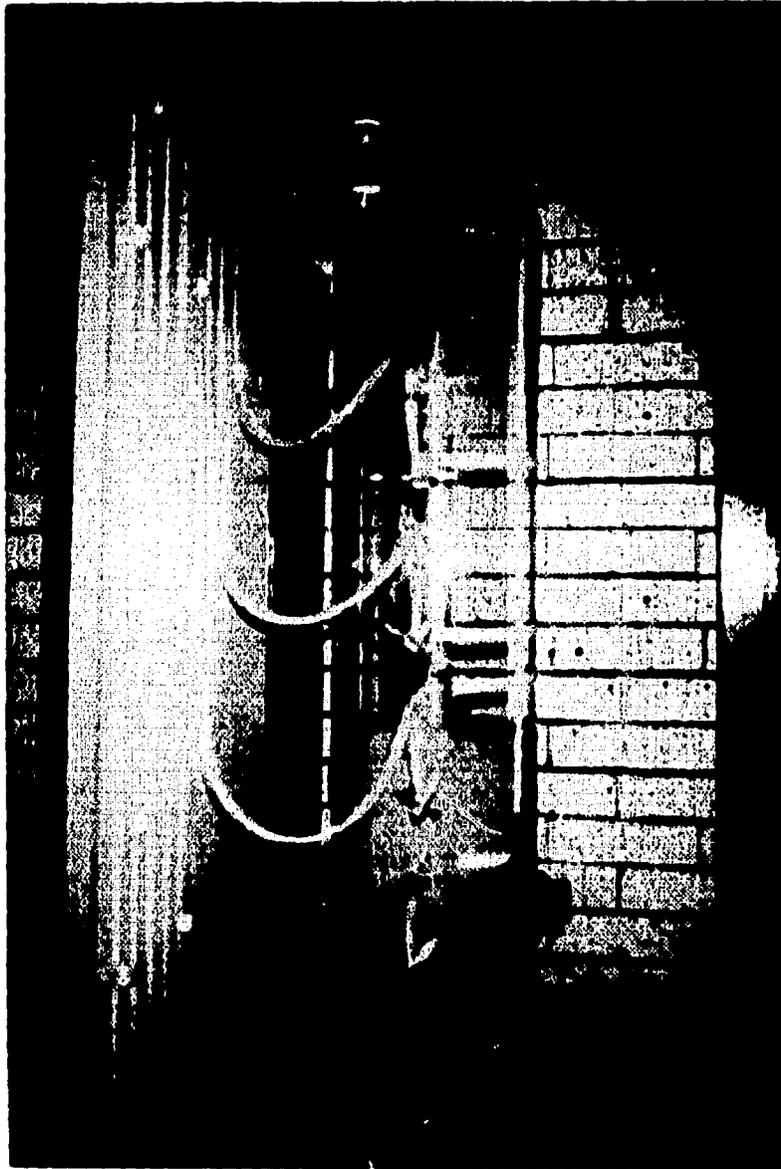


FOTO 4.7 TOMA DE MUESTRAS DE ARENA A DIFERENTES NIVELES DEL LECHO FILTRANTE.

Las velocidades fueron graduándose con ayuda del rotámetro, establecido entre la toma domiciliaria y las válvulas de control del falso fondo, se tomó con mucho cuidado el intervalo de tiempo de cada etapa, en la primera los granos de arena adquirían una velocidad de ascenso, dependiendo de su tamaño y su densidad, hasta llegar a la parte superior y en algunos casos comenzaba a salirse, con el siguiente intervalo de tiempo se inició la segunda etapa con un medio de velocidad de la primera, con lo cual se propiciaba el retorno de la arena hacia el fondo y la de algunos flóculos pero más lentamente. Así cuando se iniciaba un nuevo ciclo con los intervalos de tiempo establecidos, la arena tenía que ascender una altura mayor en el mismo intervalo de tiempo en que los flóculos viajaban una distancia menor y más rápidamente. De esta manera al cabo de varios ciclos sucesivos se lograba la separación de la arena y de la suspensión en el filtro.

En cada intervalo de tiempo de cada etapa de lavado, se tomaban muestras por la parte superior de la columna par obtener el grado de limpieza en cada proceso y saber si se había conseguido la remoción de los flóculos de obstrucción, este grado de limpieza correspondía a 5 UTN en el efluente.

En gabinete se calculó con el número de etapas y los datos geométricos, la cantidad de agua requerida para efectuar cada lavado. Se registró también el volumen de arena que salía del filtro en cada proceso de limpieza, el cual era depositado en un sedimentador (malla fina de cobre), lavándose y secándose antes de obtener su volumen, cuando la muestra era suficiente para llevar a cabo análisis granulométricos, se efectuaban, en el caso contrario, únicamente se clasificaba por medio de dos mallas.

Antes de un nuevo ensayo se verificó que la altura del lecho no hubiera disminuido, en caso afirmativo, se realizaba la reposición del filtro a 0.70 m, y nuevamente se procedía a ensuciarlo, registrando la pérdida de carga arrojada.



FOTO 4.8 LAVADO DE TRES LECHOS FILTRANTES CON TAMAÑO EFECTIVO DE 0.8, 0.6 Y 0.4 RESPECTIVAMENTE.

Capítulo 5

ANÁLISIS Y RESULTADOS

5. ANÁLISIS Y RESULTADOS

5.1 VALORACIÓN DEL MÉTODO CALIBRADO

El diseño de experimentos seleccionado implica realizar siete ensayos, cada uno con tres tiempos diferentes, lo que da un total de 21 experimentos. Pero como el considerar todas las variables experimentales implicaba 27 combinaciones que no eran tan lejanas a las 21, se procedió a trabajar en el laboratorio con todos estos ensayos, permitiendo observar qué sucedía si sólo se trabajara con los del diseño propuesto.

Así, en el laboratorio se contó con 3 lechos filtrantes de 0.70 m de altura, con un empaque de coeficiente de uniformidad de 1.6 y tamaños efectivos diferentes (0.8, 0.6 y 0.4, respectivamente). A cada columna se le aplicó una velocidad de flujo máxima (47.0 m/h) y una mínima (18 m/h) de acuerdo con las recomendaciones de la literatura. Con el fin de ver en qué medida se cometería un error al obtener el resultado, se efectuó otra velocidad complementaria, la cual es el valor promedio de los valores máximos y mínimos (32.5 m/h), cada valor representa la velocidad de flujo (V_s) en la primera etapa, siendo mayor que la velocidad de caída de las partículas y en la segunda etapa cada velocidad es considerada un medio de la velocidad inicial ($V_s/2$), siendo esta última menor que la velocidad de caída de las partículas. Cada ensayo se trabajó con 3 diferentes tiempos de lavado para cada ciclo, uno máximo (72 s), uno mínimo (24 s) y el promedio de ellos dos (48 s). (Ver columnas 1-6 de la TABLA 5.1). La velocidad de caída de la arena para TE 0.8, 0.6 y 0.4 fue 25.2, 19.8 y 14.4 m/h respectivamente.

Uno de los criterios para la limpieza de estos filtros, es parar el proceso cuando el porcentaje de flocúlos sea de 0.05, sin embargo se considera que desde el punto de vista económico, una turbiedad de salida de 75 UTN es conveniente (Beaudry, 1984). Sin embargo en cada ensayo se realizó el número necesario de etapas hasta alcanzar una turbiedad de 5 UTN, (Columna 7 de la TABLA 5.1), ya que alcanzar una agua perfectamente limpia no es de interés, pues la turbiedad con el paso de tiempo disminuye hasta obtener un valor que tiende a ser constante, es decir toma la forma de una exponencial negativa, lo que originaría mayor cantidad de agua y tal vez más pérdida de arena, (FIGURA 5.1). El agua utilizada para este lavado fue tomada de la llave y realizándole mediciones de turbiedad durante varios días a diferentes horas dio por resultado un promedio de 5 UTN, lo que asegura que el lavado se efectuó en su totalidad.

Después de esta limpieza, nuevamente se procedió a ensuciar el filtro a la velocidad y tiempos considerados en el diseño, registrando y comparando la pérdida de carga con la inicial, para continuar el lavado con el siguiente tiempo, también se verificó el grado de limpieza así como su

TABLA 5.1 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS EN EL LABORATORIO

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)
Nº	H	CU	TE	V _c	i	ETAPAS	ΔP ₁	ΔP ₂	ΔP ₁ -ΔP ₂	TUR	μ _{rel}	η	VOL. AGUA REQUERIDA	PÉRDIDA DE ARENA	COSTO TOTAL DE LAVADO
Nº	(m)		(mm)	(cm/s)	(s)	Nº	mmHg	mmHg	mmHg	UTN	(%)	(%)	(m ³)	(m ³)	(N\$)
1	0.7	1.6	0.8	47.0	72	3	0.05	0.100	0.050	5	0.00035	99.94	0.073827	0.37012	170.369
2					48	3	0.05	0.096	0.046	5	0.0260	95.66	0.049218	0.08230	037.932
3					24	7	0.05	0.090	0.040	5	0.0153	97.45	0.054140	0.07812	036.016
4	0.7	1.6	0.8	32.5	72	3	0.05	0.084	0.034	5	0.0184	96.93	0.051051	0.00085	000.467
5					48	5	0.05	0.080	0.030	5	0.0125	97.92	0.054454	0.00058	000.348
6					24	9	0.05	0.074	0.024	5	0.0313	94.78	0.047647	0.00018	000.154
7	0.7	1.6	0.8	18.0	72	6	0.05	0.068	0.018	5	0.0273	95.45	0.050894	0.0	000.076
8					48	9	0.05	0.064	0.014	5	0.0200	96.66	0.052778	0.0	000.079
9					24	18	0.05	0.060	0.010	5	0.0262	95.61	0.050893	0.0	000.075
10	0.7	1.6	0.6	47.0	72	3	0.08	0.156	0.076	5	0.00018	99.97	0.073827	0.80430	370.089
11					48	3	0.08	0.148	0.068	5	0.0198	96.70	0.049218	0.27428	126.243
12					24	7	0.08	0.140	0.060	5	0.0093	98.45	0.054139	0.30429	140.055
13	0.7	1.6	0.6	32.5	72	3	0.08	0.130	0.050	5	0.0154	97.43	0.051051	0.03500	016.176
14					48	5	0.08	0.124	0.044	5	0.0082	98.63	0.054454	0.03089	014.291
15					24	9	0.08	0.118	0.038	5	0.0284	95.26	0.047647	0.01198	005.582
16	0.7	1.6	0.6	18.0	72	6	0.08	0.108	0.028	5	0.0263	95.62	0.050894	0.00013	000.136
17					48	9	0.08	0.100	0.020	5	0.0147	97.55	0.052778	0.00015	000.148
18					24	17	0.08	0.094	0.014	5	0.0295	95.08	0.049009	0.00008	000.110
19	0.7	1.6	0.4	47.0	72	3	0.12	0.220	0.100	5	0.0001	99.98	0.073827	1.12501	517.615
20					48	3	0.12	0.210	0.090	5	0.0160	97.33	0.049218	0.58321	268.350
21					24	7	0.12	0.200	0.080	5	0.0072	98.80	0.054140	0.65032	299.238
22	0.7	1.6	0.4	32.5	72	3	0.12	0.188	0.068	5	0.0195	96.75	0.051051	0.25400	116.916
23					48	5	0.12	0.186	0.066	5	0.0066	98.90	0.054454	0.29623	136.347
24					24	9	0.12	0.172	0.052	5	0.0271	95.48	0.047647	0.15111	069.582
25	0.7	1.6	0.4	18.0	72	6	0.12	0.158	0.038	5	0.0185	96.92	0.050894	0.00011	000.127
26					48	9	0.12	0.148	0.028	5	0.0152	97.47	0.052779	0.00014	000.143
27					24	17	0.12	0.136	0.016	5	0.0253	95.78	0.106038	0.00007	000.191

TABLA 5.2 RESULTADOS DEL MODELO MATEMÁTICO PARA PARTÍCULAS DE ARENA Y FLÓCULOS

(1) No.	(2) TE (mm)	(3) VC (m/h)	(4) V ₀ (m/h)	(5) c (g)	(6) ETA PAS No.	CONCENTRACIÓN DE FLÓCULOS EN CADA CELDA (%)							(14) (%)	(15) FLÓCULOS FUERA DEL FILTRO (%)	(16) FLÓCULOS TOTALES (%)	(17) η (%)	(18) ARENA DENTR DEL FILTRO (%)
						1	2	3	4	5	6	7					
1				72	3	0	0	0	5	10	15	30	0.0002282691	0.5997717	60	99.96	3.051931
2				48	3	0	0	0	5	10	15	30	0.019956420	0.5800436	60	96.67	3.939080
3				24	7	0	0	0	5	10	15	30	0.009123767	0.5908763	60	98.48	3.951778
4				72	3	0	0	0	5	10	15	30	0.016940160	0.5830598	60	97.18	4.197355
5	0.8	25.2	32.5	48	5	0	0	0	5	10	15	30	0.009984927	0.5900151	60	98.33	4.198145
6				24	9	0	0	0	5	10	15	30	0.029201250	0.5707988	60	95.13	4.199439
7				72	6	0	0	0	5	10	15	30	0.024302030	0.5756980	60	95.95	4.2
8			18.0	48	9	0	0	0	5	10	15	30	0.017983570	0.5820165	60	97.00	4.2
9				24	18	0	0	0	5	10	15	30	0.024302020	0.5756980	60	95.95	4.2
10				72	3	0	0	0	0	10	20	30	.000149875	0.5998502	60	99.97	1.671357
11				48	3	0	0	0	0	10	20	30	0.016307330	0.5836927	60	97.38	3.327059
12				24	7	0	0	0	0	10	20	30	0.007149995	0.5928500	60	98.80	3.231406
13				72	3	0	0	0	0	10	20	30	0.01375030	0.5862497	60	97.71	4.089283
14	0.6	19.80	32.5	48	5	0	0	0	0	10	20	30	0.007881147	0.5921189	60	98.69	4.101677
15				24	9	0	0	0	0	10	20	30	0.02442530	0.5755747	60	95.92	4.161879
16				72	6	0	0	0	0	10	20	30	0.02016188	0.5798382	60	96.64	4.2
17			18	48	9	0	0	0	0	10	20	30	0.01467834	0.5853217	60	97.55	4.2
18				24	17	0	0	0	0	10	20	30	0.02641250	0.5735875	60	95.60	4.2
19				72	3	0	0	0	0	5	15	40	0.00010877	0.5998912	60	99.98	0.6488695
20				48	3	0	0	0	0	5	15	40	0.01323050	0.5867695	60	97.78	2.40866
21				24	7	0	0	0	0	5	15	40	0.00565765	0.5943424	60	99.06	2.13926
22				72	3	0	0	0	0	5	15	40	0.01111262	0.5888874	60	98.15	3.375192
23	0.4	14.40	32.5	48	5	0	0	0	0	5	15	40	0.00626356	0.5937365	60	98.95	3.329056
24				24	9	0	0	0	0	5	15	40	0.02012487	0.5798752	60	96.64	3.730078
25				72	6	0	0	0	0	5	15	40	0.01652719	0.5834728	60	97.24	4.199672
26			16	48	9	0	0	0	0	5	15	40	0.01190707	0.5880930	60	98.01	4.199552
27				24	17	0	0	0	0	5	15	40	0.02185355	0.5781465	60	96.36	4.199775

TÍTULAS DE

	(15) FLÓCULOS FUERA DEL FILTRO (%)	(16) FLÓCULOS TOTALES (%)	(17) η (%)	(18) ARENA DENTRO DEL FILTRO (%)	(19) ARENA FUERA DEL FILTRO (%)	(20) VOLUMEN DE AGUA REQUERIDA (m ³)	(21) ARENA FUERA DEL FILTRO (m ³)	(22) VOLUMEN REAL DE AGUA REQUERIDA (m ³)	(23) COSTO TOTAL DEL LAVADO (\$)
252691	0.5997717	60	99.96	3.051931	1.148070	0.2349987	0.36067670	0.07362702	166.022
256420	0.5800436	60	96.67	3.939080	0.260920	0.1566666	0.08197045	0.04921808	37.780
23767	0.5908763	60	98.48	3.951778	0.248222	0.1723323	0.07798128	0.05413978	35.953
40160	0.5830598	60	97.18	4.197355	0.002645	0.1624994	0.00083096	0.05105071	0.459
4927	0.5900151	60	98.33	4.198145	0.001855	0.1733325	0.00058273	0.05445402	0.350
101250	0.5707988	60	95.13	4.199439	0.000561	0.1516666	0.00017632	0.04764731	0.153
603030	0.5756980	60	95.95	4.2	0.0	0.1619996	0.0	0.05089368	0.076
10570	0.5820165	60	97.00	4.2	0.0	0.1679993	0.0	0.05277855	0.079
101020	0.5756980	60	95.95	4.2	0.0	0.1619996	0.0	0.05089362	0.075
40475	0.5998502	60	99.97	1.671357	2.528643	0.3349987	0.794396700	0.07382702	365.533
107330	0.5836927	60	97.28	3.327059	0.872942	0.1566666	0.274242700	0.04921808	126.225
40995	0.5928500	60	98.80	3.231406	0.968594	0.1723323	0.304292800	0.05413978	140.056
70030	0.5862497	60	97.71	4.089283	0.110717	0.1624994	0.034782720	0.05105071	16.077
181147	0.5921189	60	98.69	4.101677	0.098323	0.1733325	0.030889190	0.05445402	14.291
40130	0.5755747	60	95.92	4.161879	0.038212	0.1516666	0.011976140	0.04764731	5.581
10188	0.5798382	60	96.64	4.2	0.0	0.1619996	0.0	0.05089368	0.076
57834	0.5853217	60	97.55	4.2	0.0	0.1679993	0.0	0.05277855	0.079
41250	0.5735875	60	95.60	4.2	0.0	0.1559991	0.0	0.04900858	0.073
10877	0.5998912	60	99.95	0.6488605	3.551131	0.2349987	1.115621000	0.07382702	513.296
33050	0.5867695	60	97.78	2.40866	1.791340	0.1566666	0.562766000	0.04921808	258.946
57665	0.5943424	60	99.06	2.13926	2.060740	0.1723323	0.647400600	0.05413978	297.885
11262	0.5888874	60	98.15	3.375192	0.824808	0.1624994	0.259121100	0.05105071	119.272
26356	0.5937365	60	98.95	3.329056	0.870944	0.1733325	0.273615200	0.05445402	125.945
17487	0.5798752	60	96.64	3.730078	0.469922	0.1516661	0.147630500	0.04764731	67.981
52719	0.5834728	60	97.24	4.199672	0.000328	0.1619996	0.000103064	0.05089368	0.124
10707	0.5880930	60	98.01	4.199552	0.000449	0.1679993	0.000140964	0.05277855	0.144
15355	0.5781465	60	96.36	4.199775	0.000225	0.1559991	0.000070707	0.10603810	0.191

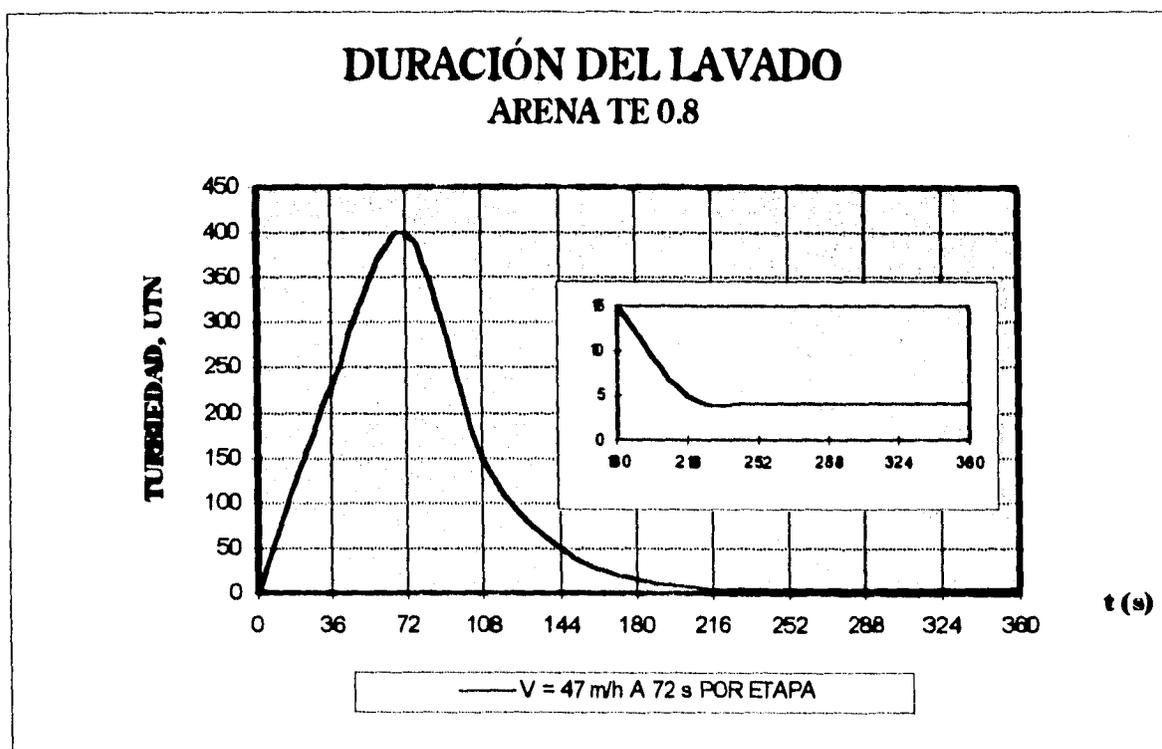


FIGURA 5.1 DURACIÓN DEL LAVADO PARA LA ARENA TE 0.8 CON V_s DE 47 m/s A 72 s POR ETAPA.

Al realizar el lavado de la arena de TE 0.8 con velocidad de 47 m/s a 72 s por etapa, se observa que la turbiedad del agua registrada cada 36 s aumenta rápidamente al principio hasta llegar a valores de 400 UTN y luego, a medida que el lecho se va limpiando la turbiedad disminuye hasta alcanzar cifras inferiores a 10 UTN. Aún cuando se prolongue por largo tiempo el lavado no se obtienen valores < 4 UTN. Así el tiempo óptimo de lavado 216 s para este ensayo, es dado por la curva en el punto de inflexión inferior en donde ésta tiende a ser asintótica con respecto al eje horizontal, con una turbiedad de 5 UTN.

eficiencia en cada proceso, además de registrar el volumen de arena perdida. Posteriormente, se calculó con el número de etapas efectuadas (FIGURA 5.2, 5.3 y 5.4) y los datos geométricos, la cantidad de agua requerida para realizar este lavado, estos resultados se pueden observar en las columnas 8-15 de la TABLA 5.1, describiéndose con mayor detalle a continuación.

La eficiencia que originó el lavado de cada filtro, tomando en cuenta el porcentaje de floculos antes y después de cada lavado, se puede observar en la columna 13 y 17 de las TABLAS 5.1 y 5.2 respectivamente, siendo estas eficiencias siempre mayores del 90% y muy similares entre la fase teórica y experimental. La FIGURA 5.5 presenta un ejemplo gráfico de esta eficiencia.

Haciendo el análisis en las 3 columnas se observa que:

En la columna de TE 0.8 la mayor eficiencia (99.94 %) se logró cuando se le aplicó una velocidad de 47.0 m/h con 3 etapas de 72 s cada una, pero además es la que perdió más arena y utilizó más agua.

Las columnas de TE 0.6 y TE 0.4 obtuvieron nuevamente la mayor eficiencia 99.97 y 99.98 % respectivamente con las mismas condiciones aplicadas a la primera columna, siendo aún más elevado el costo de lavado.

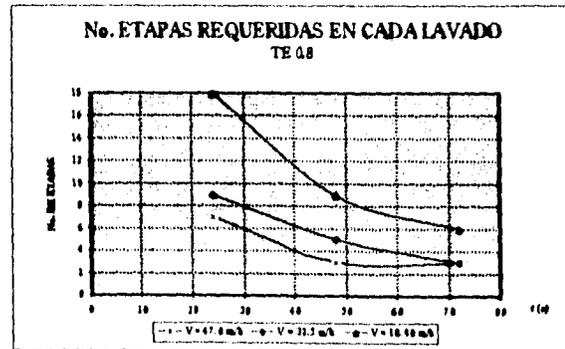


FIGURA 5.2 No. DE ETAPAS REQUERIDAS PARA PRODUCIR LA TURBIEDAD A 5 UNT EN LA COLUMNA DE TE 0.8

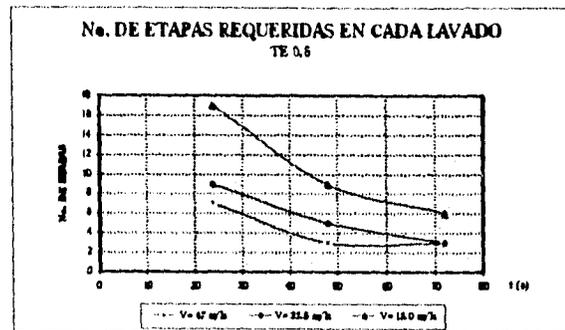


FIGURA 5.3 No. DE ETAPAS REQUERIDAS PARA PRODUCIR LA TURBIEDAD A 5 UNT EN LA COLUMNA DE TE 0.6

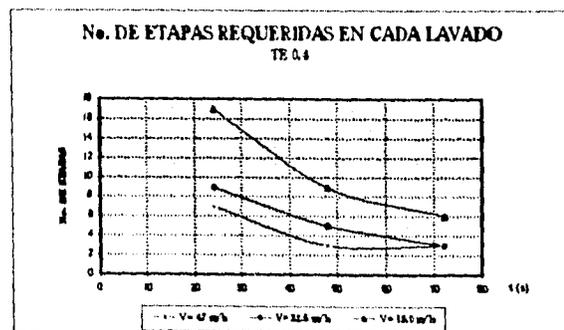


FIGURA 5.4 No. DE ETAPAS REQUERIDAS PARA PRODUCIR LA TURBIEDAD A 5 UNT EN LA COLUMNA DE TE 0.4

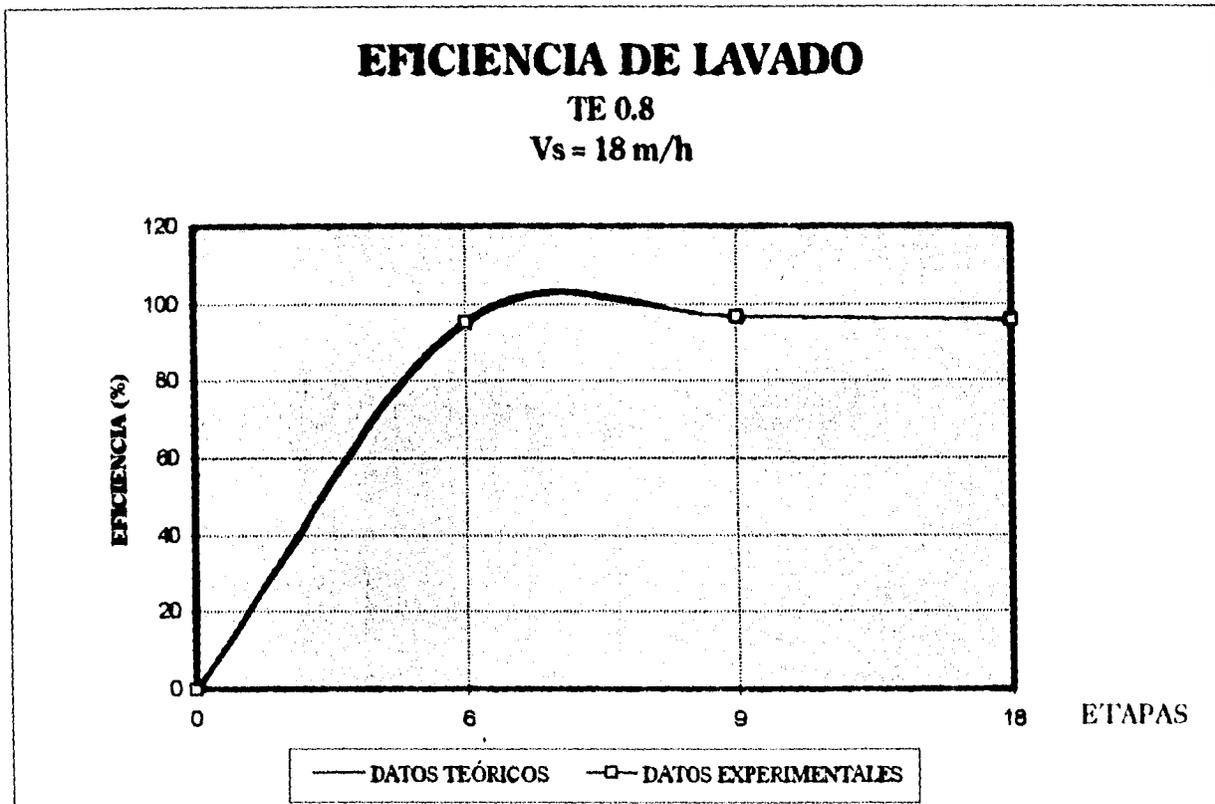


FIGURA 5.5 EFICIENCIA DE LAVADO EN FORMA TEÓRICA Y EXPERIMENTAL.

La FIGURA 5.5 muestra la eficiencia del lavado para la arena de TE 0.8 con una velocidad de ascenso del agua de 18.0 ml/h. La mayor eficiencia se logra cuando el lavado se realiza en 9 etapas con 48 s cada una de los tres diferentes tiempos empleados.

Por tal razón, viendo que el lavado es eficiente en todos los ensayos pero no económico en su operación, se procedió a analizar la pérdida de arena y la cantidad de agua utilizada.

De estos ensayos realizados a la columna de TE 0.8, el que presentó menor pérdida de arena (0.0 m^3) y utilizó menos cantidad de agua (0.050894 m^3) fue el maniobrado con velocidad de 18.0 m/h, en tiempos de 24 s para cada etapa, dando este lavado un costo de N\$ 0.075.

La 2a. columna de TE 0.6 mm, obtuvo las mínimas pérdidas de arena (0.00008 m^3) y de agua (0.049009 m^3) con las mismas variables que utilizó la 1ª columna, costando el lavado N\$ 0.110.

La tercera columna con lecho filtrante de TE 0.4 mm, dio un costo mínimo de lavado (N\$ 0.127) al aplicarle una velocidad de 18.0 m/h pero con tiempo de 72 s en cada etapa.

De estos tres resultados, el menor de ellos fue el de la primera columna, con TE de 0.8, mostrado gráficamente en la FIGURA 5.6 y 5.7, su costo fue de N\$ 0.075. El análisis de los registros de pérdida de carga, al inicio y término de cada lavado, confirman aún más estos resultados, donde se observa que las pérdidas más bajas o las pérdidas más parecidas a la iniciales ($\Delta_{pf} 0.86$), son las obtenidas con la velocidad de 18 m/h, con tiempos de 24 segundos en esta columna (TABLA 5.1. y FIGURAS 5.8, 5.9 y 5.10).

Esto acerca mucho a las conclusiones que obtuvieron Arboleda y Cleasby, (1979), en la simulación de la ecuación de Gradiente de velocidad, donde la fuerza de fricción que se produce sobre un grano para remover la película adherida, se incrementa proporcionalmente con el peso específico y el tamaño de éste. Es decir, es más fácil lavar la arena gruesa que la fina.

A altas velocidades se pierde el frotamiento entre granos, no alcanzándose a desprender la materia adherida a ellos, además sólo serviría para desalojar una gran cantidad de arena. Ciclos más cortos, con un número mayor de ellos, a velocidades bajas, consiguen la remoción de los flóculos de obstrucción, sin perder arena, quedando el costo de lavado, en función únicamente del agua requerida.

Al meter los datos correspondientes al modelo matemático como es la velocidad de caída de las partículas (flóculos y arena), la concentración (de arena y flóculos) en cada celda, las velocidades y tiempos utilizadas en cada caso, se obtuvo el tiempo total de lavado, el número de etapas empleado, la cantidad de flóculos y arena dentro y fuera del filtro, así como la cantidad de agua utilizada. Estos datos arrojados inicialmente son los de la columna idealizada, posteriormente se multiplicaron por un factor de ajuste de acuerdo a las dimensiones geométricas del modelo real, y

RESULTADOS EXPERIMENTALES

COSTO TOTAL DE LAVADO

TE 0.8

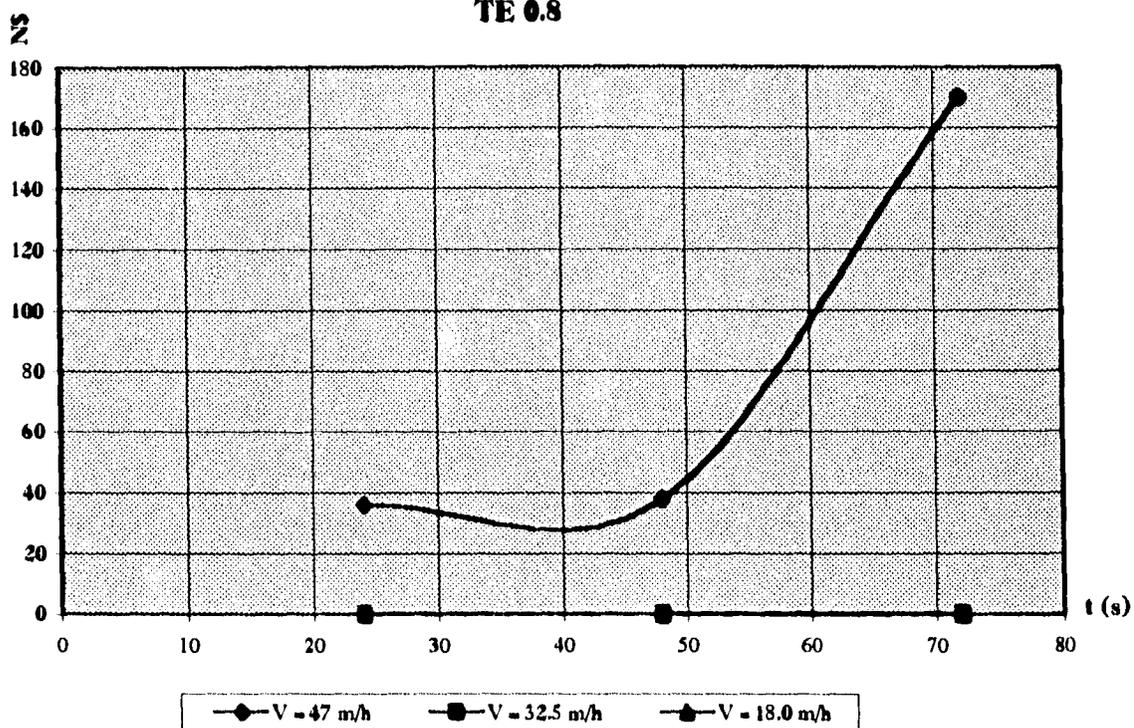


FIGURA 5.6 COSTO TOTAL DE LAVADO PARA LA COLUMNA DE TE 0.8 mm QUE COMPRENDE EL VOLUMEN DE AGUA UTILIZADA (m^3) MÁS LA PÉRDIDA DE ARENA (m^3).

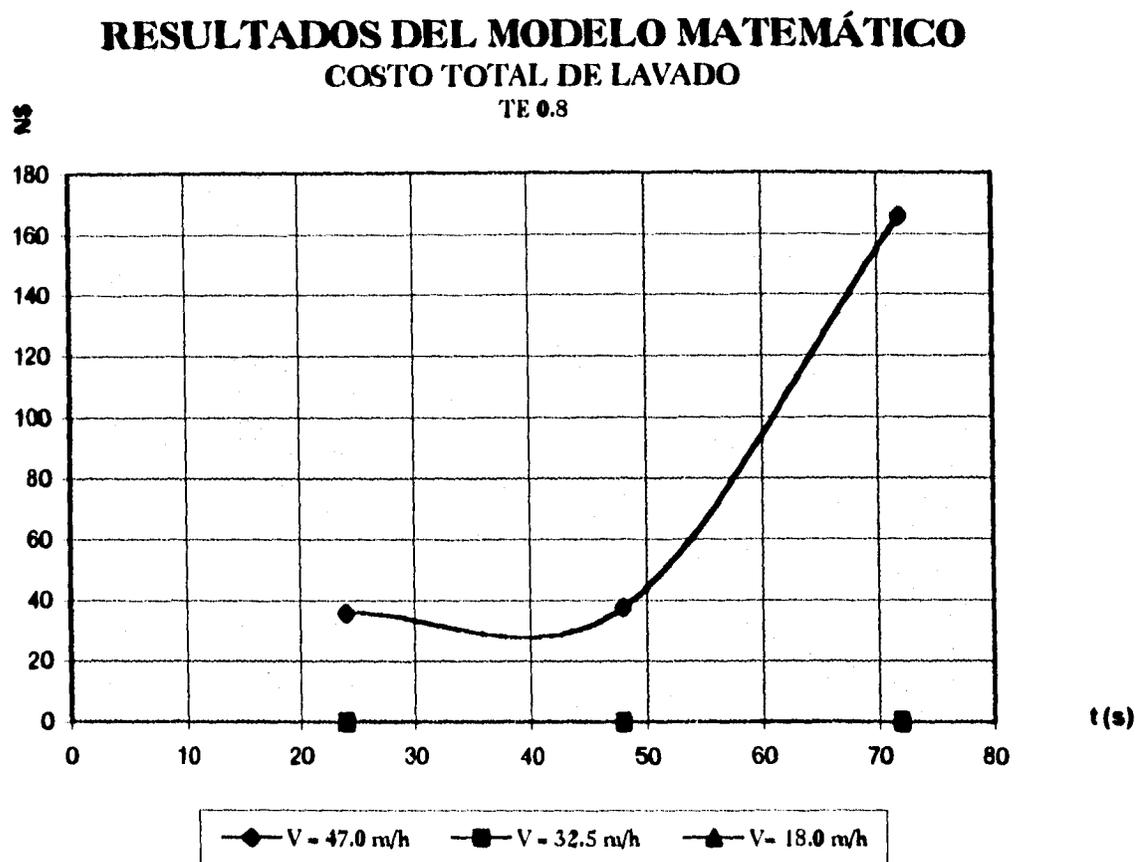


FIGURA 5.7 COSTO TOTAL DE LAVADO PARA LA COLUMNA DE TE 0.8 mm QUE COMPRENDE EL VOLUMEN DE AGUA UTILIZADA (m^3) MÁS LA PÉRDIDA DE ARENA (m^3).

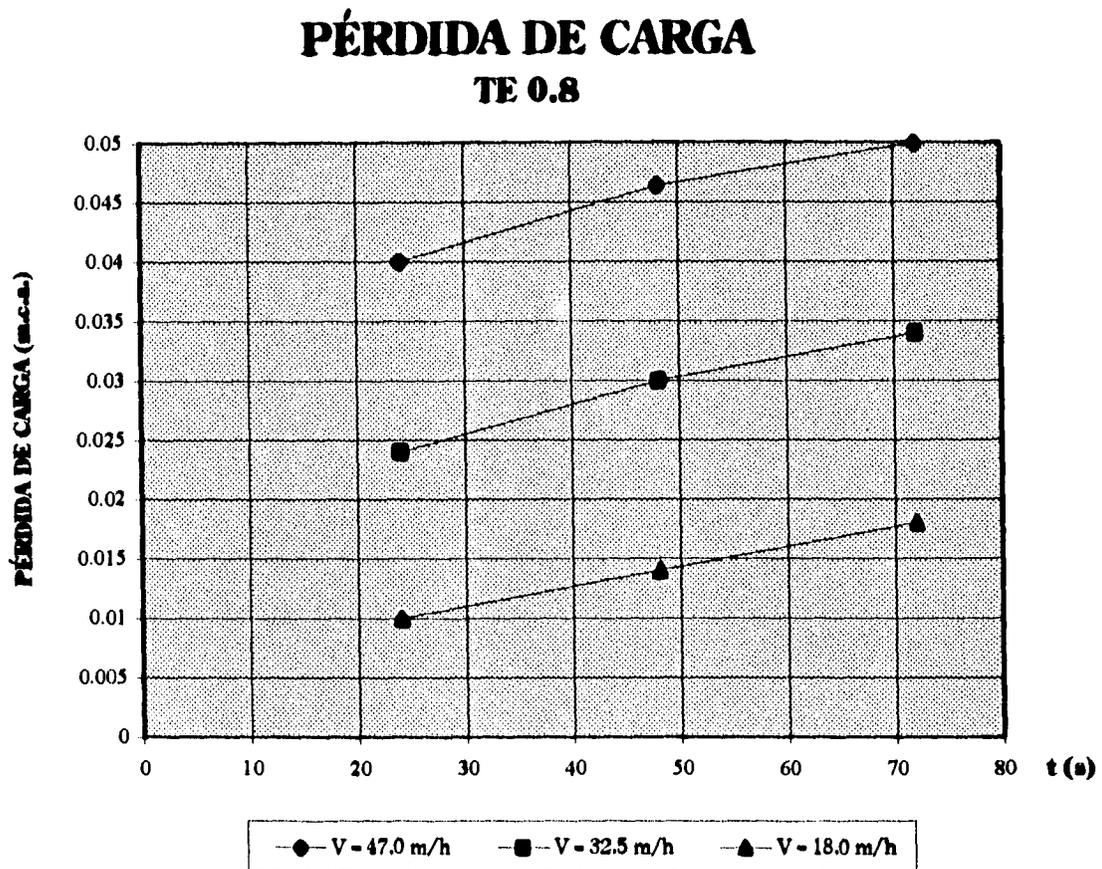


FIGURA 5.8 PÉRDIDAS DE CARGA REGISTRADAS ANTES Y DESPUÉS DE CADA LAVADO PARA LA COLUMNA DE TE 0.8.

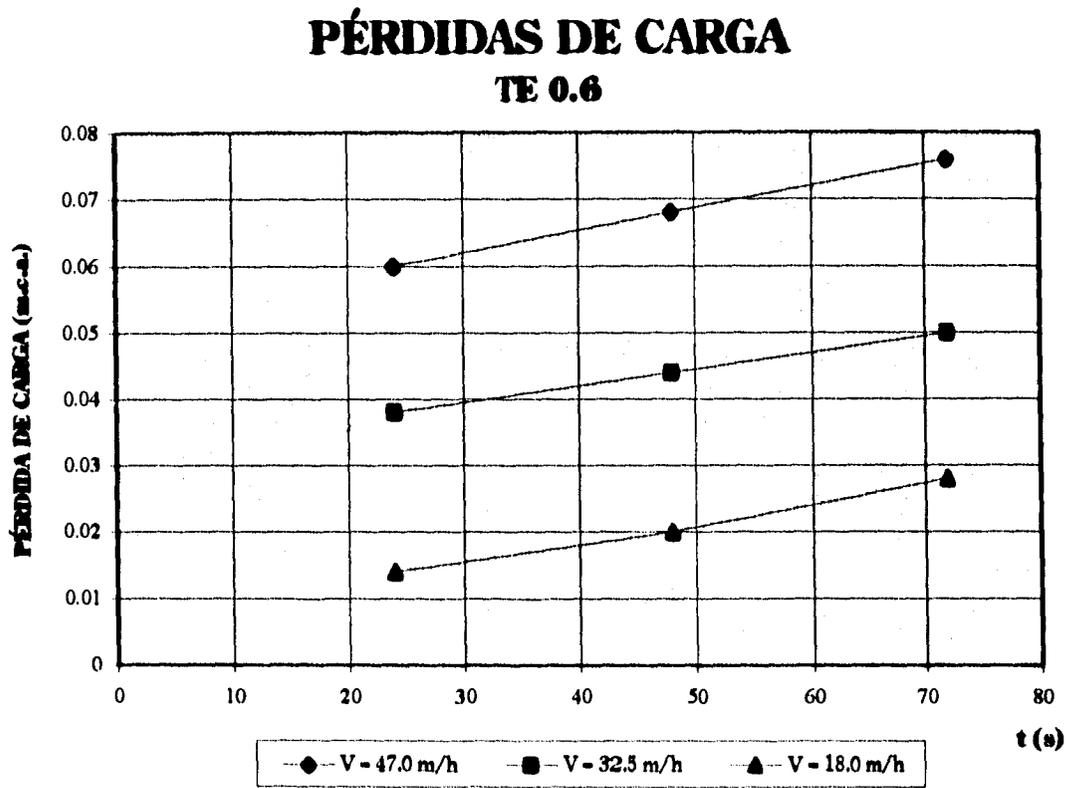


FIGURA 5.9 PÉRDIDAS DE CARGA REGISTRADAS ANTES Y DESPUÉS DE CADA LAVADO, PARA LA COLUMNA DE TE 0.6.

PÉRDIDAS DE CARGA TE 0.4

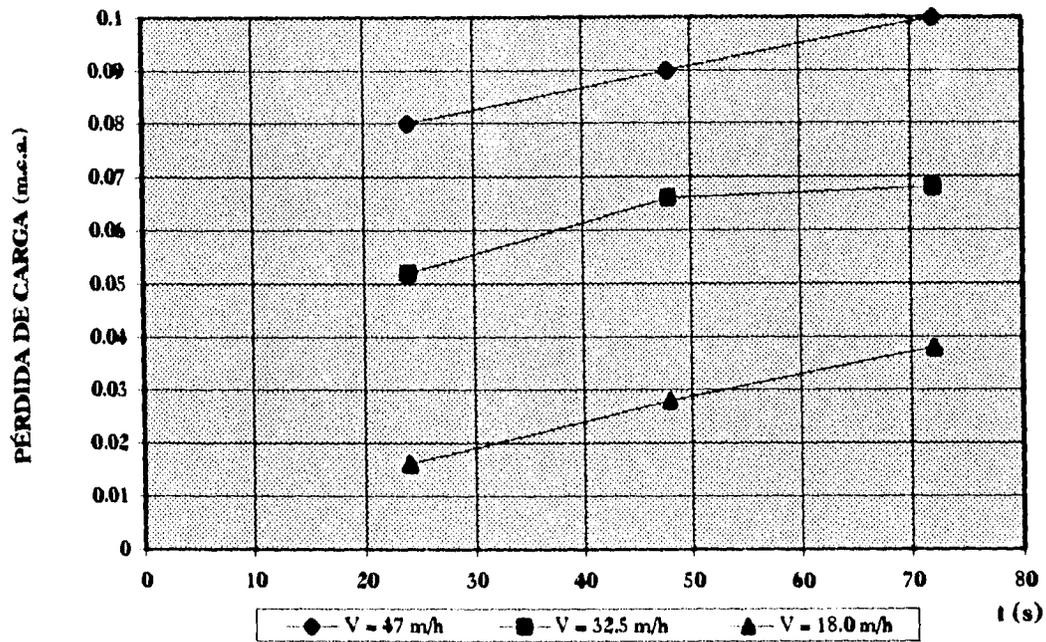


FIGURA 5.10 PÉRDIDAS DE CARGA REGISTRADAS ANTES Y DESPUÉS DE CADA LAVADO, PARA LA COLUMNA DE TE 0.4.

obteniendo por último el costo total de lavado, los cuales se presentan en las tres últimas columnas de la TABLA 5.2, siendo más objetivo la gráfica de la FIGURA 5.7. Además en la TABLA 5.3 y TABLA 5.4 se da un ejemplo de la distribución de arena y flóculos en cada celda, así como los resultados arrojados de este análisis, con los programas que se encuentran en el ANEXO III,

Comparando los resultados teóricos con los experimentales se observa que son muy similares, de lo que se infiere que el modelo matemático ha sido calibrado para las condiciones de este modelo físico, ahorrándonos mucho tiempo para el cálculo de los parámetros deseados y la molestia de estar en el laboratorio por horas y horas para obtener datos que tal vez no sean muy representativos ya sea por los diferentes inconvenientes que se pudieran presentar como son las lecturas mal realizadas, el taponamiento de piezómetros y de la placa difusora, el mal cronometraje, etc.

Además se puede observar que el procedimiento de lavado de filtros por ciclos es eficiente ya que nos permite lavar en un tiempo mínimo, removiéndolo la mayor cantidad de flóculos con una pérdida mínima de arena.

Volviendo al diseño de experimentos, se observa que los resultados obtenidos satisfactoriamente caen dentro de los ensayos propuestos, lo que demuestra que se puede realizar un número mínimo de experimentos, con la seguridad que son suficientes para ser representativos.

En seguida se muestran los datos que se utilizaron en los diferentes ensayos tanto teóricos como experimentales.

COSTO DE LA ARENA	(m ³) N\$ 460.00
COSTO DEL AGUA	(m ³) N\$ 1.50*

VELOCIDAD DE CAÍDA:

♦ ARENA T.E.

0.8	0.007 m/s
0.6	0.0055 m/s
0.4	0.004 m/s

♦ FLÓCULOS	0.0003 m/s
------------	------------

(*) El costo que se le dio al agua fue un promedio de las tarifas autorizadas desde el 16 de enero de 1984 en el Estado de Morelos.

REMOCIÓN DE FLÓCULOS

Velocidad de la corriente ascendente:	0.0130555
Velocidad de caída de los flóculos:	0.0003
Intervalo de tiempo :	0.5
Tiempo que dura cada etapa:	72
Tiempo total empleado:	216
Número de etapas:	3
Volumen de agua requerida:	0.2349987
Volumen final de partículas:	2.135854E-04
Volumen de partículas que salió del filtro:	0.5997865

TABLA 5.3 RESULTADOS DEL MODELO MATEMÁTICO PARA FLÓCULOS

CICLO	ETAPA	t (s)	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q ₅	Q ₆	Q ₇	Q ₈	Q ₉	Q ₁₀	Q ₁₁	Q ₁₂	Q ₁₃	Q ₁₄	Q ₁₅	V _D
			0	0	0	3	10	15	20	0	0	0	0	0	0	0	0	
1°	1°	36	0.000	0.000	0.000	0.043	0.300	1.073	2.752	5.429	8.372	10.272	10.251	5.981	3.624	0.000	0.566	
		72	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.027	0.108	0.333	0.630	1.724	3.047	6.221	7.354	0.000	0.243	
	2°	108	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.004	0.019	0.068	0.199	0.489	1.027	1.878	3.028	4.349	0.111	
		144	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.003	0.013	0.042	0.120	0.291	0.618	1.159	1.907	0.042	
2°	3°	180	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.005	0.015	0.097	0.210	0.000	0.004	
		216	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.005	0.014	0.000	0.000	

En la TABLA 5.3 puede observarse que para cada 36 s, cómo el máximo de concentración de flóculo se va desplazando hacia arriba, por lo cual en las primeras etapas la remoción es pequeña, para irse incrementando sucesivamente. El criterio de limpieza es parar el proceso cuando el porcentaje de flóculos en el filtro es de $0.05 V_D = 0.025$.

REMOCIÓN DE ARENA

Velocidad de la corriente ascendente:	0.0130555
Velocidad de caída de los flocúlos:	0.007
Intervalo de tiempo :	0.5
Tiempo que dura cada etapa:	72
Tiempo total empleado:	216
Número de etapas:	3
Volumen de agua requerida:	0.2349987
Volumen final de partículas:	3.051931
Volumen de partículas que salió del filtro:	1.14807
Volumen de partículas en el modelo real:	0.3606767
Volumen de agua en el modelo real:	2.382702E-02
Costo total del lavado:	166.022

TABLA 5.4 RESULTADOS DEL MODELO MATEMÁTICO PARA PARTÍCULAS DE ARENA

CICLO	ETAPA	n	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q ₅	Q ₆	Q ₇	Q ₈	Q ₉	Q ₁₀	Q ₁₁	Q ₁₂	Q ₁₃	Q ₁₄	Q ₁₅	V _D
			0	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	
1°	1°	36	6.558	21.301	37.641	49.546	55.958	58.681	59.630	53.352	38.680	22.355	10.453	1.319	30.370	0.000	4.199	
		72	0.717	3.939	11.134	21.767	33.469	43.700	51.100	54.938	54.151	48.105	37.957	16.272	8.892	0.000	4.126	
	2°	108	1.492	5.210	12.955	23.734	35.167	44.906	51.686	54.730	53.067	46.363	36.019	24.717	15.004	7.500	4.126	
		144	2.490	6.568	14.795	25.653	36.780	46.005	52.136	54.377	51.877	44.593	34.125	23.121	13.733	6.327	4.126	
2°	3°	180	0.272	1.330	3.900	8.722	15.922	24.802	34.028	42.109	47.721	49.843	47.984	34.425	25.422	0.000	3.789	
		216	0.030	0.212	0.828	2.330	5.241	9.926	16.363	24.009	31.917	38.924	43.903	44.839	40.673	0.0000	3.052	

En la TABLA 5.4 puede observarse claramente el movimiento de ascenso y descenso de la arena, con una pequeña tendencia de la máxima concentración a desplazarse hacia arriba. Por lo demás, los valores consignados allí se han redondeado, pero el verdadero remanente al cabo de la 3a etapa es V_D es 3.052, de tal suerte que la arena perdida en la tres etapas tiene un volumen de S_A igual a 0.36067670 m^3 .

Capítulo 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Una vez calibrado el nuevo método de lavado de filtros profundos basado en la ecuación de la difusión, se llegó a las siguientes conclusiones:

Tanto el trabajo de gabinete como los trabajos experimentales para mejorar el modelo matemático resultaron tardados y laboriosos; invirtiéndose en este último alrededor de N\$60,000.00 durante año y medio. El costo de la arena perdida en los numerosos filtros que se emplean en el país es bastante elevado, por el manejo inadecuado de las diferentes variables y parámetros que intervienen en el lavado, como son la velocidad, el tiempo, la granulometría, la altura del lecho, etc. En filtros donde se llevó a cabo la experimentación durante cuatros meses las pérdidas equivalen a N\$ 124,110.0328, lo cual justifica completamente un estudio de esta naturaleza.

El diseño de experimentos seleccionado implica un total de 21 ensayos, pero se realizaron 27, haciendo uso de todas las combinaciones posibles con las diferentes variables experimentales, y se observó que los resultados de los 21 si pueden ser un número mínimo, con la seguridad de que sean suficientes para ser representativos.

Tanto el modelo físico como el matemático tienen un promedio de eficiencia de lavado del 97%, y entre ambos existe una diferencia del 0.5 %, pero no todos sus ensayos son representativos para operarlos económicamente.

De estos ensayos resultó que el que da un mejor lavado con menor pérdida de arena y agua es el de la columna con TE de 0.8 mm, con una velocidad de 18 m/h, con tiempos de 24 s para cada etapa, apoyándose en la menor pérdida de carga. Lo que reafirma a las investigaciones de Arboleda y Cleasby (1979), es más fácil lavar la arena gruesa que la fina. Además usar ciclos más cortos, con número mayor de ellos, a velocidades bajas, consiguen la remoción de los flóculos de obstrucción, sin perder arena, quedando el costo de lavado, únicamente en función del agua requerida, (TABLA 6.1).

**TABLA 6.1 MEJORES CONDICIONES DE LAVADO PARA CADA TE
(RESULTADOS EXPERIMENTALES)**

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)
No.	H (m)	CU (mm)	TE (mm)	V _s (m/h)	t (s)	ETAPAS No.	ΔP ₁ mbar	ΔP ₂ mbar	ΔP _{1-2P} mbar	TUR L/TN	W _{agua} (kg)	η (%)	VOL. AGUA REQUERIDA (m ³)	PÉRDIDA DE ARENA (m ³)	COSTO TOTAL DE LAVADO (No)
9	0.7	1.6	0.8	18.00	24	18	0.05	0.060	0.010	5	0.0262	95.63	0.050893	0.0	000.075
18	0.7	1.6	0.6	18.00	24	17	0.08	0.094	0.014	5	0.0295	95.08	0.049009	0.00008	000.110
25	0.7	1.6	0.4	18.00	72	6	0.12	0.158	0.038	5	0.0185	96.92	0.050894	0.00011	000.127
27	0.7	1.6	0.4	18.00	24	17	0.12	0.136	0.016	5	0.0253	95.78	0.106038	0.00007	000.191

Como recomendaciones se puede comentar lo siguiente:

Ha quedado la inquietud, que aunque la distribución del flujo de lavado se supuso uniforme y por ello es suficiente para trabajar en una sola dimensión, es recomendable realizar la experimentación en dos direcciones simultáneamente, con lo cual posiblemente se tendrían resultados más exactos, más finos, que mostrarían algo mucho más cercano a la realidad o cerciorarse de que este primer procedimiento no es tan representativo o es suficiente para realizar un lavado eficiente de filtros.

Para ello se requiere que la construcción del sistema de filtración sea más preciso; los piezómetros pueden conectarse de un material metálico debidamente empacado para evitar el constante rompimiento y poder realizar lecturas más confiables; es deseable, contar con un rotámetro por columna, de preferencia de carátula; las válvulas de compuerta utilizadas pueden cambiarse por de aguja y la solución empleada como sustituto de la encontrada en las plantas potabilizadoras pudiera ser otra que no se cristalice en el filtro, contar con un mejor sistema de recirculación, o trabajar en planta para realizar ensayos más representativos.

Capítulo 7

BIBLIOGRAFÍA

7. BIBLIOGRAFÍA

1. AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION
"Filtración",
Agua su calidad y tratamiento,
pp 265-301.
1968.
2. AMIRTHARAJAH, APPIAH
"Some Theoretical and Conceptual Views of Filtration"
Research and Technology
Journal Awwa
December, 1988.
3. ARBOLEDA, J
"Manual de tratamiento de agua potable"
Programa de Educación de Ingeniería Sanitaria,
Caracas, Venezuela, publicación No. 30
1973.
4. ARBOLEDA V., VARGAS C. Y CORREAL C.
"Filtración",
Manual de tratamiento de aguas potables.
Caracas, pp 143-221.
1969.
5. BAYLIS, J.R.,
"Experiences in Filtration",
Jour. AWWA, 29: 1010.
Julio, 1937.
6. CENTRO PANAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y CIENCIAS DEL AMBIENTE (CEPIS).
"Teoría de la filtración del agua, Conceptos modernos sobre el diseño de unidades de filtración y Control del proceso de filtración".
Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua.
Serie Técnica 13. pp 296-533.
1981.

7. COMMITTEE OF THE SANITARY ENGINEERING DIVISION ON FILTERING MATERIALS FOR WATER AND SEWAGE WORKS

"Progress Report on Filter Sand for Water Purification Plants".
Proc. A.S.C.E., 62:1543
1936.

8. CORNET J.C.

"Consideration de génie chimique sur les différents modes de lavage des filtres rapides".
La Technique de l'eau et de l'assainissement,"
No. 412, abril, pp 7-23.
1981.

9. DAHLQUIST G Y BJÖRCK a

"Numerical Methods",
Translated by Anderson N., De Prentice-Hall,
Series in Automatic Computation, U.S.A., 573 pp.
1974.

10. HARDIN, EUGENE A.

"Design and Operation Data on Large Rapid Sand Filtration Plants in the U.S. and Canada".
Jour. A.W.W.A., 34:1847
1942.

11. JIMÉNEZ CISNEROS BLANCA E., SÁNCHEZ BRIBIESCA JOSÉ LUIS

"Proyecto funcional y análisis de diferentes tipos de bajodrenes para filtros de plantas potabilizadoras".
Proyecto 8342. Vol. I, UNAM
marzo 1989.

12. JIMÉNEZ CISNEROS BLANCA, VEGA GONZÁLEZ EDUARDO

"Manual de Operación de retrolavado de Filtros de arena de la Planta Potabilizadora "Los Berros", del sistema Cutzamala Edo. de México"
Proyecto 0302,
octubre 1990.

13. **SÁNCHEZ BRIBIESCA JOSÉ LUIS, FUENTES MARILES ÓSCAR.**
"Problemas de Ingeniería Hidráulica y Ambientales"
Proyecto 0330, UNAM.
julio 1981.

14. **SÁNCHEZ BRIBIESCA JOSÉ LUIS, JIMÉNEZ CISNEROS B.**
"Determinación del costo de operación del lavado de Filtros de arena
mediante un modelo de simulación"
Instituto de Ingeniería, UNAM
México, D.F.

15. **SÁNCHEZ BRIBIESCA JOSÉ LUIS, JIMÉNEZ CISNEROS BLANCA E.**
"Una posible forma de mejorar la eficiencia del lavado de filtros"
Proyecto 0314.
Instituto de Ingeniería, UNAM
junio 1990.

16. **TOBIASON J.E. AND O'MELIA C.H.R.**
"Physicochemical Aspects of Particle Removal in Depth Filtration"
Research and Technology
Journal Awwa.
December, 1988.

17. **WALTER J. WEBER, JR.**
"Control de la calidad del agua Procesos fisicoquímicos".
1979.

Anexos

ANEXO I

ARENA PARA FILTROS RÁPIDOS:

La TABLA I.1 indica la práctica corriente de elección de arena para los filtros de acción rápida. Las arenas son poco más gruesas que las empleadas en los filtros de acción lenta.

TABLA I.1 CARACTERES DE LA ARENA DE LOS FILTROS RÁPIDOS (HAEDIN, 1942)

LUGAR	AÑO DE CONSTRUCCIÓN	ARENA		
		PROFUNDIDAD	TAMAÑO EFECTIVO	COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD
		cm	mm	
Atlanta, Ga.	1940	61	0.50	1.60
Baltimore, Md.	1928	61	0.60	1.20
Buffalo, N.Y.	1926	66	0.45	1.50
Cincinnati, Ohio	1938	69	0.44	1.50
Columbus, Ohio	1923	61	0.55	1.60
Denver, Col				
Moffat	1937	69	0.48	1.41
Marston Lake (Coal)	1925	122	0.62	1.78
Detroit, Mich. (Springwells)	1931	51	0.54	1.52
Fort Wayne, Ind.	1933	61	0.45	1.20
Indianapolis, Ind. (Fall Creek)	1941	69	0.39	1.40
Louisville, Ky	1931	76	0.41	1.30
Milwaukee, Wis.	1939	69	0.51	1.32
Philadelphia, Pa.	1929	71	0.40-0.55	1.50-1.70
St. Louis, Mo. (Howard Bend)	1929	61	0.46	1.48
Toledo, Ohio (Iago)	1942	61	0.37	1.60
Toronto Ont. (Victoria Park).	1941	66	0.55	1.50
Washington, D.C. (Dalecarlia)	1928	51	0.48	1.40

ANEXO Ib

La tabla I.2 presenta algunos valores usados en plantas de tratamiento:

TABLA I.2 TIPO DE LECHOS FILTRANTES USADOS (HARDIN 1942)

CIUDAD	TIPO DE LECHO	PROFUNDIDAD (m)	TAMAÑO EFECTIVO	COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD
Lima (Perú)	Uniforme	0.90	0.8	1.1
Caracas (Venezuela)	Estratificado	0.75	0.4-0.6	1.60
Cúcuta (Colombia)	Estratificado	0.60	0.57	1.60
Detroit (USA)	Estratificado	0.75	0.45	1.60
Los Angeles (USA)	Estratificado	0.60	0.45-0.5	1.65
Milwaukee (USA)	Estratificado	0.67	0.51	1.32
Montreal (Canadá)	Estratificado	0.75	0.48	1.65
Chicago (USA)	Estratificado	0.62	0.65	1.40
Cincinnati (USA)	Estratificado	0.67	0.42-0.44	1.60

ANEXO II**ESCALA DE MOH:**

La escala de Moh determina comparativamente la dureza de los minerales por la capacidad que cada uno de ellos tiene para rayar al otro.

TABLA II.1 ESCALA DE MOH

ESCALA DE MOH	
1.	Talco
2.	Yeso
3.	Calcita
4.	Fluorita
5.	Apatita
6.	Ortoclasa
7.	Cuarzo
8.	Topacio
9.	Corindón
10.	Diamante

ANEXO IIIa

PROGRAMA PARA CALCULAR LAS CONCENTRACIONES DE FLÓCULOS

```

REM **** PROGRAMA LAVADO DE FILTROS, CONCENTRACIÓN DE FLÓCULOS ****
REM Ciudad Universitaria D.F., junio de 1995
REM Instituto de Ingeniería, UNAM.
REM -----
REM
REM PROGRAMA PARA FLÓCULOS
REM Este programa se usa para conocer el volumen remanente de flóculos, el agua requerida
REM y el número de etapas necesarias en el lavado de filtros
REM -----
REM
REM VARIABLES DE ENTRADA
REM N Número de celdas
REM DS Longitud vertical de cada celda, (m)
REM PR Porcentaje de la cantidad inicial de materia en la que se suspende el calculo
REM DT Intervalo de tiempo, (s)
REM MC Máxima concentración de arena
REM VC Velocidad de caída de la arena, (m/s)
REM Z(I) Concentración de arena en la celda I
REM VS Máxima velocidad del flujo del agua, (m/s)
REM TC Lapso que dura el flujo con velocidad máximas, (s)
REM VARIABLES DE SALIDA
REM VS Velocidad de la corriente ascendente, (m/s)
REM VC Velocidad de caída de las partículas, (m/s)
REM DT Intervalo de tiempo
REM TC Tiempo que dura cada etapa, (s)
REM T Tiempo total empleado, (s)
REM NS Número de etapas
REM VW Volumen de agua requerida
REM VD Volumen final de partículas
REM VDI - VD Volumen de partículas que salió del filtro
PRINT "Programa PRGARENA FECHA: "; DATE$; " HORA: "; TIME$
PRINT
DIM Z(14), F(14), Q(14), C(14)
REM ***** LEE DATOS *****
READ N, DS, PR, DT, MC, VC
DATA 14, 0.1, 0.05, 0.5, 60, .0003
FOR I = 1 TO N
READ Z(I)
NEXT I
DATA 0, 0, 0, 5, 10, 15, 30, 0, 0, 0, 0, 0, 0
INPUT "Velocidad de flujo de la primera etapa"; VS
INPUT "Duración de cada etapa"; TC
INPUT "Número de etapas"; NA

```

```

REM ***** CALCULA CONSTANTES*****
TD  = TC
TQ  = TC / 2
TIM = 0
LS  = TC / DT
LB  = LS
VB  = VS * .5
D2  = DS * DS
D3  = 1 / D2
N1  = N - 1
NS  = 0
T   = 0
VW  = 0
VST = 0
WS  = DS * VS * DT
WB  = DS * VB * DT
KS  = DT * (VS - VC) / DS
KB  = DT * (VB - VC) / DS
REM ***** ENCUENTRA EL VOLUMEN INICIAL DE FLÓCULOS *****
S   = 0
FOR I = 1 TO N
S   = S + Z(I)
NEXT I
VD  = S * D2
VDI = VD
VF  = VD * PR
REM ***** CONSIDERA LA ETAPA CON VELOCIDAD DE LA CORRIENTE GRANDE *****
PRINT
PRINT
PRINT "t Q(1) Q(2) Q(3) Q(4) Q(5) Q(6) Q(7) Q(8) Q(9) Q(10) Q(11) Q(12) Q(13) Q(14)
VD"
680 IF NS = NA THEN 1860
NS  = NS + 1
PRINT
FOR J = 1 TO LS
F(I) = Z(I) * KS
Q(I) = Z(I) - F(I)
FOR Y = 2 TO N
F(I) = Z(I) * KS
Q(I) = Z(I) + F(I - 1) - F(I)
NEXT I
REM ***** HACE LA PRIMERA COMPENSACIÓN *****
S   = 0
FOR Y = 1 TO N
IF Q(I) > 0 THEN 840
Z(I) = 0
GOTO 850
840 Z(I) = Q(I)
850 S = S + Z(I)
NEXT I
X1  = VD / ((S + F(N)) * D2)
FOR I = 1 TO N

```

```

Q(I)  = X1 * Z(I)
NEXT I
VN    = X1 * F(N) * D2
REM ***** REALIZA LA SEGUNDA COMPENSACIÓN *****
S     = 0
P     = 0
FOR Y = 1 TO N
IF Q(I) < MC THEN 990
P     = P + 1
GOTO 1000
990 S  = S + Q(I)
1000 NEXT I
K2    = (VD - P * MC * D2) / (S * D2 + VN)
FOR I = 1 TO N
IF Q(I) < MC THEN 1060
Z(I)  = MC
GOTO 1070
1060  Z(I) = K2 * Q(I)
1070  NEXT I
VU    = K2 * VN
VD    = VD - VU
T     = T + DT
VW    = VW + WS
TIM   = TIM + DT
REM ***** SI PROCEDE IMPRIME RESULTADOS *****
IF TIM <> TQ THEN 1170
PRINT USING "###"; T; ; PRINT USING "###.###"; Z(1); Z(2); Z(3); Z(4); Z(5); Z(6); Z(7); Z(8);
Z(9); Z(10); Z(11); Z(13); Z(14); ; PRINT USING "###.###"; VD
TIM   = 0
1170 NEXT J
REM ***** CUANDO EL VOLUMEN DE MATERIA ES MENOR AL MÍNIMO ADMITIDO
TERMINA*****
IF VD < VF THEN 1860
IF NS = NA THEN 1860
NS    = NS + 1
PRINT
REM ***** CONSIDERA LA ETAPA CON VELOCIDAD DE LA CORRIENTE
PEQUEÑA*****
REM Etapa de descenso de materia
FOR J = 1 TO LB
IF KB > 0 THEN 1370
F(1)  = -Z(2) * KB
Q(1)  = Z(1) + F(1)
FOR I = 2 TO N1
F(I)  = -Z(I + 1) * KB
Q(I)  = Z(I) + F(I) - F(I - 1)
NEXT I
F(N)  = 0
Q(N)  = Z(N) - F(N1)
GOTO 1440
REM Etapa de ascenso de materia
1370 F(1) = Z(1) * KB
Q(1)  = Z(1) - F(1)

```

```

WQQ I = 2 TO N
F(I) = Z(I) * KB
Q(I) = Z(I) + F(I - 1) - F(I)
NEXT I
REM ***** HACE LA PRIMERA COMPENSACIÓN *****
1440 S = 0
FOR I = 1 TO N
IF Q(I) > 0 THEN 1490
Z(I) = 0
GOTO 1500
1490 Z(I) = Q(I)
1500 S = S + Z(I)
NEXT I
X1 = VD / ((S + F(N)) * D2)
FOR I = 1 TO N
Q(I) = X1 * Z(I)
NEXT I
VN = X1 * F(N) * D2
REM ***** REALIZA LA SEGUNDA COMPENSACIÓN *****
S = 0
P = 0
FOR I = 1 TO N
IF Q(I) < MC THEN 1640
P = P + 1
GOTO 1650
1640 S = S + Q(I)
1650 NEXT I
K2 = (VD - P * MC * D2) / (S * D2 + VN)
FOR I = 1 TO N
IF Q(I) < MC THEN 1710
Z(I) = MC
GOTO 1720
1710 Z(I) = K2 * Q(I)
1720 NEXT I
VU = K2 * VN
VD = VD - VU
T = T + DT
VW = VW + WB
TIM = TIM + DT
REM ***** SI PROCEDE IMPRIME RESULTADOS *****
IF TIM <> TQ THEN 1820
PRINT USING "###"; T; : PRINT USING "###.###"; Z(1); Z(2); Z(3); Z(4); Z(5); Z(6); Z(7); Z(8);
Z(9); Z(10); Z(11); Z(12); Z(13); Z(14); : PRINT USING "###.###"; VD
TIM = 0
1820 NEXT J
REM ***** CUANDO EL VOLUMEN DE MATERIA ES MENOR AL MINIMO ADMITIDO
TERMINA*****
IF VD > VF THEN 680
REM ***** IMPRIME OTROS VALORES DE INTERES *****
1860 PRINT
PRINT "Velocidad de la corriente ascendente "; VS
PRINT "Velocidad de caída de las partículas "; VC
PRINT "Intervalo de tiempo "; DT

```

```
PRINT "Tiempo que dura cada etapa"; TC
PRINT "Tiempo total empleado"; T
PRINT "Número de etapas"; NS
PRINT "Volumen de agua requerida"; VW
PRINT "Volumen final de partículas"; VD
PRINT "Volumen de partículas que salió del filtro"; VDI - VD
PRINT
END
```

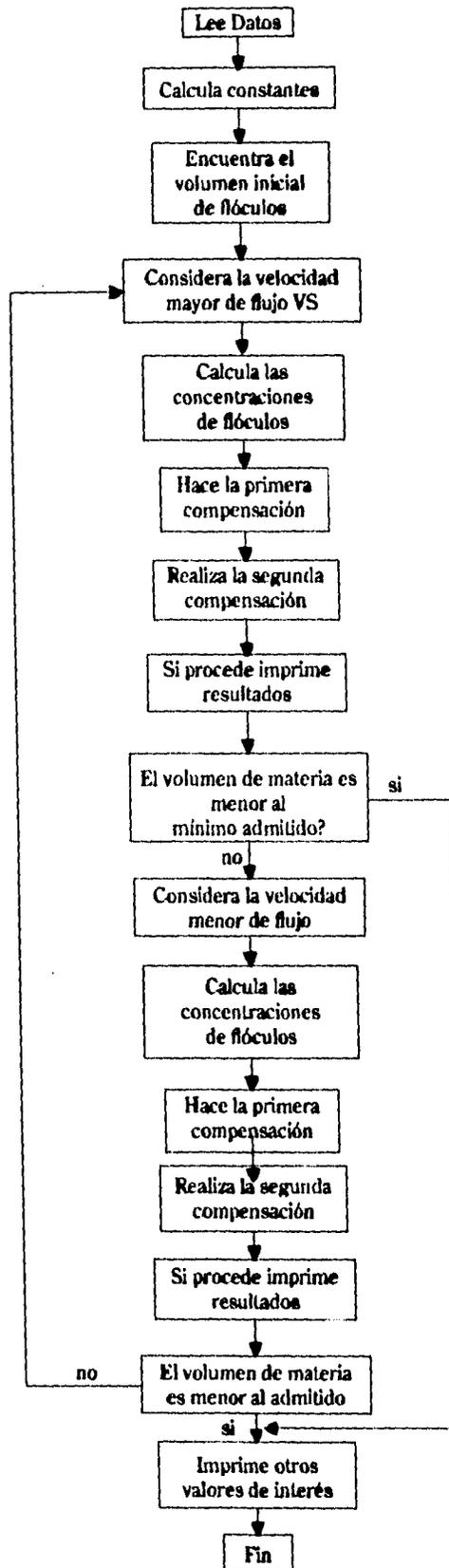


FIGURA III a. DIAGRAMA DE BLOQUES Y LISTADO (FLÓCULOS)

ANEXO IIIb

PROGRAMA PARA CALCULAR LAS CONCENTRACIONES DE ARENA

```

REM ***** PROGRAMA LAVADO DE FILTROS, CONCENTRACIÓN DE ARENA *****
REM                               Ciudad Universitaria D.F., junio de 1995.
REM                               Instituto de Ingeniería, UNAM.
REM -----
REM
REM PROGRAMAS PARA ARENA
REM Este programa se usa para conocer el volumen remanente de arena, en el lavado de filtros.
REM y realizar el cálculo del costo total de la arena perdida y el agua utilizada.
REM -----
REM
REM VARIABLES DE ENTRADA
REM N      Número de celdas
REM DS     Longitud vertical de cada celda, (m)
REM PR     Porcentaje de la cantidad inicial de materia en la que se suspende el calculo
REM DT     Intervalo de tiempo, (s)
REM MC     Máxima concentración de arena
REM VC     Velocidad de caída de la arena, (m/s)
REM Z(I)   Concentración de arena en la celda I
REM VS     Máxima velocidad del flujo del agua, (m/s)
REM TC     Lapso que dura el flujo con velocidad máximas, (s)
REM
REM VARIABLES DE SALIDA
REM VS     Velocidad de la corriente ascendente, (m/s)
REM VC     Velocidad de caída de las partículas, (m/s)
REM DT     Intervalo de tiempo
REM TC     Tiempo que dura cada etapa, (s)
REM T      Tiempo total empleado, (s)
REM NS     Número de etapas
REM VW     Volumen de agua requerida
REM VD     Volumen final de partículas
REM VDI - VD  Volumen de partículas que salió del filtro
PRINT "Programa PRGARENA      FECHA: "; DATE$; "  HORA: "; TIME$
PRINT
DIM Z(14), F(14), Q(14), C(14)
REM ***** LEE DATOS *****
READ N, DS, PR, DT, MC, VC
DATA 14, 0.1, 0.05, 0.5, 60, .007
FOR I = 1 TO N
READ Z(I)
NEXT I
DATA 60, 60, 60, 60, 60, 60, 60, 0, 0, 0, 0, 0,
INPUT "Velocidad de flujo de la primera etapa"; VS
INPUT "Duración de cada etapa"; TC
INPUT "Número de etapas"; NA

```

```

REM ***** CALCULA CONSTANTES*****
TD  = TC
TQ  = TC / 2
TIM = 0
LS  = TC / DT
LB  = LS
VB  = VS * .5
D2  = DS * DS
D3  = 1 / D2
N1  = N - 1
NS  = 0
T   = 0
VW  = 0
VST = 0
WS  = DS * VS * DT
WB  = DS * VB * DT
KS  = DT * (VS - VC) / DS
KB  = DT * (VB - VC) / DS
REM ***** ENCUENTRA EL VOLUMEN INICIAL DE FLOCULOS *****
S   = 0
FOR I = 1 TO N
S   = S + Z(I)
NEXT I
VD  = S * D2
VDI = VD
VF  = VD * PR
REM ***** CONSIDERA LA ETAPA CON VELOCIDAD DE LA CORRIENTE GRANDE *****
PRINT
PRINT
PRINT " t Q(1) Q(2) Q(3) Q(4) Q(5) Q(6) Q(7) Q(8) Q(9) Q(10) Q(11) Q(12) Q(13) Q(14)
VD"
680 IF NS = NA THEN 1860
NS  = NS + 1
PRINT
FOR J = 1 TO LS
F(I) = Z(I) * KS
Q(I) = Z(I) - F(I)
FOR Y = 2 TO N
F(I) = Z(I) * KS
Q(I) = Z(I) + F(I - 1) - F(I)
NEXT I
REM ***** HACE LA PRIMERA COMPENSACIÓN *****
S   = 0
FOR Y = 1 TO N
IF Q(I) > 0 THEN 840
Z(I) = 0
GOTO 850
840 Z(I) = Q(I)
850 S = S + Z(I)
NEXT I
X1  = VD / ((S + F(N)) * D2)
FOR I = 1 TO N
Q(I) = X1 * Z(I)
NEXT I

```

```

VN      = X1 * F(N) * D2
REM ***** REALIZA LA SEGUNDA COMPENSACIÓN *****
S       = 0
P       = 0
FOR Y = 1 TO N
IF Q(I) < MC THEN 990
P       = P + 1
GOTO 1000
990 S   = S + Q(I)
1000 NEXT I
K2      = (VD - P * MC * D2) / (S * D2 + VN)
FOR I = 1 TO N
IF Q(I) < MC THEN 1060
Z(I)    = MC
GOTO 1070
1060 Z(I) = K2 * Q(I)
1070 NEXT I
VU      = K2 * VN
VD      = VD - VU
T       = T + DT
VW      = VW + WS
TIM     = TIM + DT
REM ***** SI PROCEDE IMPRIME RESULTADOS *****
IF TIM   <> TQ THEN 1170
PRINT USING "###"; T; ; PRINT USING "###.###"; Z(1); Z(2); Z(3); Z(4); Z(5); Z(6); Z(7); Z(8);
Z(9); Z(10); Z(11); Z(13); Z(14); ; PRINT USING "###.###"; VD
TIM     = 0
1170 NEXT J
REM ***** CUANDO EL VOLUMEN DE MATERIA ES MENOR AL MÍNIMO ADMITIDO
TERMINA *****
IF VD < VF THEN 1860
IF NS = NA THEN 1860
NS     = NS + 1
PRINT
REM ***** CONSIDERA LA ETAPA CON VELOCIDAD DE LA CORRIENTE
PEQUEÑA *****
REM Etapa de descenso de materia
FOR J = 1 TO LB
IF KB > 0 THEN 1370
F(1)   = -Z(2) * KB
Q(1)   = Z(1) + F(1)
FOR I = 2 TO N1
F(I)   = -Z(I + 1) * KB
Q(I)   = Z(I) + F(I) - F(I - 1)
NEXT I
F(N)   = 0
Q(N)   = Z(N) - F(N1)
GOTO 1440
REM Etapa de ascenso de materia
1370 F(1) = Z(1) * KB
Q(1)   = Z(1) - F(1)
FOR I = 2 TO N
F(I)   = Z(I) * KB
Q(I)   = Z(I) + F(I - 1) - F(I)
NEXT I

```

```

REM ***** HACER LA PRIMERA COMPENSACIÓN *****
1440 S = 0
FOR I = 1 TO N
IF Q(I) > 0 THEN 1490
Z(I) = 0
GOTO 1500
1490 Z(I) = Q(I)
1500 S = S + Z(I)
NEXT I
X1 = VD / ((S + F(N)) * D2)
FOR I = 1 TO N
Q(I) = X1 * Z(I)
NEXT I
VN = X1 * F(N) * D2
REM ***** REALIZA LA SEGUNDA COMPENSACIÓN *****
S = 0
P = 0
FOR I = 1 TO N
IF Q(I) < MC THEN 1640
P = P + 1
GOTO 1650
1640 S = S + Q(I)
1650 NEXT I
K2 = (VD - P * MC * D2) / (S * D2 + VN)
FOR I = 1 TO N
IF Q(I) < MC THEN 1710
Z(I) = MC
GOTO 1720
1710 Z(I) = K2 * Q(I)
1720 NEXT I
VU = K2 * VN
VD = VD - VU
T = T + DT
VW = VW + WB
TIM = TIM + DT
REM ***** SI PROCEDE IMPRIME RESULTADOS *****
IF TIM < > TQ THEN 1820
PRINT USING "###"; T; : PRINT USING "###.###"; Z(1); Z(2); Z(3); Z(4); Z(5); Z(6); Z(7); Z(8);
Z(9); Z(10); Z(11); Z(12); Z(13); Z(14); : PRINT USING "###.###"; VD
TIM = 0
1820 NEXT J
REM ***** CUANDO EL VOLUMEN DE MATERIA ES MENOR AL MINIMO ADMITIDO
TERMINA*****
IF VD > VF THEN 680
REM ***** IMPRIME OTROS VALORES DE INTERES *****
1860 PRINT
PRINT "Velocidad de la corriente ascendente "; VS
PRINT "Velocidad de caída de las partículas "; VC
PRINT "Intervalo de tiempo "; DT
PRINT "Tiempo que dura cada etapa"; TC
PRINT "Tiempo total empleado"; T
PRINT "Número de etapas"; NS
PRINT "Volumen de agua requerida"; VW
PRINT "Volumen final de partículas"; VD
PRINT "Volumen de partículas que salió del filtro"; VDI - VD

```

```
PRINT
PRINT
VTEO = VDI - VD
VREAL = VTEO * .1 * 3.1415927#
PRINT "Volumen de partículas en el modelo real="; VREAL
WREAL = VW * .1 * 3.1415927#
PRINT "Volumen de agua en el modelo real="; WREAL
COSTO = (VREAL * 460) + (WREAL * 1.5)
PRINT "Costo total del lavado"; COSTO
PRINT
PRINT
END
```

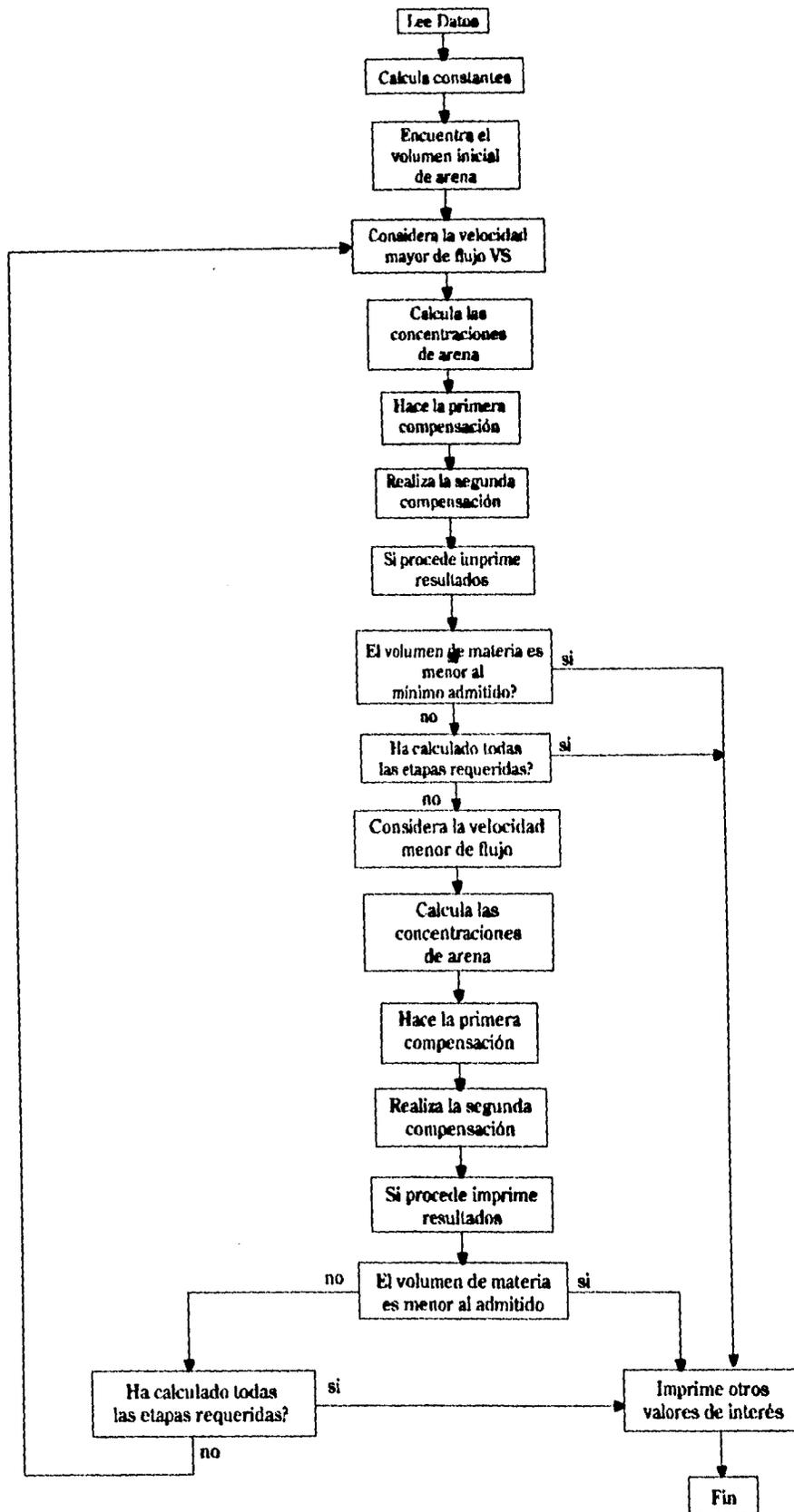


FIGURA IIIb. DIAGRAMA DE BLOQUES Y LISTADO (ARENA)

ANEXO IV

CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO

A) SOLUBILIDAD

La solubilidad del medio filtrante se determina en ácido clorhídrico. En seguida se menciona el equipo a utilizar y su respectivo procedimiento:

EQUIPO:

- Estufa
- Matraces
- Balanza analítica

PROCEDIMIENTO:

- Se lava una muestra de 10 g con agua destilada, se seca a 103 °C en la estufa durante 24 horas y se pesa.
- Se sumerge la muestra en la solución HCl al 30% (en volumen), diluyendo 4 volúmenes de HCl en 10 de agua destilada.
- Se deja reposar la muestra 24 horas, entre 18 y 20 °C.
- Se seca, se lava con agua destilada, se seca y se pesa nuevamente.

CALCULO:

$$\% \text{ Solubilidad} = \frac{\text{Pérdida de peso}}{\text{Peso original}} \times 100$$

La arena debe tener una solubilidad menor del 5 % y la antracita no debe tener ninguna o despreciable.

B) IGNICIÓN

EQUIPO:

- Balanza analítica.
- Cápsula de porcelana.
- Mulla.
- Deshacedor.

PROCEDIMIENTO:

- Se pone a peso constante una cápsula de porcelana colocándola en la mufla a 700 °C.
- Se lava y seca 20 g de muestra.
- Se coloca en la cápsula y se pesa.
- Se mete a la mufla durante 1 hora a 700 °C.
- Se enfría en el desecador hasta temperatura ambiente y se pesa nuevamente.

CALCULO:

$$\% \text{ Pérdida por ignición} = \frac{\text{Pérdida de peso}}{\text{Peso original}} \times 100$$

DENSIDAD

C) DENSIDAD REAL

EQUIPO:

- Balanza analítica.
- Cápsula de porcelana.
- Matraz aforado.
- Mufla

PROCEDIMIENTO:

- Se lava la muestra y se seca a 130 °C durante 24 horas. Se pesa una cantidad de arena (pa) y se hierve en 100 ml de agua destilada durante 5 min, con el fin de expulsar el aire retenido dentro de los poros.
- Se pesa un matraz aforado (pm).
- Se enfría la muestra y se introduce al matraz, se afora con agua destilada y se vuelve a pesar (pf).

CÁLCULOS:

$$\text{Peso del agua} = pf - pm - pa$$

$$\text{Volumen del agua} = \frac{\text{Peso del agua}}{\text{Densidad del agua}}$$

$$\text{Volumen de la muestra (vm)} = \text{Volumen aforado (va)} - \text{Vol del agua}$$

$$\text{Densidad } \rho = \frac{pa}{vm}$$

D) DENSIDAD APARENTE**EQUIPO:**

- Balanza analítica.
- Cápsula de porcelana.
- Probeta graduada.
- Muffa.

PROCEDIMIENTO:

- La muestra se lava y se seca a 130 °C durante 24 horas.

- Se enfría la muestra y se introduce a una probeta graduada, se agita y se deja la muestra asentar en su forma natural, si es necesario, se dan dos pequeños golpes en el fondo para que la arena asiente. Se mide el volumen (v_m),
- Se pesa la cantidad de arena contenida en ese volumen (p_a).

CÁLCULOS:

$$\text{Densidad Aparente} = \frac{p_a}{v_m}$$

E) POROSIDAD

La porosidad del lecho filtrante debe determinarse de manera que sea indicativa de la que existe realmente en los filtros. Desgraciadamente esta porosidad en la práctica no es constante, sino que cambia con la velocidad de lavado y con la de sedimentación de las partículas cuando se suspende el flujo ascensional. Se considera que varía entre 42-44 % para arena y entre 50-55% para antracita. Existen dos métodos para analizarla: el de Hulbert y Feben y el de Baylis (3).

EQUIPO:

- Balanza analítica.
- Tubo de Jackson de 0.75 m de largo, con diámetro de 2.8 cm
- Mufla.

PROCEDIMIENTO: (Hulbert y Feben)

- a) Colocar 150 g de arena en un tubo de Jackson de 0.75 m de largo, 2.8 cm de diámetro y llenarlo hasta la mitad con agua. La muestra debe haberse lavado previamente para eliminar toda la tierra o el polvo que puede contener.
- b) Agitar a fin de extraer el aire.
- c) Si el agua está turbia, decantar repetidamente hasta que se clarifique.

- d) llenar el tubo completamente con agua y colocarle un tapón de goma de modo que no quede burbujas de aire adentro.
- e) Rotar el tubo rápidamente 180 °C.
- f) Cuando la arena se sedimente en el fondo del tubo, rotarlo de nuevo rápidamente 180 °C y colocarlos en un soporte a fin de que permanezca verticalmente y sin perturbaciones.
- g) Marcar en el tubo con un lápiz especial, el borde superior de la arena.
- h) Remover la arena y el agua del tubo.
- i) Añadir agua hasta la marca que se hizo en el tubo y medir este volumen en un cilindro graduado.

La porosidad en porcentaje será igual a:

$$P = \frac{\text{Volumen de vacíos}}{\text{Volumen de la muestra}} \times 100$$

El volumen de vacíos se obtiene por la diferencia entre el volumen medido en el cilindro graduado (Volumen total) menos el volumen de la muestra (peso de la muestra, 150 g dividido por su peso específico).

PROCEDIMIENTO DE BAYLIS:

La objeción de Baylis al método anterior es que la de que no se tiene en cuenta la profundidad real del lecho y que en consecuencia no representa la porosidad que existe en el filtro. Se sugiere por eso:

- a) Colocar suficiente muestra del material granular en un tubo de plástico o vidrio (2" de diámetro) como para que alcance una altura de 60 cm (24"), o alrededor de 1.000 g de arena ó 600 g de antracita. La muestra debe ser previamente desecada y pesada.
- b) Este medio filtrante se lava con flujo ascendente hasta producir una expansión del 50% y luego se deja asentar lentamente.

c) Se procede en seguida con los pasos del caso anterior g, h, i.

La porosidad será hallada en forma similar con 1 a 2 % menor que la encontrada con el método de Hulbert y Feben.

ANEXO V

DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS

MATERIAL:

- **Filtros de 0.5 GFA.**
- **Equipo de millipore de filtración.**
- **Capsulas de porcelana**
- **Mufla.**
- **Desecador**
- **Balanza analítica**
- **Pipeta volumétrica.**
- **Probeta.**

PROCEDIMIENTO:

1. Tomar un filtro 0.5 GFA con pinzas y colocarlo en el equipo de millipore de filtración al vacío.
2. Lavar mínimo tres veces con 20 ml de agua destilada.
3. Colocar el filtro en una capsula de porcelana e introducirlo en la mufla a una temperatura de $550\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, por un período de de 30 minutos.
4. Retirar el filtro de la mufla y enfriarlo en el desecador por 30 minutos.
5. Pesar el filtro en una balanza analítica obteniendo el peso 1.
6. Colocar el filtro a peso constante en el equipo de millipore y humedecerlo con agua destilada y posteriormente adicionar una alícuota de 50 ml medidos con una pipeta volumétrica; en el caso de presentar una muestra muy espesa medirlo en una probeta al menos 10 ml.

7. Retirar el filtro con la muestra en una charola de aluminio y colocarlo en la estufa a una temperatura de 103 °C por una hora.
8. Sacar y enfriar en un desecador por media hora y pesarlo en una balanza analítica obteniendo el peso 2.
9. Obtenido el peso 2, colocar el filtro en la mufla a 550 °C ± 50 °C por media hora.
10. Sacar y dejar enfriar por media hora. Después pesar obteniéndose el peso 3.

CALCULOS:**Para obtener SST**

$$SST = (P_2 - P_1 / (\text{volumen de muestra})) \cdot 1 \times 10^6$$