

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **CARACTERIZACIÓN DE REVOQUES FORMADOS UTILIZANDO MEZCLAS MONOMODALES AMPLIAS**

TUTORES ACADÉMICOS: Prof. Leandro Lezama  
Prof. José Sorrentino

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de  
Venezuela para optar al Título  
de Ingeniero Químico  
por la Br. Silva Castillo Silvia

Caracas, Marzo 2001

Silva C., Silvia M.

## CARACTERIZACIÓN DE REVOQUES FORMADOS UTILIZANDO MEZCLAS MONOMODALES AMPLIAS

**Tutor Académico: Prof. Leandro Lezama, Prof. José Sorrentino. Tesis. Caracas,  
U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química. Año 2001, 153 p.**

**Palabras Claves:** Revoque, Distribución del tamaño de partícula,  
permeabilidad, porosidad, Ley de Darcy.

**Resumen.** Durante la operación de perforación de pozos en el proceso de producción de petróleo, se inyecta, a través de la mecha o barrena un fluido de perforación o lodo que debe cumplir con la función de producir una capa delgada de sólidos en las paredes del yacimiento denominada revoque, la cual debe ser impermeable y formarse de la manera más rápida posible, de forma tal de impedir la penetración excesiva de sólidos y líquidos a los poros de la filtración.

El objetivo principal que se desarrolló en este estudio fue la determinación de las características tales como la permeabilidad y porosidad de los revoques obtenidos mediante la filtración de lodos formulados con mezclas monomodales amplias de granulometría controlada de carbonato de calcio Intecarb en sus diversos grados.

La formación de los revoques se llevó a cabo a un diferencial de presión de 500 psi y una temperatura de aproximadamente 30°C. A igual condiciones de T y P, se realizó la permeación de la torta obtenida con la finalidad de estimar su permeabilidad.

Se generaron un total de 7 mezclas a partir de las fracciones estrechas obtenidas de los procesos de clasificación centrífuga y tamizado vía húmeda de los diversos grados del carbonato Intecarb. Los revoques obtenidos a partir de estas mezclas se compararon en términos de su permeabilidad y porosidad en función del tamaño  $D_{3,2}$ , con los obtenidos a partir de las bases provenientes del proceso de tamizado vía seca.

La formación del revoque se llevó a cabo en una celda de filtración de alta presión y alta temperatura, en dos etapas claramente diferenciadas, una etapa inicial denominada etapa incipiente y una final denominada etapa darcyana, ya que sigue la Ley de Darcy, los datos de filtración se presentan de manera lineal, tal como lo propone dicha teoría de la

filtración. La segunda etapa ofrece una resistencia alrededor del 80% de la resistencia global, mientras que la primera solo ofrece una resistencia del 20% sobre la global, por lo que la etapa incipiente es mucho más permeable que la etapa darcyana.

Los datos de filtración se representaron en un gráfico tiempo sobre volumen contra tiempo, donde los valores de tiempo y volumen corresponden a los de la etapa darcyana, para ello el punto origen en la curva  $t/V$  vs  $V$  se traslada horizontalmente la cantidad  $t_0$ , y verticalmente la cantidad  $V_0$ , valores correspondientes al tiempo y volumen inicial de la etapa darcyana, convirtiéndose en un gráfico  $t'/V'$  vs  $V'$  siendo  $t'$  equivalente a  $t$  menos  $t_0$  y  $V'$  a  $V$  menos  $V_0$ , de tal manera que la nueva gráfica generada es una línea recta, cuya pendiente está relacionada directamente con la permeabilidad en esa zona.

La porosidad se calcula a partir de la masa y la altura del revoque, pero este último parámetro introduce mucha incertidumbre, puesto que se emplea una altura promedio para los cálculos que se estima a partir de mediciones experimentales, las cuales que presentaron coeficientes de variabilidad de hasta un 40%. Por lo tanto la porosidad calculada también representa un promedio, por lo que dichos valores no deben ser tomados como fiables. Debido a esto se recomienda aplicar métodos adecuados para medir de manera reproducible la altura del revoque.

Los revoques que presentaron las mejores características, fueron los obtenidos a partir de las bases, generadas por el tamizado vía seca, presentaron la menor pérdida de volumen de filtrado, el menor tiempo incipiente  $t_0$ , la menor porosidad y permeabilidad. Los revoques obtenidos mediante las fracciones estrechas presentaron un tiempo incipiente diez veces mayor, reflejado en una pérdida considerable de volumen de filtrado y altas permeabilidades. Este comportamiento se puede adjudicar en parte al hecho de que las mezclas diseñadas no contenían tamaños menores a  $1.3 \mu\text{m}$ , puesto que se pierden durante el proceso de clasificación centrífuga. Estas partículas denominadas ultrafinos representan la fracción sellante en el proceso de formación del revoque, de allí la razón de la obtención de tiempos incipientes tan largos, por lo tanto se recomienda la aplicación de métodos de clasificación apropiados para la obtención de dichas fracciones.

Se recomienda realizar pruebas sobre núcleos porosos de manera de poder obtener datos reproducibles sobre la etapa incipiente, de la cual todavía existe gran incertidumbre.

## Índice

	Página
Lista de Figuras .....	VIII
Lista de Símbolos .....	XII
Lista de Tablas .....	XVI
1 Introducción .....	1
2 Objetivos .....	3
3 Planteamiento del problema .....	4
4 Revisión Bibliográfica .....	5
4.1 Perforación Petrolera .....	5
4.2 Lodos de perforación .....	8
4.2.1 Composición de los lodos de perforación .....	9
4.2.2 Propiedades de los lodos de perforación .....	11
4.2.2.1 Densidad .....	11
4.2.2.2 Reología .....	13
4.3 Formación del revoque .....	16
4.4 Daño a la formación .....	20
4.5 Fundamentos de filtración .....	22
4.5.1 Flujo de fluido a través de un medio poroso .....	23
4.5.2 Permeabilidad .....	25
4.5.3 Torta de Filtración .....	27
4.5.3.1 Masa de torta depositada por Unidad de Área y Resistencia Específica .....	30
4.5.3.2 Concentración de sólidos .....	31
4.5.4 Ecuación fundamental de formación de la torta .....	34
4.5.4.1 Filtración a presión constante .....	34
4.5.5 Efectos de la presión sobre el revoque .....	36
4.5.6 Métodos para la determinación de la Resistencia Específica .....	41
4.5.6.1 Método de formación de la torta .....	41
4.5.6.1.1 Método Lineal .....	42

4.5.6.1.2 Método Cuadrático .....	42
4.5.6.2 Método de Permeación de la torta .....	42
4.6 Análisis del tamaño de partículas .....	43
4.6.1 Descripción del tamaño de partícula .....	43
4.6.2 Medidas de tendencia central .....	45
4.6.3 Métodos de medición del tamaño de partículas .....	48
4.6.3.1 Tamizado .....	49
4.6.3.2 Difracción láser .....	50
5 Antecedentes .....	51
6 Equipo Experimental .....	57
6.1 Tamizador oscilatorio .....	57
6.2 Clasificador Centrífugo .....	58
6.3 Tamizador vibratorio .....	59
6.4 Analizador de tamaño de partículas. Mastersizer 2000 .....	60
6.5 Medidor de pH .....	61
6.6 Agitadores .....	62
6.7 Equipo de filtración estática: celda HPHT.....	63
6.8 Balanza con desecador infrarrojo .....	65
6.9 Divisor de muestras PT 1000 .....	66
6.10 Micrómetro .....	67
7 Procedimiento Experimental .....	68
7.1 Tamizado vía seca .....	68
7.2 Clasificador centrífugo .....	68
7.3 Tamizado vía húmeda .....	70
7.4 Diseño y Simulación de mezclas .....	71
7.5 Preparación de mezclas .....	71
7.6 Medición de la distribución del tamaño de partícula .....	72
7.7 Preparación del lodo de perforación .....	72
7.8 Resistencia del medio limpio .....	74
7.9 Filtración del lodo .....	75
7.10 Permeación del revoque .....	76

7.11 Uso del desecador infrarrojo.....	76
8 Metodología .....	78
9 Plan de experiencias .....	80
10 Descripción de Mezclas .....	82
11 Análisis de Datos .....	87
11.1 Distribución del tamaño de partícula de las mezclas diseñadas .....	87
11.2 Volumen de filtrado .....	89
11.2.1 Volúmenes de filtrado obtenidos para las bases y la mezcla 1 .....	89
11.2.2 Volúmenes de filtrado obtenido para las mezclas diseñadas .....	90
11.3 Altura del revoque .....	91
11.4 Masa del revoque .....	92
12 Discusión de Resultados .....	93
12.1 Comparación de los revoques formados a partir de los lodos formulados por las diferentes bases y la mezcla1.....	93
12.1.1 Porosidad global .....	94
12.1.2 Permeabilidad global .....	95
12.1.3 Movilidad de la etapa darcyana- Permeabilidad darcyana .....	96
12.2 Comparación de los revoques formados a partir de los lodos formulados por las diferentes bases y sus respectivas mezclas reconstituidas .....	100
12.3 Comparación de los revoques formados a partir de los lodos formulados por las mezclas 5 a la 8 y la base 4 .....	107
12.4 Etapas de formación del revoque .....	108
12.5 Análisis de la curva de filtrado .....	112
12.6 Comparación del rango de magnitud de la permeabilidad con el obtenido mediante la ecuación de Carman-Kozeny .....	115
13 Conclusiones .....	116
14 Recomendaciones .....	119
15 Bibliografía .....	120
Apéndices	
A.1 Cálculos tipos .....	123
A.2 Distribución del tamaño de partícula de las mezclas .....	139

A.3 Curvas de Filtración .....	144
A.4 Alturas de los revoques .....	150
A.5 Masas obtenidas para los revoques .....	152
A.6 Análisis de sensibilidad de la porosidad .....	153

## *Lista de Figuras*

Figura	Página
4.1 Equipo de perforación Rotatoria .....	7
4.2 Recorrido del lodo de perforación .....	8
4.3 Goma Xhantana .....	12
4.4 Tipos de fluidos .....	15
4.5 Reograma de un lodo de perforación .....	16
4.6 Filtración del lodo a través de la formación .....	17
4.7 Daños a la formación .....	21
4.8 Pegado Diferencial .....	22
4.9 Diagrama esquemático de un medio poroso .....	23
4.10 Relación proporcional entre la caída de presión y la tasa de flujo a través del medio poroso estable .....	24
4.11 Ilustración esquemática del medio filtrante y el revoque .....	27
4.12 Decaimiento de la tasa de filtrado a presión constante .....	29
4.13 Relación proporcional entre el revoque y el volumen de filtrado .....	30
4.14 Resistencia Específica .....	32
4.15a Gráfica de la ley modificada de proporción parabólica para mostrar el efecto de las tortas incompresibles .....	37
4.15b Gráfica de la ley modificada de proporción parabólica para mostrar el efecto de las tortas compresibles .....	37
4.16 Gráfica de la ley modificada de proporción parabólica mostrando la intercepción negativa para una torta compresible .....	38
4.17 Variación logarítmica de la resistencia específica con la presión .....	40
4.18 La Moda, la Mediana y la Media de una distribución de tamaño .....	46
4.19 Curva de distribución de frecuencias acumuladas .....	47
4.20 Comparación entre las medidas de tendencia central .....	49
6.1 Tamizador oscilatorio. Tamizado vía seca .....	57
6.2 Clasificador centrífugo .....	58



6.3	Tamizador vibratorio. Tamizado vía húmeda .....	60
6.4	Mastersizer 2000 .....	61
6.5	Medidor de pH .....	62
6.6a	Agitador de alta revolución .....	63
6.6b	Agitadores de baja revolución .....	63
6.7	Equipo de filtración estática .....	64
6.8	Celda HPHT .....	65
6.9	Balanza con desecador infrarrojo .....	66
6.10	Divisor de muestras .....	67
7.1	Curva de calibración del clasificador centrífugo .....	70
10.1	Distribución del tamaño de partículas para las bases .....	83
10.2	Distribución del tamaño de partículas (DTP) para las fracciones estrechas ..	83
10.3	DTP de las bases y sus mezclas reconstituidas .....	84
10.4	Zoom de las DTP de las bases y sus mezclas reconstituidas .....	85
10.5	DTP de las mezclas 5, 6, 7 y 8 .....	85
11.1	Comparación de la DTP obtenida de las mezclas diseñadas y las arrojadas por Mastersizer 2000, a) mezclas 2, 4, 7 y 8, b) mezclas 3, 5 y 6 .....	88
11.2	Distribución del tamaño de partícula en función de la densidad de frecuencias .....	88
12.1	Influencia del tamaño $D_{3,2}$ en la porosidad del revoque para las bases y la mezcla1 .....	94
12.2	Influencia del tamaño $D_{3,2}$ en la porosidad del revoque para las bases y la mezcla1. Corrección de desviaciones .....	95
12.3	Influencia del tamaño $D_{3,2}$ en la permeabilidad del revoque para las bases y la mezcla1 .....	96
12.4	Influencia del tamaño $D_{3,2}$ en la movilidad del revoque para las bases y la mezcla1 .....	97
12.5	Influencia del tamaño $D_{3,2}$ en la permeabilidad de la etapa darcyana del revoque para las bases y la mezcla1 .....	98
12.6	Influencia del tamaño $D_{3,2}$ en el producto permeabilidad-solidosidad de la etapa darcyana del revoque para las bases y la mezcla1 .....	99

12.7	Influencia del tamaño $D_{3,2}$ en las características del revoque formado a partir de las bases y la mezcla 1 .....	100
12.8	Volumen de filtrado a los treinta minutos para la mezcla 1 y la mezcla 2 ....	101
12.9	Influencia del tamaño $D_{3,2}$ en las características del revoque formado a partir de la mezcla 1 y mezcla 2 .....	102
12.10	Volumen de filtrado a los treinta minutos para la base 3 y la mezcla 3 .....	103
12.11	Influencia del tamaño $D_{3,2}$ en las características del revoque formado a partir de la Base 3 y la mezcla 3 .....	103
12.12	Volumen de filtrado a los treinta minutos para la base 4 y la mezcla 4 .....	104
12.13	Influencia del tamaño $D_{3,2}$ en las características del revoque formado a partir de la base 4 y la mezcla 4 .....	104
12.14	Influencia del tamaño $D_{3,2}$ en las características de los revoques formados a partir de las mezclas 2, 3 y 4 .....	106
12.15	Influencia del tamaño $D_{3,2}$ en las características de los revoques formados a partir de las mezclas 5, 6, 7 y 8 .....	107
12.16	Influencia del tamaño $D_{3,2}$ en la porosidad del revoque incipiente formado a partir de las mezclas preparadas con las fracciones estrechas .....	109
12.17	Influencia del tamaño $D_{3,2}$ en la permeabilidad del revoque incipiente formado a partir de las mezclas preparadas con las fracciones estrechas .....	109
12.18	Influencia del tamaño $D_{3,2}$ en el producto permeabilidad-porosidad de la etapa incipiente del revoque formado a partir de las mezclas preparadas con las fracciones estrechas .....	109
12.19	Contribución porcentual de la etapa incipiente a la resistencia global y a la cantidad de revoque formado, a) para las bases y la mezcla 1, b) para las mezclas 2 a la 8 .....	110
12.20	Contribución porcentual de la zona darcyana a la resistencia global y a la cantidad de revoque formado, a) para las bases y la mezcla 1, b) para las mezclas 2 a la 8 .....	111
12.21	Curvas de filtración obtenidas para la base 4 .....	113
12.22	Curvas de filtración para la base 4, transformadas según ecuación 4.27 .....	113
12.23	Curvas de filtración para la base 4, transformadas según $t_0$ , $V_0$ .....	114

A.1.1	Gráfica V vs t .....	123
A.1.2	Permeación del medio filtrante .....	124
A.1.3	Gráfico $t'/V'$ vs $V'$ .....	127
A.1.4	Gráfico V vs t para el proceso de permeación del revoque .....	128
A.1.5	Variación del factor de corrección $\zeta$ con la solidosidad ( $\epsilon_s$ ) .....	134
A.3.1	Curvas de filtración para la Base 1 .....	144
A.3.2	Curvas de filtración para la Base 2 .....	144
A.3.3	Curvas de filtración para la Base 3.....	145
A.3.4	Curvas de filtración para la Base 4.....	145
A.3.5	Curvas de filtración para la Mezcla 1.....	146
A.3.6	Curvas de filtración para la Mezcla 2.....	146
A.3.7	Curvas de filtración para la Mezcla 3.....	147
A.3.8	Curvas de filtración para la Mezcla 4.....	147
A.3.9	Curvas de filtración para la Mezcla 5.....	148
A.3.10	Curvas de filtración para la Mezcla 6.....	148
A.3.11	Curvas de filtración para la Mezcla 7.....	149
A.3.12	Curvas de filtración para la Mezcla 8.....	149

## *Lista de Símbolos*

---

### Símbolo

A	Área transversal del lecho ( $L^2$ )
a	Pendiente de la curva $t/V$ vs $V$ ( $\theta/L^6$ )
a'	Pendiente de la curva $t'/V'$ vs $V'$ ( $\theta/L^6$ )
b	Punto de corte en la gráfica $t/V$ vs $V$ ( $\theta/L^3$ )
b'	Punto de corte en la gráfica $t'/V'$ vs $V'$ ( $\theta/L^6$ )
$C_{av}$	Concentración promedio ( $M/L^3$ )
$C_{wv}$	Concentración de masa de sólidos por unidad de volumen ( $M/L^3$ )
$C_0$	Constante empírica de la ecuación 4.39 (Adim)
CV	Coefficiente de variabilidad (%)
$D_{3,2}$	Tamaño promedio (L)
$dV/dy$	Velocidad de deformación ( $\theta^{-1}$ )
$h_c$	Altura de la torta (L)
K	Permeabilidad ( $L^2$ )
k	Parámetro de la ecuación de potencias ( $M/L\theta$ ), ecuación 4.3
$K_D$	Permeabilidad darcyana ( $L^2$ )
$K_I$	Permeabilidad incipiente ( $L^2$ )
$K_g$	Permeabilidad global ( $L^2$ )
$K_m$	Permeabilidad del medio filtrante ( $L^2$ )
M	Masa del filtrado (M)
m	Proporción de humedad de la torta (Adim)
$M_{LS}$	Masa de líquido en la suspensión original (M)
$m_{CD}$	Masa de revoque depositado en la etapa darcyana por unidad de área ( $M/L^2$ )
$m_{CI}$	Masa de revoque depositado en la etapa incipiente por unidad de área ( $M/L^2$ )
$m_{CG}$	Masa de revoque por unidad de área ( $M/L^2$ )
$m_S$	Masa de sólidos secos en la torta por unidad de área ( $M/L^2$ )
$M_R$	Masa del revoque (M)
$M_S$	Masa de sólidos secos en la torta (M)

$M_{SS}$	Masa de sólidos en la suspensión original (M)
$n$	Parámetro de la ecuación 4.3 (Adim)
$n'$	Constante empírica de la ecuación 4.38 (Adim)
$n''$	Constante característica del material (Adim), ecuación 4.59
$P_0$	Constante empírica ecuación 4.38 y 4.39 ( $M/L\theta^2$ )
$\Delta p$	Caída de presión ( $M/L\theta^2$ )
$\Delta p_c$	Caída de presión a través de la torta ( $M/L\theta^2$ )
$\Delta p_m$	Caída de presión a través del medio filtrante ( $M/L\theta^2$ )
$Q$	Caudal de líquido ( $L^3$ )
$q$	Velocidad de flujo instantánea ( $L^3/\theta$ )
$q_0$	Velocidad de flujo instantánea inicial ( $L^3/\theta$ )
$q_a$	Caudal de agua ( $L/\theta$ )
$q_g$	Caudal de goma Santana ( $L/\theta$ )
$r$	Parámetro de la ecuación 4.61 (Adim)
$r_c$	Resistencia específica de la torta ( $L^{-2}$ )
$R_{CD}$	Resistencia de la zona darcyana ( $L^{-1}$ )
$R_{CI}$	Resistencia de la zona incipiente ( $L^{-1}$ )
$R_{CG}$	Resistencia global ( $L^{-1}$ )
$R_M$	Resistencia del medio filtrante ( $L^{-1}$ )
$s$	Fracción másica de sólidos (Adim)
$s'$	Parámetro de la ecuación 4.61 (Adim)
$S_v$	Área de superficie específica por unidad de volumen ( $L^2/L^3$ )
$t$	Tiempo ( $\theta$ )
$U$	Velocidad superficial ( $L/\theta$ )
$u$	Constante empírica de la ecuación 4.39 (Adim)
$U_0$	Velocidad superficial inicial ( $L/\theta$ )
$V'$	Volumen de filtrado en la etapa darcyana ( $L^3$ )
$V_0$	Volumen final de la etapa incipiente ( $L^3$ )
$V_L$	Volumen de filtrado ( $L^3$ )

$V_{SS}$	Volumen de sólidos en la suspensión original ( $L^3$ )
$V_S$	Volumen de la suspensión ( $L^3$ )
$x$	Tamaño de partícula (L)
$x_A$	Diámetro de tamiz (L)
$x_a$	Diámetro de área proyectada (L)
$\bar{x}_a$	Media aritmética (L)
$x_c$	Diámetro perimetral (L)
$\bar{x}_c$	Media cuadrática (L)
$x_{CH}$	Diámetro de máximo contorno (L)
$x_d$	Diámetro de arrastre (L)
$x_F$	Diámetro de Feret's (L)
$x_f$	Diámetro de caída libre (L)
$\bar{x}_g$	Media geométrica (L)
$\bar{x}_h$	Media armónica (L)
$x_M$	Diámetro de Martín (L)
$x_p$	Diámetro de área proyectada (L)
$\bar{x}_q$	Media cuadrática (L)
$x_s$	Diámetro superficial (L)
$x_{SH}$	Diámetro de corte (L)
$x_{St}$	Diámetro de Stokes (L)
$x_{sv}$	Diámetro de superficie-volumen (L)
$x_v$	Diámetro volumétrico (L)
$y'$	Masa de sólidos en la suspensión original entre la masa total de líquido (Adim)
$z$	$\text{Log}(x)$ (L)
$\bar{z}$	Media aritmética de $\log x$ (L)

#### Símbolos griegos

$\alpha_0$	Constante empírica ecuación 4.38 ( $L^{-1}/M$ )
$\alpha_{av}$	Resistencia específica promedio de la torta ( $L^{-1}/M$ )
$\alpha_C$	Resistencia específica de la torta ( $L^{-1}/M$ )

$\alpha_{CD}$	Resistencia específica del revoque incipiente ( $L^{-1}/M$ )
$\alpha_{CI}$	Resistencia específica del revoque darcyano ( $L^{-1}/M$ )
$\alpha_{CG}$	Resistencia específica global ( $L^{-1}/M$ )
$\varepsilon$	Porosidad de la torta (Adim)
$\varepsilon_S$	Solidosidad de la torta (Adim)
$\phi_S$	Concentración de sólidos en la suspensión original (Adim)
$\eta$	Viscosidad aparente ( $M/L\theta$ )
$\kappa$	Parámetro asociado a la torta y al filtrado (Adim)
$\lambda$	Relación entre la densidad del líquido y la densidad del sólido (Adim)
$\mu$	Viscosidad ( $M/L\theta$ )
$\rho$	Densidad del líquido ( $M/L^3$ )
$\rho_s$	Densidad del sólido ( $M/L^3$ )
$\sigma$	Desviación estándar (Adim)
$\sigma_z$	Desviación estándar de $\log x$ (Adim)
$\tau$	Esfuerzo cortante ( $M/L\theta^2$ )
$\tau_0$	Esfuerzo mínimo cortante ( $M/L\theta^2$ )
$\omega$	Masa de torta seca por unidad de volumen de filtrado ( $M/L^3$ )
$\zeta$	Factor de corrección en la Figura A.1.5 (Adim)

## *Lista de Tablas*

---

Tabla	Página
4.1 Lista de definiciones de diámetros de esferas equivalentes .....	44
4.2 Lista de diámetros de círculo equivalente .....	45
4.3 Lista de diámetros estadísticos .....	45
4.4 Tipos de medias .....	48
10.1 Fracciones estrechas.....	82
10.2 Composición de las mezclas diseñadas a partir de las fracciones estrechas..	86
11.1 Volúmenes de filtrado obtenidos para las filtraciones de las bases y la mezcla 1 .....	90
11.2 Volumen de filtrado obtenido para las mezclas diseñadas a partir de las fracciones estrechas .....	91
12.1 Coeficientes de variabilidad para las tres formas de representar la filtración	114
A.2.1 Distribución de tamaños de partículas para las mezclas .....	139
A.4.1 Altura de los revoques obtenidos con las bases .....	150
A.4.2 Altura de los revoques obtenidos con las mezclas .....	151
A.5.1 Masas de los revoques obtenidos .....	152
A.6.1 Sensibilidad de las porosidad a la altura y masa del revoque .....	153



## ***1. Introducción***

---

La etapa de perforación petrolera es determinante en el grado de productividad de un pozo, puesto que durante esta etapa la formación está expuesta a sufrir daños, los cuales reducen significativamente la capacidad de producción.

Un fluido de perforación o “lodo” es una mezcla de sólidos, líquidos y aditivos de cuya preparación y mantenimiento dependen el éxito, la rapidez y seguridad del pozo que se perfora.

Durante la perforación de los pozos petroleros es necesario garantizar que el yacimiento no es invadido en exceso por parte de los líquidos y sólidos presentes en el fluido de perforación. Para ello, se promueve la formación de una capa delgada de material sobre las paredes del yacimiento, denominada revoque.

El revoque se forma por depósito de una torta de sólidos por filtración: en virtud del diferencial de presión existente, los sólidos y líquidos son forzados en la dirección radial del sector del pozo recién perforado, líquido y parte de los sólidos invaden la formación hasta que la torta (revoque) formada es capaz de producir un sello. Los sólidos y líquidos que han invadido el reservorio son uno de los tipos posibles de daño a la formación. La presencia de sólidos y líquidos en los poros del yacimiento afecta negativamente la productividad del pozo en su etapa productora, por lo que se pretende reducir dicha invasión minimizando la permeabilidad del revoque sin enviar una cantidad excesiva de material fino al interior de los poros.

La adición de material sólido al fluido de perforación, constituye una de las maneras más utilizadas para minimizar el daño a la formación. La adecuada caracterización del revoque y la vinculación de sus características con variables de diseño del fluido de perforación (como lo es la granulometría de dichos sólidos sellantes) y con las características del yacimiento (como permeabilidad y distribución de tamaño de poros y

gargantas), permitiría el uso del fluido adecuado a cada yacimiento, lo cual puede aumentar su productividad en la etapa de producción.

A fin de determinar la influencia que tiene la distribución de tamaño de partículas de los sólidos sellantes añadidos al fluido de perforación sobre las características del revoque formado, el Laboratorio de Separaciones Mecánicas (LSM) de la Escuela de Ingeniería Química ha recibido el respaldo de la Comisión Nacional de Investigaciones Petroleras (CONIPET) para llevar a cabo el Proyecto 97003754, del cual forma parte este Trabajo Especial de Grado.

## ***2. Objetivos***

---

### **2.1 Objetivo general**

- 2.1.1 Determinar las características de revoques formados con lodos cuyo material sellante lo constituyen mezclas monomodales amplias de granulometría controlada, preparadas a partir del carbonato de calcio Intecarb en sus diversos grados.

### **2.2 Objetivos específicos**

- 2.2.1 Clasificar el carbonato Intecarb mediante tamizado y aeroclasificación centrífuga, a fin de obtener fracciones estrechas para la preparación de mezclas con tamaño de partículas controlado.
- 2.2.2 Preparar fluidos de perforación de manera reproducible, controlando las principales variables de formulación.
- 2.2.3 Comparar la filtración de los lodos preparados sobre papel de filtro, con la obtenida sobre membranas utilizando celdas HPHT (High Pressure-High Temperature) para formar los revoques a analizar.
- 2.2.4 Caracterizar los revoques mediante la determinación de su permeabilidad y su porosidad.
- 2.2.5 Definir, simular y preparar mezclas monomodales de carbonato de calcio de diferentes características, tomando como base combinación de los carbonatos Intecarb 10-15, 20-25, 30-35 y 40-45.

### ***3. Planteamiento del Problema***

---

La formación del revoque en las paredes de un yacimiento ocurre mediante un mecanismo de filtración basado principalmente en la ley de Darcy, donde el medio filtrante lo constituye el yacimiento y la torta que va creciendo es el revoque.

El LSM-UCV ha desarrollado varios trabajos sobre la influencia de la distribución de tamaño de partículas sobre la permeabilidad de carbonato de calcio en agua y sobre la formación y caracterización de revoques de carbonato de calcio en goma Xhantana.

En ellos se ha mostrado que el uso del tamaño promedio  $D_{3,2}$  y de cierta información sobre la forma de las partículas permiten predicciones razonables de la permeabilidad de la torta. Sin embargo, dicha capacidad de predicción no ha sido lograda aún en el caso de revoques, debido principalmente a la presencia de aditivos viscosificantes que están presentes en los lodos de perforación y que afectan la estructura de la torta. También se ha establecido, que los diferentes principios de medición utilizados para determinar el tamaño de las partículas conducen a tamaños promedios diferentes, por lo que debe tenerse precaución al correlacionar resultados con el tamaño promedio.

Recientemente se ha planteado<sup>(24,25)</sup> que la caracterización de los revoques debe hacerse mediante el concepto de la doble permeabilidad, lo que ha implicado la incorporación de varios elementos nuevos en la filtración de lodos de perforación, que se implementarán en este trabajo para lograr una mejor caracterización de la influencia de la distribución de tamaño de partículas sobre las características del revoque.

Se pretende con este trabajo obtener información sobre las variaciones de permeabilidad y porosidad del revoque formado sobre papel de filtro y sobre membranas, cuando se modifica la distribución de tamaños de las partículas añadidas al lodo como sustancia sellante. Esta información servirá de base para la realización (posteriormente como continuación del proyecto) de pruebas de formación de revoques sobre discos porosos que simulen el yacimiento.

## ***4. Revisión Bibliográfica***

---

### **4.1 Perforación Petrolera**

El petróleo se encuentra alojado en los espacios porosos de las rocas sedimentarias. En algunos tipos especiales de rocas, como las areniscas y las piedras calizas, los espacios porosos son numerosos y están interconectados entre sí, por lo que se dice que la roca es porosa y permeable; este conjunto de rocas recibe el nombre de reservorio, formación o yacimiento. Aunque se ha encontrado petróleo cerca de rocas sedimentarias, las cantidades acumuladas en los yacimientos en forma de trampas subterráneas son las que se explotan comercialmente. <sup>(1)</sup>

En una formación porosa, la presión de los fluidos (petróleo, agua o gas) que ocupan el espacio de los poros, no depende únicamente de la densidad de los mismos y de la profundidad en la formación, sino también de las condiciones geológicas de la misma formación.

Dos tipos de condiciones geológicas afectan la presión de los fluidos en el poro (también llamada presión de poro). En las formaciones presurizadas, normalmente, la presión de poro a una profundidad determinada es consecuencia únicamente del peso del fluido que se encuentra por arriba, por lo que depende solamente de la densidad del fluido y de la profundidad; la estructura que conforman las partículas sólidas de la formación se soporta por ella misma. En cambio, existen formaciones que no están completamente compactadas en una estructura que se soporte por ella misma, por lo que la presión de poro a una profundidad determinada debe ser tal que sea capaz de sostener el peso de alguna parte o de todo el sedimento superior, así como también soportar el peso del fluido que se encuentra por arriba en la formación. Este tipo de formaciones geológicas se dice que son presurizadas anormalmente y se conocen con el nombre de formaciones geopresurizadas. <sup>(2)</sup>

La operación de perforación se lleva a cabo una vez que los geólogos y geofísicos consideran la formación como un sitio favorable para una acumulación de petróleo o

“yacimiento”.

La Figura 4.1 muestra las partes principales de un equipo de perforación rotatoria. La pieza principal del equipo de perforación rotatoria es la barrena o mecha, que tiene como función crear el hoyo mediante el fraccionamiento de la roca que se encuentra en el fondo. La barrena es de acero cortante y se encuentra enroscada en el extremo inferior de una columna rígida de tubos de acero, cuya longitud se aumenta añadiendo nuevos tubos al extremo superior a medida que se profundiza el pozo. La rotación se suministra en la parte superior de la tubería, girando la columna de tubos en cuyo extremo inferior se encuentra la barrena que perfora a través de la tierra. A los trozos de roca de la formación cortados por la barrena se les llama “ripio”.

El equipo rotatorio que perfora la formación está constituido por una mesa rotatoria, un cuadrante (Kelly), la tubería de perforación cuyos tubos individuales son más o menos de nueve metros cada uno, los lastra-barreras (barras), que son unos tubos pesados y bastante gruesos cuyo objetivo es mantener la tubería recta, y, por último, la barrena.

Al mismo tiempo que se perfora, se inyecta a altas presiones por el interior de los tubos un líquido denominado lodo o fluido de perforación, el cual sale por unos agujeros que tiene la barrena y sube por el espacio anular que hay entre el hoyo y la tubería de perforación. Este lodo se emplea para remover los recortes (ripio) del hoyo, enfriar la barrena, prevenir que los fluidos entren a la formación a través de la pared del hoyo y evitar que las paredes del hoyo se derrumben. En la superficie, el lodo y el ripio fluyen hacia una serie de equipos que permiten la separación de los mismos, para luego ser nuevamente inyectado a la tubería de perforación para reiniciar el ciclo. El recorrido del lodo de perforación se muestra en la Figura 4.2.<sup>(1, 3)</sup>

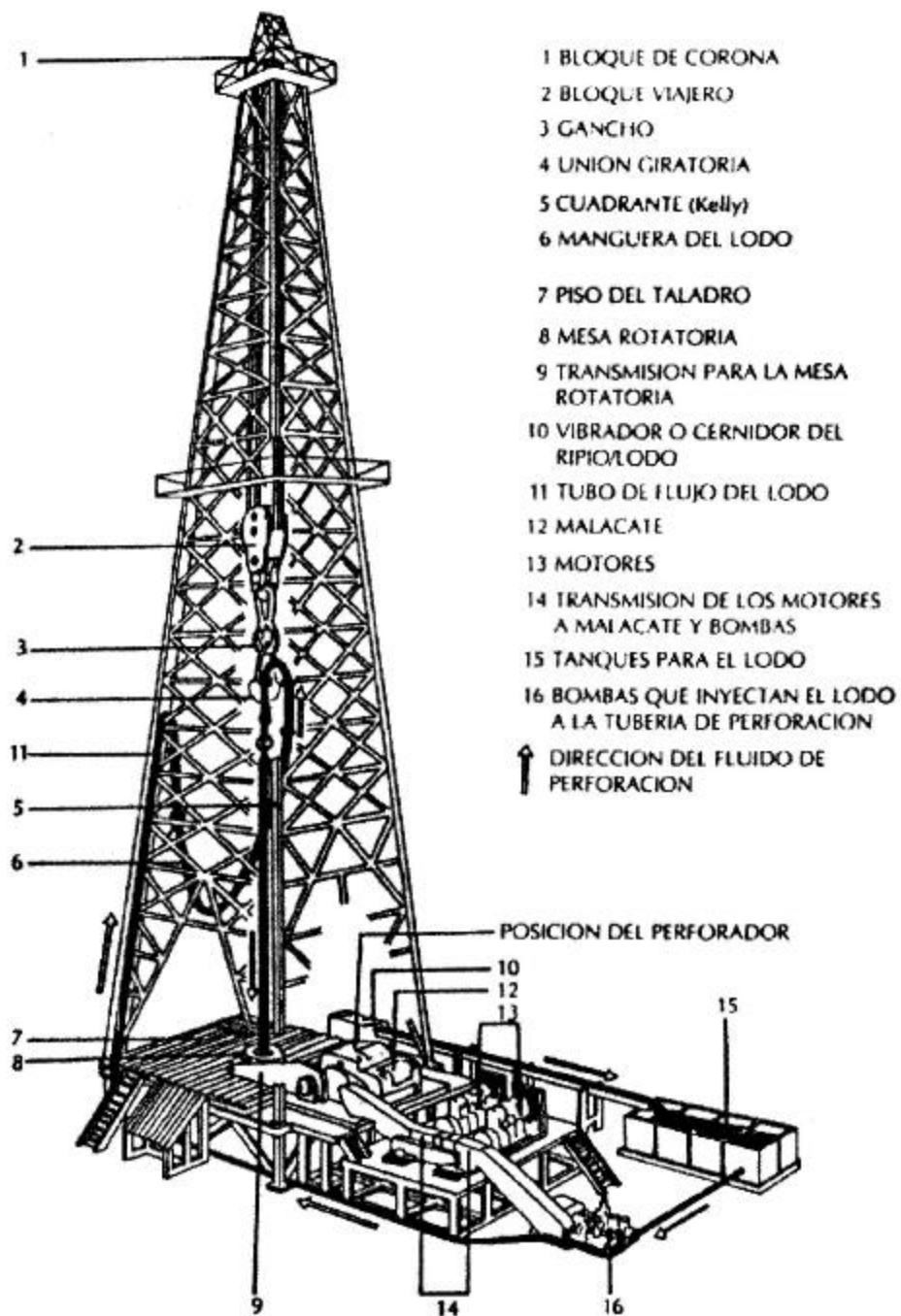


Figura 4.1 Equipo de perforación Rotatoria<sup>(1)</sup>

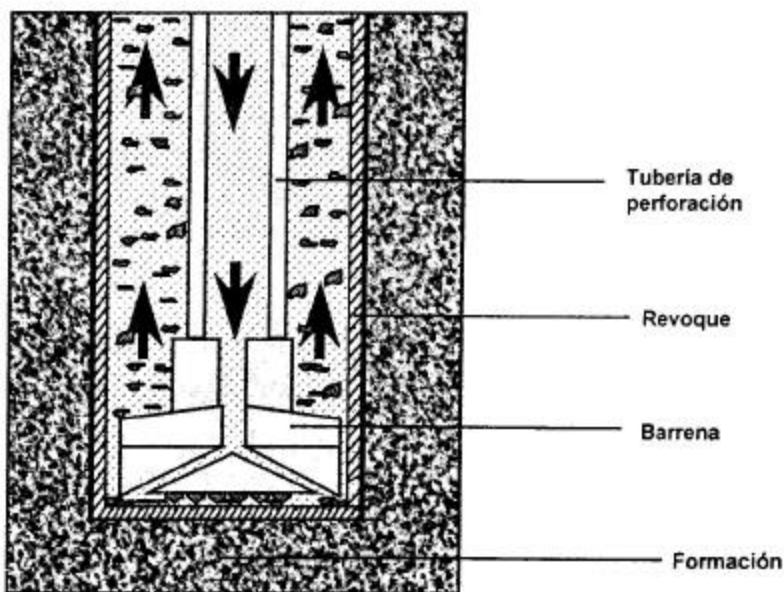


Figura 4.2 Recorrido del lodo de perforación<sup>(1)</sup>

## 4.2 Lodos de perforación

Un fluido de perforación o “lodo” es una mezcla de sustancias químicas en proporciones estudiadas y de cuya preparación y mantenimiento depende el éxito, la rapidez y seguridad del pozo que se perfora.

Entre las funciones más importantes del lodo de perforación se pueden mencionar las siguientes<sup>(1,3)</sup>:

- ★ Remover y transportar el ripio del fondo del pozo hacia la superficie.
- ★ Enfriar y lubricar la barrena y la sarta de perforación.
- ★ Cubrir la pared del hoyo con un revoque liso, delgado, flexible e impermeable.
- ★ Controlar las presiones de las formaciones.
- ★ Mantener en suspensión el ripio y el material que le imparte peso al lodo, cuando se interrumpe la circulación.
- ★ Soportar, por flotación, parte del peso de la sarta de perforación y de las tuberías de revestimiento durante su inserción en el hoyo.



- ★ Mantener en su sitio y estabilizada la pared del hoyo, evitando derrumbes.
- ★ Facilitar la realización de pruebas para la obtención de información acerca de las formaciones perforadas como son, por ejemplo, los registros electrográficos de las paredes del pozo, por medio de una sonda eléctrica que se hace bajar por dentro del lodo.
- ★ El lodo de perforación debe cumplir éstas y otras funciones sin lastimar al personal de perforación o contaminar al medio ambiente y, en especial, sin interferir con la productividad normal de la formación.

#### **4.2.1 Composición de los lodos de perforación**

Un lodo de perforación consiste en un fluido en el que se encuentran suspendidos sólidos y a veces líquidos y gases. Al líquido dispersante se le llama fase continua (o externa) del lodo y a las partículas sólidas suspendidas y/o gotitas de fluido, se les denomina fase discontinua (o interna) del lodo. La composición de un lodo de perforación en particular depende de los requerimientos de las operaciones de perforación que se vayan a ejecutar con dicho lodo. El hoyo debe ser perforado a través de diferentes tipos de formaciones que requieren diferentes tipos de fluidos de perforación <sup>(3,4)</sup>.

Los componentes básicos de un lodo de perforación son:

- ★ La base líquida.
- ★ Los sólidos reactivos.
- ★ Los sólidos inertes.
- ★ Aditivos químicos.

La base líquida puede ser agua o aceite, y éste es el origen de la denominación lodo base agua o lodo base aceite. Existen lodos formados por una emulsión agua-aceite; cuando la fase continua es el agua se consideran como lodos base agua y cuando la fase continua es el aceite se consideran como lodos base aceite. También existen lodos gaseosos, donde el ripio es removido por una corriente de aire o gas natural de alta velocidad.

La fase continua de un lodo base agua contiene sales disueltas ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ). Si la concentración de estos iones en el lodo es alta, se inhibe la hidratación de las arcillas. La concentración de  $\text{OH}^-$  en la fase continua del lodo afecta su alcalinidad y pH. El control óptimo del pH en los lodos de perforación es importante desde el punto de vista de detectar y tratar ciertos contaminantes que puedan estar presentes en el lodo, por lo tanto, el pH debe estar ajustado a determinado valor, el cual depende del tipo de lodo. Por ejemplo, para lodos base agua que contienen bentonita, el pH se debe encontrar entre 8 y 9, y cuando el lodo se contamina con cemento el pH puede aumentar hasta un valor 10 y 11.

La fase discontinua consiste en partículas sólidas y/o gotas de fluido suspendidas en la fase continua o líquida. Las gotas de aceite en un lodo base agua dan viscosidad al lodo y reducen la densidad. El aceite puede entrar a formar parte del lodo a partir de las formaciones perforadas o se puede agregar como un líquido lubricante o reductor de filtrado.

Los sólidos reactivos (a veces denominados fracción coloidal) de un lodo consisten en pequeñas partículas sólidas reactivas. Estos sólidos, por lo general arcillas comerciales, arcillas hidratables y lutitas provenientes de la formación perforada, se hidratan y retienen al líquido de la fase continua del lodo. Estos sólidos son químicamente reactivos, lo que permite el control de las propiedades del lodo (principalmente viscosidad y características de filtración) por medio de la adición de diversos aditivos químicos. Por lo tanto, este tipo de sólidos es sometido a tratamientos químicos para controlar las propiedades de los lodos. En lodos base agua, el agua retenida por las partículas de arcillas empieza a formar parte de la fase discontinua del lodo, y es responsable de la efectividad de las arcillas como agentes viscosificantes.<sup>(3)</sup>

Los otros sólidos en el lodo (barita, piedra caliza, dolomita, arena, sedimentos y otros), son relativamente inertes o no reactivos. La velocidad de penetración y la estabilidad de un lodo tiende a disminuir mientras el porcentaje de sólidos (en volumen) aumenta.

Los agentes densificantes (barita, carbonato de calcio) se agregan para incrementar la

densidad del lodo, que ayuda a controlar la presión de formación y crear el revoque en la pared.

Los agentes viscosificantes (arcillas, polímeros y líquidos emulsificados) se agregan para dar viscosidad al lodo, lo que aumenta su habilidad para limpiar el hoyo. Los dispersantes y defloculantes se pueden agregar para desplazar el sistema, lo que ayuda a reducir la surgencia, el pistoneo y problemas de presión circulante. Las arcillas, polímeros, almidón, dispersantes y materiales asfálticos pueden agregarse para reducir la filtración del lodo a través de la pared del hoyo.<sup>(3)</sup>

Cuando se agrega un polímero en un disolvente la solución se hace muy viscosa. La forma y tamaño de la molécula de polímero afecta la viscosidad, logrando el aumento de la misma a medida que la molécula es más grande y cuanto menos ramificaciones posea el polímero. Un ejemplo de los polímeros utilizados es la goma xantana (*Xanthomas campestris*), generada por microorganismos en carbohidratos. Estos polímeros son de extrema complejidad y de muy alto peso molecular<sup>(2)</sup>. El peso molecular de la goma xantana se estima entre 2 y 50 millones, y su estructura aproximada es la que se muestra en la Figura 4.3.

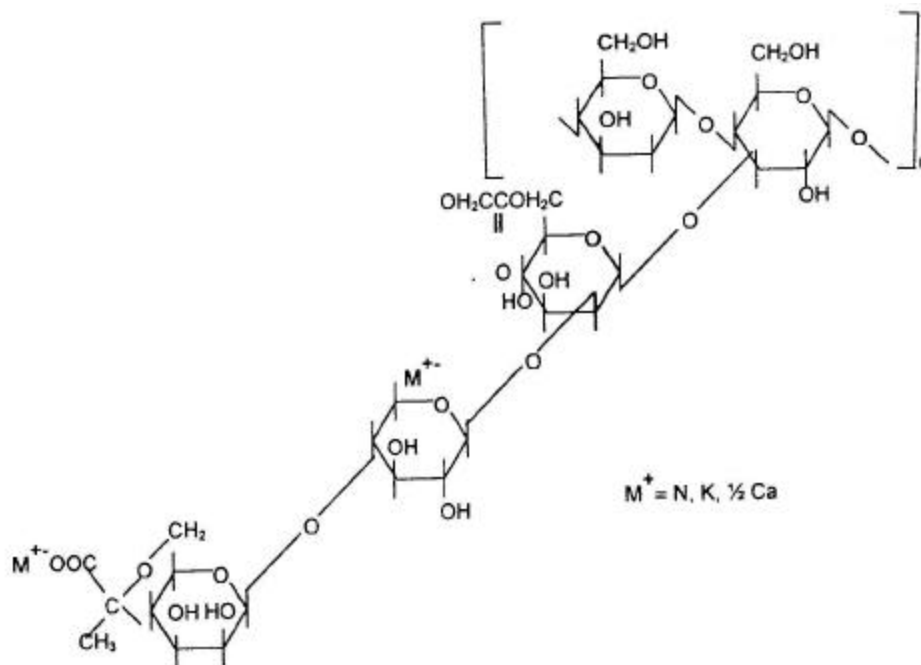
## **4.2.2 Propiedades de los lodos de perforación**

Varias son las propiedades físico-químicas de interés de los fluidos de perforación. Entre las propiedades más importantes se encuentra la densidad, las características reológicas (viscosidad plástica, punto cedente y punto de gelatinización), contenido de arena, contenido de sólidos y líquidos, pH, así como las propiedades de filtración (pérdida de filtrado, espesor del revoque y análisis químico de filtrado).<sup>(5)</sup>

### **4.2.2.1 Densidad**

La presión ejercida por una columna de lodo estática depende tanto de la densidad del lodo como de la profundidad del hoyo. Para prevenir la afluencia de los fluidos de la

formación y para formar un revoque delgado y de baja permeabilidad que cubra las paredes del hoyo, la presión de la columna de lodo debe exceder a la presión de poro (aquella presión ejercida por los fluidos que se encuentran en los poros de la formación) por lo menos en 200 psi. Además de controlar a los fluidos de la formación, la presión de la columna de lodo ayuda a mantener la estabilidad del hoyo. En caso de formaciones plásticas, tales como rocas de sal y arcillas no consolidadas, la presión del lodo es crucial.



**Figura 4.3** Goma Xantana<sup>(6)</sup>

El incremento de la densidad del lodo aumenta el efecto boyante que ejerce sobre el ripio, ayudando al transporte de los mismos a través del espacio anular, pero retardando el asentamiento en la superficie. Muy raramente se justifica un incremento de la densidad del lodo como un medio para mejorar la capacidad de transporte o acarreo del ripio.<sup>(3)</sup>

Para incrementar la seguridad en el pozo, existe una tendencia natural de llevar la densidad del lodo a un valor bastante superior, por encima del que realmente es necesario para controlar los fluidos de la formación, pero esta política tiene serias desventajas. En primer lugar, una densidad excesiva del lodo puede incrementar la presión sobre las paredes del hoyo en tal magnitud, que éste cede por la tensión. Este daño en el hoyo se denomina fractura inducida.<sup>(2)</sup>

Otra desventaja de una densidad excesiva del lodo es su influencia en la velocidad de perforación. Experimentos de laboratorio y experiencia en campo han mostrado que la velocidad de penetración se reduce por la presión de sobrebalance del lodo (el diferencial entre la presión del lodo y la presión del poro cuando se taladra en rocas permeables) y por la presión absoluta de la columna de lodo cuando se taladran rocas de muy baja permeabilidad. Una elevada presión de sobrebalance también incrementa el riesgo de pegado del tubo de perforación<sup>(3)</sup>. Por último, una densidad excesiva del lodo tiene la desventaja de incrementar, en forma innecesaria, el costo del lodo.

#### 4.2.2.2 Reología

La reología es un término amplio, que denota el estudio de la deformación de los materiales, incluyendo los fluidos. Las propiedades reológicas de los lodos de perforación juegan un papel vital en la operación de perforación. Estas propiedades son las principales responsables de la capacidad del lodo para remover el ripio, pero también influyen en el progreso de la perforación en muchos otros aspectos.

La ley de Newton para la viscosidad relaciona el esfuerzo cortante ( $\tau$ ) aplicado con la velocidad de deformación,  $dv/dy$ :

$$\tau = m \frac{dv}{dy} \quad (4.1)$$

Esta relación no es válida para todos los fluidos, por lo tanto, los fluidos se clasifican en newtonianos y no newtonianos, dependiendo de la relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación ( $dv/dy$ ). Los fluidos newtonianos cumplen con la ley de Newton de la viscosidad, por lo que la relación es lineal<sup>(7)</sup>, y al graficar  $\tau$  frente a  $dv/dy$  se obtiene una recta que pasa por el origen de coordenadas, cuya pendiente es la viscosidad del fluido a una cierta temperatura y presión.

Para los fluidos no newtonianos, la relación entre la velocidad de deformación y el esfuerzo de corte viene dada por una variable conocida como “viscosidad aparente” ( $\eta$ ), la cual es función de  $dv/dy$  y se define como el cociente entre el esfuerzo de corte y la tasa de

corte, y representa la pendiente de la recta que se traza entre un punto de la curva y el origen. La viscosidad aparente varía con el esfuerzo de corte y/o con la tasa de corte para fluidos no-newtonianos.

$$\mathbf{h} = \frac{\mathbf{t}}{dv/dy} \quad (4.2)$$

cuando  $\eta$  disminuye al aumentar el gradiente de velocidad ( $dv/dy$ ), el fluido se denomina pseudoplástico; mientras que cuando  $\eta$  aumenta con dicho gradiente se denomina dilatante. Si  $\eta$  resulta ser independiente del gradiente de velocidad, el fluido se comporta como newtoniano, y entonces  $\eta = \mu$ .

Esta relación se representa por la ley de potencias:

$$\mathbf{t} = k \cdot \left( \frac{dv}{dy} \right)^n \quad (4.3)$$

donde  $k$  y  $n$  son parámetros de la ecuación de potencia. El valor de  $n$  define el tipo de fluido: si  $n > 1$ , el fluido es dilatante, si  $n < 1$ , es pseudoplástico, mientras que si  $n = 1$ , el fluido es newtoniano.

Se han propuesto otras ecuaciones empíricas o modelos para expresar la relación que existe, en estado estacionario, entre  $\tau$  y  $dv/dy$ . Uno de los modelos más representativos es el modelo de plástico de Bingham, el cual se representa mediante las siguientes ecuaciones:

$$\mathbf{t} = \mathbf{m} \frac{dv}{dy} + \mathbf{t}_0 \quad \text{si } |\mathbf{t}| > \mathbf{t}_0 \qquad \frac{dv}{dy} = 0 \quad \text{si } |\mathbf{t}| < \mathbf{t}_0 \quad (4.4)$$

donde  $\tau_0$  es el mínimo esfuerzo cortante que debe realizarse para que el fluido se mueva, también llamado punto cedente.

Toda sustancia que se comporta según este modelo de dos parámetros se denomina plástico de Bingham. La sustancia permanece rígida mientras el esfuerzo cortante es menor que un determinado valor  $\tau_0$ , por encima del cual se comporta de forma semejante a un fluido newtoniano, cuya viscosidad  $\mu$  es llamada viscosidad plástica.

En la Figura 4.4 se puede observar los comportamientos de las diferentes tipos de sustancias antes descritas.

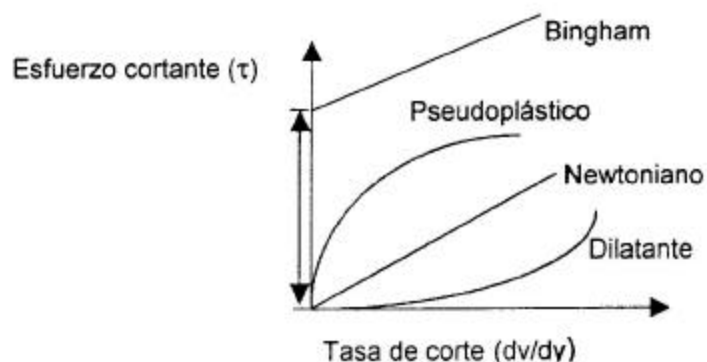


Figura 4.4 Tipos de fluidos<sup>(8)</sup>

Un fluido de perforación se comporta como un cuasi plástico de Bingham, como se puede observar en la Figura 4.5. Se observa que existe un esfuerzo cortante, donde el lodo se comporta como un fluido pseudoplástico en la región donde la velocidad de corte es muy pequeña. Luego, la velocidad aumenta y la curva se comporta como una línea recta. En esta región, se puede decir que el lodo se comporta como un plástico de Bingham, para efectos de simplicidad, si se extrapola la línea recta hasta interceptarla con el eje de las ordenadas.<sup>(8)</sup>

La viscosidad plástica y el punto cedente se pueden determinar midiendo el esfuerzo cortante a diferentes velocidades de deformación o en distintas zonas de la curva, como se muestra en la Figura 4.5. La pendiente de la porción de línea recta de la curva de esfuerzo cortante, representa la viscosidad plástica. Ésta es una medida de la resistencia a fluir causada por la acción de corte del mismo líquido, la fricción mecánica entre los sólidos y el lodo, y la fricción mecánica entre los sólidos y el líquido que los rodea.<sup>(5)</sup>

El punto cedente es el valor que se obtiene al interceptar la curva con el eje de las ordenadas, como se observa en la Figura 4.5. El punto cedente es un indicador de la fuerza de atracción entre partículas y fluido mientras el lodo está en movimiento. Este representa la fuerza que permite llevar el ripio fuera del hoyo. Tanto la viscosidad plástica como el punto cedente son propiedades del lodo cuando está en movimiento.

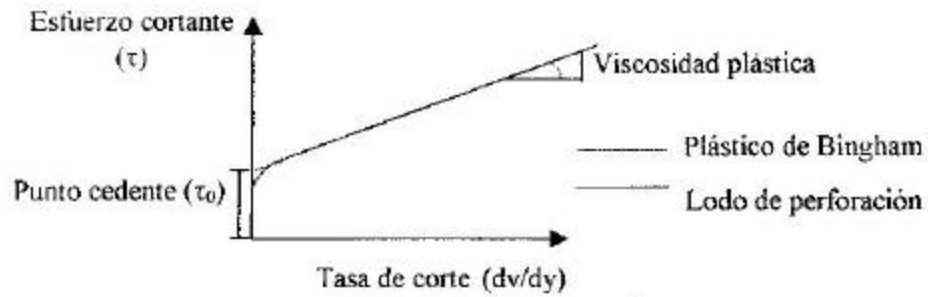


Figura 4.5 Reograma de un lodo de perforación<sup>(8)</sup>

La mayoría de los lodos de perforación exhiben un comportamiento intermedio entre el modelo del plástico de Bingham ideal y el modelo de los fluidos pseudoplásticos. Los lodos de perforación que consisten en polímeros y tienen un contenido pequeño o nulo de sólidos, tienen un comportamiento reológico semejante al fluido pseudoplástico.

La tixotropía es la propiedad que tienen ciertos fluidos a fluir cuando son agitados y regresar a su estado rígido cuando dejan de moverse, se mide mediante la fuerza de gelatinización, la cual es la medida de la atracción física y electroquímica bajo condiciones estáticas<sup>(8)</sup>. Los lodos de perforación se consideran tixotrópicos, lo que indica que cuando no están en movimiento tienden a gelatinizarse. Los valores de la fuerza gel deben ser lo suficientemente altos para permitir la suspensión de los ripios, pero a la vez no tanto como para impedir la recirculación del lodo al colocar el taladro nuevamente en funcionamiento.

### 4.3 Formación del revoque

La filtración de los lodos sobre la superficie porosa del yacimiento es un fenómeno inevitable, debido a que la presión que ejerce la columna de lodo sobre las paredes del hoyo es mayor que la presión de poro de la formación. De esta manera, parte de los sólidos dispersos en el lodo se depositan sobre la pared del hoyo, formando una torta o revoque.<sup>(3)</sup>

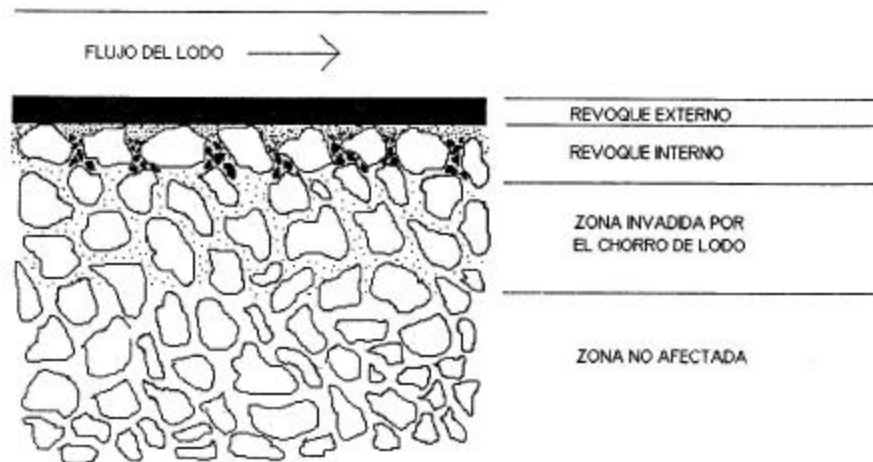
Para que se forme un revoque, es esencial que el lodo contenga algunas partículas cuyo tamaño sea ligeramente menor que el de la abertura de los poros de la formación.



Estas partículas, que son conocidas como “partículas formadoras de puentes”, son atrapadas en la superficie de los poros, mientras que las partículas más finas son, en principio, transportadas a una mayor profundidad en el interior de la formación; su nombre se debe al hecho de que ellas se agrupan en el interior del poro formando una estructura estable, semejante al arco de un puente. El paso de las partículas más pequeñas se impide, progresivamente, a medida que los puentes se forman; cuando los espacios libres existentes entre las partículas que forman los puentes son lo suficientemente pequeños, solamente ocurre el paso de líquido hacia la formación, y todas las partículas sólidas son retenidas, formando el revoque. La suspensión de partículas finas que ingresa a la formación antes y durante el establecimiento de los puentes se conoce como el “chorro de lodo (“mud spurt”); el líquido que entra posterior a la formación de los puentes es el filtrado.<sup>(2)</sup>

Como resultado del proceso antes descrito, se distinguen tres zonas en la formación permeable donde ha ocurrido la filtración del lodo de perforación, como se muestra en la Figura 4.6:

- ★ Un revoque externo sobre las paredes del hoyo.
- ★ Un revoque interno, que se extiende un par de diámetros de grano hacia el interior de la formación.
- ★ Una zona invadida por las partículas finas durante el período del chorro de lodo, la cual se extiende normalmente en un valor aproximado de una pulgada hacia el interior de la formación.



**Figura 4.6** Filtración del lodo a través de la formación<sup>(3)</sup>

Durante la perforación están presentes dos tipos de filtración: la filtración dinámica que ocurre cuando el lodo está circulando y la filtración estática que tiene lugar cuando el lodo está en reposo. La diferencia entre estos dos tipos de filtración radica en que durante la filtración estática la torta se forma libremente sin perturbaciones, mientras que en la filtración dinámica el crecimiento de la torta está limitado por la acción erosiva de la corriente de lodo.

En la perforación de pozos, el “chorro de lodo” puede ser considerable (llegándose incluso a perderse la circulación del lodo en el hoyo), a menos que el lodo contenga partículas del tamaño requerido para formar los puentes en los poros de la formación, y así establecer una base sobre la cual el revoque se pueda formar. Solo partículas de un tamaño determinado relativo al tamaño del poro pueden formar puentes. Partículas más grandes que la abertura del poro no pueden entrar en el mismo, y son arrastradas por la corriente de lodo; partículas considerablemente más pequeñas que la abertura del poro invaden a la formación expuesta; pero las partículas de un cierto tamaño crítico se introducen en las estrechuras de los canales de flujo y forman un puente justo en el interior de los poros. Una vez que se establece el primer puente, sucesivamente las partículas más pequeñas son atrapadas y después sólo líquido filtrado invade a la formación. El período de chorro de lodo es muy breve, cosa de un segundo o dos a lo sumo.

Con respecto al tamaño crítico de partícula requerido para el proceso de formación de puentes, existen dos reglas empíricas: la regla del “1/3” y la relación “ $d^{1/2}$ ”.

La regla del “1/3” establece que el tamaño de los sólidos formadores de puentes debe ser igual o ligeramente mayor que un tercio del tamaño promedio del poro de la formación. La concentración de los sólidos formadores de puentes debe ser, por lo menos, el 5% en volumen de los sólidos en la mezcla final del lodo.

A pesar de que esta regla es apoyada por varios autores, otros sugieren que no se aplica siempre, ya que a velocidades de flujo relativamente bajas, aún partículas más grandes que las establecidas en la regla pero que, a la vez, son más pequeñas que el poro, se pueden introducir en el mismo una después de la otra, sin formar puentes ni taponar el poro.

La relación “ $d^{1/2}$ ” sugiere que para un proceso de formación de puentes ideal, el porcentaje en peso acumulado de los sólidos formadores de puentes debe ser directamente proporcional a la raíz cuadrada de su tamaño de partícula.

Las reglas mencionadas anteriormente son de carácter empírico. Se puede concluir, en forma general, que si se quiere formar una base efectiva para el revoque, un lodo debe contener partículas formadoras de puentes en un rango de tamaños comprendido desde un valor superior que sea ligeramente menor que la abertura del poro más grande de la formación a ser perforada, hasta un valor inferior que sea aproximadamente igual a un tercio de ese tamaño. Adicionalmente, debe haber partículas más pequeñas en un rango que incluya hasta el tamaño coloidal, para poder formar puentes en los poros más pequeños de la formación y para poder ocupar los intersticios entre las partículas más grandes. En todo caso, la formulación ideal del lodo es aquella que minimice tanto al “chorro de lodo” y sus sólidos suspendidos, así como al volumen de filtrado.<sup>(3)</sup>

Generalmente las partículas de tamaño coloidal proveen la parte más importante del control de pérdida de filtrado. Este control, sin embargo, se limita por el tamaño de poro del yacimiento, por lo que se calcula el tamaño de las partículas de forma empírica mediante la siguiente relación:

$$\frac{1}{7}d < d^* < \frac{1}{3}d$$

donde “ $d^*$ ” representa el diámetro de la garganta del poro del yacimiento, y “ $d$ ” el tamaño (diámetro) de la partícula. Aunque esta relación empírica es muy utilizada para seleccionar el tamaño de las partículas que se le deben agregar al lodo, no es conveniente emplearla ya que cada yacimiento contiene formaciones cuya distribución de poros puede ser muy variada.<sup>(1)</sup>

La mejor manera de determinar el tamaño adecuado de las partículas formadoras de puentes es hacer pruebas de filtración sobre núcleos de la formación de interés. De hecho, las pruebas de filtración API<sup>(9)</sup> efectuadas sobre papel de filtro pueden reportar un volumen de filtrado despreciable, pero al ser efectuadas sobre un núcleo de la formación permeable del pozo, las pérdidas de filtrado pueden ser apreciables. Evidentemente, el proceso de formación de puentes en ambos casos es distinto, lo que se traduce en “chorros de lodo”

diferentes. Cuando el “chorro de lodo” es considerable, este puede causar una obstrucción importante del medio, incrementando la caída de presión en el mismo; esto provoca que la caída de presión en el revoque disminuya, con lo que también disminuye su compactación. Todo esto se traduce en un aumento en el volumen de filtrado.

Mientras más grande sea la concentración de partículas formadoras de puentes, más rápido ocurrirá la formación de los mismos, y menor será el “chorro de lodo”.

#### **4.4 Daño a la formación**

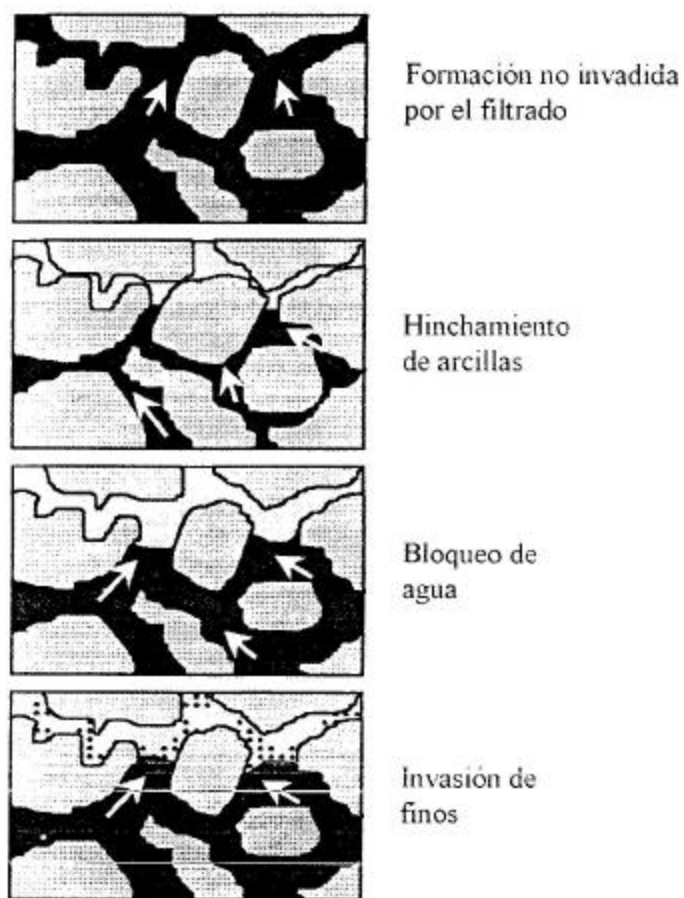
Durante el proceso de formación del revoque una parte del líquido que constituye el lodo de perforación, así como los sólidos de menor tamaño penetran los poros de la formación, produciendo lo que se conoce como daños a la formación.<sup>(3)</sup>

La velocidad de filtración y el “chorro de lodo” deben ser minimizados cuando se está penetrando en formaciones potencialmente productivas, ya que la productividad puede ser reducida por cualquiera de los cuatro mecanismos siguientes<sup>(3, 10, 11)</sup>:

- ★ La permeabilidad de un reservorio rocoso conteniendo arcillas naturales puede ser reducida por la dilatación de estas arcillas cuando entran en contacto con el filtrado que está invadiendo, o por la dispersión y transporte de estas arcillas u otros sólidos finos. Las partículas así transportadas quedan atrapadas en las estrechuras de los canales de flujo, reduciendo considerablemente la permeabilidad de la roca.
- ★ La presión de ciertos reservorios no es lo suficientemente grande para conducir todo el filtrado acuoso fuera de los poros de la roca, cuando el pozo es puesto a producir. El filtrado remanente en los poros reduce el espacio disponible para el flujo del petróleo o gas, causando así lo que se conoce como un bloqueo de agua (waterblock).

- ★ Las partículas finas del lodo, transportadas durante la etapa del “chorro de lodo”, pueden obstruir los canales de flujo.
- ★ Puede ocurrir precipitación mutua entre las sales disueltas en el filtrado y aquellas presentes en el agua intersticial de la formación.

La Figura 4.7 muestra una comparación entre una formación no afectada y otras formaciones afectadas por el hinchamiento de las arcillas, bloqueo de agua e invasión de finos.

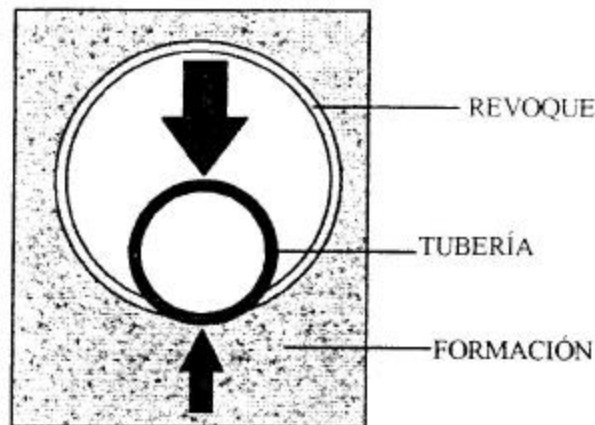


**Figura 4.7** Daños a la formación<sup>(10)</sup>

En formaciones permeables, las propiedades de filtración deben ser controladas para prevenir la formación de revoques gruesos, lo que reduce excesivamente el ancho del hoyo taladrado. Además, un revoque grueso puede causar el atascamiento del tubo de perforación por un mecanismo conocido como pegado diferencial (differential sticking), destruyendo

parte del revoque. Esto se puede observar en la Figura 4.8.

El riesgo de pegado del tubo de perforación se puede reducir empleando un lodo que forme un revoque delgado y duro, manteniendo la densidad del lodo lo más baja posible para minimizar la presión diferencial, y añadiendo un lubricante al lodo para reducir la adhesión entre el tubo y el revoque.<sup>(10)</sup>



**Figura 4.8** Pegado Diferencial<sup>(10)</sup>

También son necesarias buenas propiedades de filtración del lodo cuando se perfora en arenas no consolidadas, las cuales caerían hacia el hoyo a no ser que sean protegidas por la rápida formación de un revoque.

#### **4.5 Fundamentos de filtración**

La filtración es un proceso mecánico de separación, mediante el cual se hace pasar una suspensión a través de un medio permeable (o medio filtrante) capaz de retener las partículas sólidas y permitir el paso del líquido. La capa de sólidos que se deposita sobre el medio permeable se denomina Torta de Filtración, y el líquido obtenido se llama filtrado.<sup>(12)</sup>

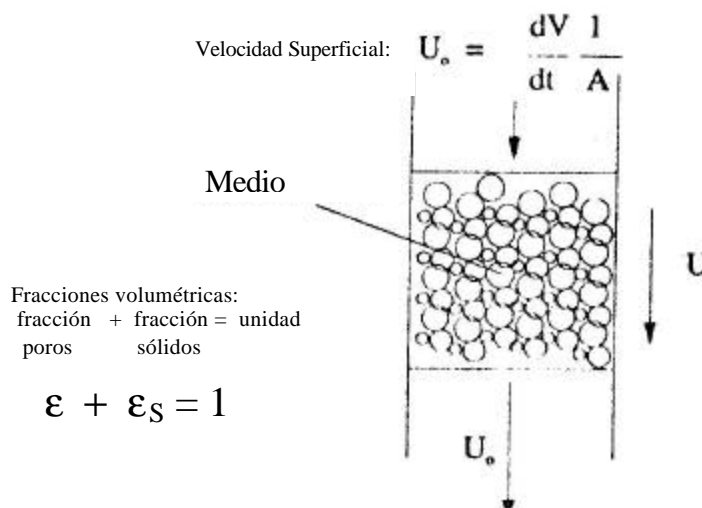
El fluido puede ser un líquido o un gas, y la corriente valiosa procedente de un filtro puede ser el fluido, los sólidos o ambos productos.<sup>(13)</sup> Para que ocurra la filtración debe existir una fuerza impulsora o presión diferencial aplicada sobre el medio filtrante para lograr obtener el filtrado.

#### 4.5.1 Flujo de fluido a través de un medio poroso<sup>(14)</sup>

La relación fundamental entre la caída de presión y la tasa de flujo de líquido que atraviesa un lecho empacado de sólidos, como es mostrado en la Figura 4.9, se describió por Darcy en 1856. El líquido pasa a través del espacio abierto entre las partículas, es decir los poros o vacíos dentro del lecho. Como éste fluye por encima de la superficie del empaquetamiento sólido se producen pérdidas friccionales que conllevan a una caída de presión.

La cantidad de sólidos dentro del lecho es claramente importante; a mayor cantidad de sólidos más grande será la superficie por encima de la cual fluye el líquido y, por consiguiente, más alta será la caída de presión como resultado de la fricción. El volumen disponible para el flujo del fluido es llamado porosidad. Así:

$$\text{Porosidad} = e = \frac{\text{volumen de poros}}{\text{volumen total del medio}} \quad (4.5)$$



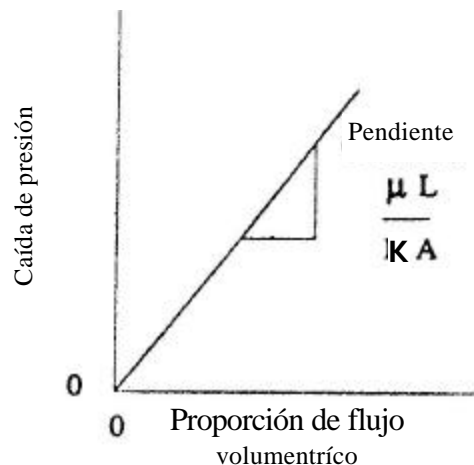
**Figura 4.9** Diagrama esquemático de un medio poroso

En muchas separaciones sólido-líquido el uso de la concentración de sólido a menudo se prefiere a la porosidad. Esto es normalmente el volumen de la fracción de sólidos presentes dentro del lecho ( $\epsilon_s$ ); la porosidad ( $\epsilon$ ) es la fracción de volumen vacío, de tal forma que la suma de estas dos fracciones resulta la unidad. Por tanto, la concentración de la fracción del volumen de sólido o solidosidad es:

$$\epsilon_s = 1 - \epsilon \quad (4.6)$$

Darcy descubrió que la pérdida de presión era directamente proporcional a la proporción de flujo de fluido [Darcy, 1856]. Esto se muestra en la Figura 4.10.

La constante de proporcionalidad en la figura depende de la permeabilidad  $K$  de la red porosa. La Ley de Darcy puede considerarse como el flujo de fluido a través de un medio poroso análogo a la Ley de Ohm para el flujo de corriente eléctrica, así: la fuerza que hace fluir el fluido es la diferencia de potencial o caída de presión por unidad de longitud, el flujo es la corriente o velocidad del líquido y la constante de proporcionalidad es la resistencia eléctrica o la proporción de la viscosidad a la permeabilidad. Con el aumento de la viscosidad o la disminución de la permeabilidad aumenta la resistencia al flujo de fluido.



**Figura 4.10** Relación proporcional entre la caída de presión y la tasa de flujo a través del medio poroso estable

En cualquier situación que involucre el flujo de fluido es posible considerar el arrastre de la superficie sólida debido a dos fenómenos: la fricción superficial (arrastre viscoso) y el arrastre de forma.



La fricción superficial es resultado de la capa estacionaria de líquido que se produce en la superficie del sólido, el arrastre o la pérdida de presión, por consiguiente, es debido a la fricción existente entre el sólido y el líquido. El arrastre de forma se debe a las turbulencias que ocurren a tasas de flujo más altas y fluctúan en intensidad y dirección. El arrastre de forma conlleva a pérdidas adicionales de presión por encima de la fricción superficial y a una pérdida de la linealidad entre la tasa de flujo y la caída de presión. Usualmente se utiliza el número de Reynolds modificado para distinguir entre los regímenes de flujo, o la importancia relativa de los tipos de arrastre. A bajas tasas de flujo ocurren más procesos de filtración a través del medio poroso, por lo cual el arrastre de forma no se discutirá más y se asumirá condiciones de flujo lineales. La ley de Darcy sólo es válida bajo estas condiciones.

Ley de Ohm:

$$V = IR$$

Donde  $V$  es la diferencia de potencial,  $I$  es la corriente y  $R$  la resistencia

Ley de Darcy:

$$\frac{\Delta P}{h} = \frac{\mu}{K} \frac{dV}{dt} \frac{1}{A} \quad (4.7)$$

Donde  $\Delta P$  es la caída de presión,  $L$  es la profundidad del lecho,  $\mu$  es la viscosidad del líquido,  $dV$  es el volumen de fluido que fluye en el tiempo  $dt$  y  $A$  es el área transversal del lecho

#### 4.5.2 Permeabilidad<sup>(14)</sup>

Las características de la permeabilidad en el caso en que el líquido fluirá dentro de un medio poroso, incluyendo las tortas filtrantes, representan, por consiguiente, un parámetro importante que ha sido estudiado por muchos trabajos de investigación. Entre los factores que afectan la permeabilidad se incluyen el tamaño de partículas que constituye el medio poroso y la porosidad. La ecuación mejor conocida para la permeabilidad es debida a Kozeny [1972]:

$$K = \frac{\epsilon^3}{k(1-\epsilon)^2 S_v^2} \quad (4.8)$$

donde  $S_v$  es el área de la superficie específica por unidad de volumen de las partículas y  $k$  es la constante de Kozeny que normalmente toma el valor de 5 en lecho fijo o de movimiento lento y 3.36 en movimiento rápido del lecho. Sustituyendo la ecuación 4.8 en la ley de Darcy (ecuación 4.7) se obtiene la ecuación de Carman y Kozeny:

$$\frac{\Delta P}{h} = \mu \left( \frac{5(1-\varepsilon)^2 S_v^2}{\varepsilon^3} \right) \frac{dV}{dt} \frac{1}{A} \quad (4.9)$$

Otras fuentes han investigado la relación entre las concentraciones, el tamaño de partícula y la permeabilidad [Happel & Brenner, 1965].

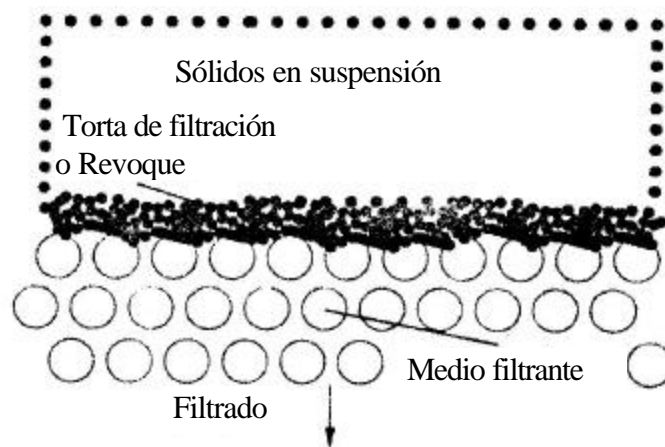
Se asume que las partículas se encuentran rígidas en los modelos de permeabilidad, en una geometría fija y en contacto una con otra. Además, solo se consideran las fuerzas debidas al arrastre de líquido y la presión. Así cualquier otra fuerza presente podría causar la desviación de la simplificada aproximación anterior. Tales fuerzas son generalmente significantes para las partículas menores a 10 micrones; debe tenerse mucho cuidado al aplicar estas relaciones a material menor a este tamaño. Éste es un hecho que Kozeny reconoció. A pesar de esto, muchas investigaciones han aplicado la ecuación de Carman y Kozeny a partículas más pequeñas y también a macromoléculas que sufren el fenómeno de la ultrafiltración. La mayoría se han decepcionado con la exactitud del modelo numérico resultante.

En la filtración normalmente es posible deducir una permeabilidad empírica de una simple prueba de laboratorio o frente a datos operacionales existentes. En la práctica la permeabilidad de la torta filtrante es función de la porosidad, la forma de la partícula y el empaquetamiento, el tamaño de la partícula y la distribución, la tasa de flujo a la que la torta fue formada, la concentración del chorro siendo filtrando, etc. Así sólo deben usarse las relaciones teóricas para la permeabilidad como una guía para estimar la permeabilidad en la ausencia de datos operacionales; las permeabilidades medibles pueden ser fácilmente uno o dos órdenes de magnitud por debajo de las estimadas por las ecuaciones anteriores. Ésto es consecuencia de muchos factores que no reconocen las ecuaciones anteriores. Es generalmente cierto también que mientras las partículas sean más finas, y la distribución de

tamaño más ancha, mayor será la desviación de la relación teórica de permeabilidad.

#### 4.5.3 Torta de Filtración<sup>(14)</sup>

La deposición de sólidos sobre un medio filtrante se muestra esquemáticamente en Figura 4.11. Generalmente se acepta que la filtración que se produce en la torta de filtración o revoque tiene lugar por un mecanismo de puente que se produce por encima de los poros de la superficie dentro de un medio filtrante, tela, empaquetamiento o soporte. Esto ayuda a impedir el paso de partículas finas al medio. El medio filtrante juega un papel fundamental en el comienzo de la filtración, y el medio puede tener efectos duraderos en la estructura del revoque y en las propiedades a lo largo del ciclo de filtración.



**Figura 4.11** Ilustración Esquemática del medio filtrante y el revoque

La descripción matemática del proceso que comienza con la caída de la resistencia del lecho, usando la ley de Darcy (ecuación 4.7) para relacionar la proporción de la tasa flujo de filtrado y la caída de presión, es como sigue:

$$\frac{\Delta P}{h} = \frac{\mu dV}{Kdt} \frac{1}{A}$$

Durante la filtración la profundidad de la torta aumenta debido a la deposición de sólidos en la superficie del revoque. El cambio de la profundidad de la torta se acompaña con los cambios de la proporción de flujo del fluido y el diferencial de presión, mientras aumenta el tiempo de filtración. Así la ecuación 4.7 tiene cuatro variables, incluso para los materiales

de permeabilidad, viscosidad del líquido y área filtrante constante. Un material que posee una permeabilidad constante normalmente tiene como consecuencia una concentración constante en la torta. Esto es consistente con las ecuaciones de permeabilidad, las cuales mostraron que la permeabilidad es función del tipo de sólidos (el tamaño) y la porosidad (o concentración). Un material de concentración de torta constante es, por consiguiente, *incompresible* y este tipo de filtración es conocida como filtración de torta incompresible. La mayoría de los conceptos siguientes también involucran a tortas compresibles, las cuales generalmente se consideran parte de esta teoría básica.

En la filtración incompresible la concentración de la torta permanece constante, así como para cada unidad de volumen de la suspensión, el volumen del revoque incrementa de manera uniforme y en cantidad constante. Igualmente el volumen del filtrado es uniforme y constante con respecto a cada unidad de volumen de la suspensión filtrante. La proporción de deposición de la torta, sin embargo, no será uniforme porque cada nuevo elemento de la misma incrementa la resistencia total al paso del filtrado a través de la nueva capa de torta que se forma y eventualmente a través del medio filtrante. Así la tasa de filtración decae cuando se filtra a presión constante, como se muestra en la Figura 4.12. La relación uniforme entre el volumen de la torta y el volumen del filtrado se ilustra en la Figura 4.13. La constante de proporcionalidad  $\kappa$  puede ser usada para dar una ecuación para la profundidad de la torta, a cualquier instante en el tiempo:

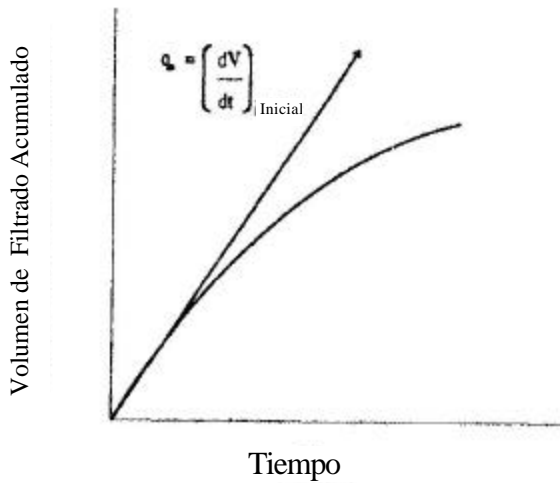
$$h = \frac{\kappa V}{A} \quad (4.10)$$

esto puede sustituirse en la ecuación 4.7 para dar:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{A^2 \Delta P K}{\kappa V \mu} \quad (4.11)$$

Así la ecuación 4.11 contiene una variable menos que la ecuación 4.7 pero una constante más ( $\kappa$ ).

Claramente, la proporción de volumen de la torta todavía debe calcularse antes que la ecuación 4.11 pueda ser evaluada. Esto se logra mediante un balance de masa en el sólido y en el líquido que entra en el sistema filtrante.



**Figura 4.12** Decaimiento de la tasa de filtrado a presión constante

Masa de sólidos en el revoque:  $\epsilon_s A h r_s$  (kg)

Masa de líquido en el revoque:  $(1 - \epsilon_s) A h r$  (kg)

Fracción másica de sólidos en el filtrado:  $s$

Masa total de filtrado (sólido y líquido):  $M$  (kg)

Balance de masa en el líquido:

$$(1 - \epsilon_s) M = V \rho + (1 - \epsilon_s) \rho h A$$

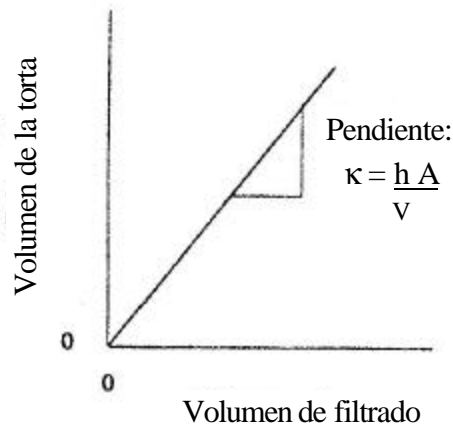
Balance de masa en los sólidos:

$$s M = \epsilon_s \rho_s h A$$

el cual se combina con la ecuación 4.10 y reorganizando resulta:

$$\kappa = \frac{s \rho}{(1 - s) \epsilon_s \rho_s - s(1 - \epsilon_s) \rho} \quad (4.12)$$

El uso de la ecuación 4.12 asume el conocimiento de dos constantes (excluyendo las densidades): la concentración del filtrado por fracción másica y la concentración de la torta de filtración por fracción volumétrica. Lo anterior se obtiene rápidamente mediante la toma de muestra, la medida del peso, el secado y el repesado. El último normalmente se obtiene por una ruta similar, pero con la necesidad de convertir los datos de fracción másica a fracción volumétrica.



**Figura 4.13** Relación proporcional entre el revoque y el volumen de filtrado

#### 4.5.3.1 Masa de torta depositada por Unidad de Área y Resistencia Específica<sup>(14)</sup>

Un procedimiento útil que sigue de la ecuación 4.11 es multiplicar el numerador y denominador por el producto de la concentración de sólidos y la densidad, y reorganizando la ecuación resultante para dar:

$$\frac{dV}{dt} = \left( \frac{A}{\kappa V \epsilon_s \rho_s} \right) \left( \frac{\kappa \epsilon_s \rho_s}{1} \right) \left( \frac{A \Delta P}{\mu} \right) \quad (4.13)$$

La ecuación 4.10 también puede multiplicarse por la concentración y la densidad para dar:

$$h \epsilon_s \rho_s = \frac{\kappa V}{A} \epsilon_s \rho_s$$

Nótese que  $A h \epsilon_s \rho_s$  es la masa de sólidos secos depositados en la torta, así la ecuación anterior es la masa de sólidos secos por unidad de área, y normalmente se da  $m_s$  en términos de:

$$m_s = \frac{M_s}{A} = \frac{\kappa V \epsilon_s \rho_s}{A} \quad (4.14)$$

La permeabilidad de la torta, la fracción de concentración volumétrica y la densidad del sólido son constantes para una torta incompresible y pueden, por consiguiente, ser

reemplazados por una sola constante llamada “resistencia específica”  $\alpha$  la cual tiene como unidades  $\text{m kg}^{-1}$ :

$$\alpha = \frac{1}{K\varepsilon_s\rho_s} \quad (4.15)$$

Nótese que como la permeabilidad es análoga a la conductividad eléctrica es lógico usar el término de resistencia como el inverso de la conductividad del fluido, o permeabilidad. Sustituyendo las ecuaciones 4.14 y 4.15 en la ecuación 4.13 da:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{A\Delta P}{\mu m_s \alpha} \quad (4.16)$$

la cual es la ecuación diferencial que se usará en las descripciones matemáticas siguientes de filtración. Se debe, sin embargo, tener presente que este procedimiento podría ser empleado en la ecuación 4.11, retomando la permeabilidad y usando la ecuación 4.12 para la proporción de volumen de la torta de filtración para recolectar el volumen de filtrado.

El significado físico de la resistencia específica se ilustra en la Figura 4.14. Si sólo se considera en la ley de Darcy la resistencia del revoque  $r_c$ :

$$\Delta P = \mu r_c \frac{dV}{dt} \frac{1}{A}$$

entonces la resistencia global a la filtración aumenta con el tiempo debido a la deposición de sólidos en el revoque. La proporción de aumento en la resistencia de la filtración es, sin embargo, lineal con respecto a la masa de sólidos secos depositados por unidad de área de filtro. Así la resistencia específica es la proporción, o pendiente, de estos dos términos como es ilustrado en la Figura 4.14.

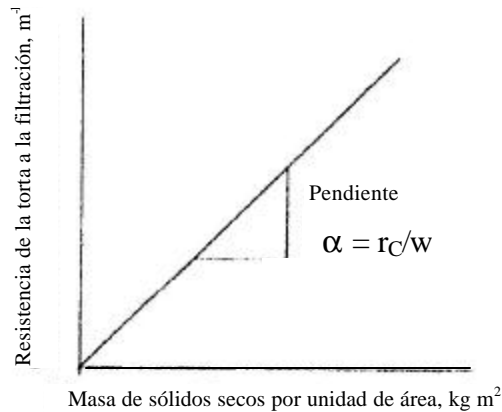
La ecuación 4.16 no puede resolverse sin algún método que calcule la masa de sólidos secos depositados por unidad de área de filtro.

#### 4.5.3.2 Concentración de sólidos<sup>(14)</sup>

La apreciación de las diferentes formas de concentración del sólido, es esencial en conciliación de los datos experimentales con la descripción matemática de filtración. Es

probable que se obtengan los datos experimentales en fracción másica;  $s$ , para el revoque o la concentración del filtrado respectivamente. La concentración en fracción volumétrica viene de la definición de densidad:

$$\varepsilon_s = \frac{\text{Volumen de solidos}}{\text{Volumen de solidos} + \text{Volumen de liquido}} = \left( 1 + \frac{(1-s)\rho_s}{s\rho} \right)^{-1} \quad (4.17)$$



**Figura 4.14** Resistencia Específica

La concentración en términos de masa de sólidos por unidad de volumen ( $C_{wv}$ ) se obtiene por una ruta similar:

$$C_{wv} = \frac{\text{Masa de solidos}}{\text{Volumen de solidos} + \text{Volumen de liquido}} = \left( \frac{1}{r_s} + \frac{(1-s)}{sr} \right)^{-1}$$

y la concentración en términos de la masa de sólidos por unidad de volumen de líquido  $\omega$ :

$$\omega = \frac{\text{Masa de solidos}}{\text{Volumen de liquido}} = s\rho/(1-s)$$

A menudo se asume que  $m_s$  puede obtenerse de  $\omega$  (masa de torta seca por unidad de volumen de filtrado) como sigue:

$$M_s = m_s A = \text{Masa de sólidos secos} = \omega V$$

que reorganizando queda:

$$m_s = \omega \frac{V}{A} \quad (4.18)$$

Un tratamiento más riguroso de la masa seca de la torta por unidad de área de filtración usualmente comienza con la proporción de la humedad de la torta, definida como:



$$m = \frac{\text{Masa de torta húmeda}}{\text{Masa de torta seca}} = \frac{\text{Masa de sólidos en la torta} + \text{Masa de líquido en la torta}}{\text{Masa de sólidos en la torta}}$$

Así:

$$m = \frac{\epsilon_s Ah\rho_s + (1 - \epsilon_s)Ah\rho}{\epsilon_s Ah\rho_s}$$

y dividiendo por los sólidos contenidos en la torta resulta:

$$m = 1 + \frac{(1 - \epsilon_s) \rho}{\epsilon_s \rho_s}$$

Combinando las ecuaciones 4.12 y 4.14 da:

$$m_s = \left( \frac{\epsilon_s \rho_s s \rho}{(1 - s)\epsilon_s \rho_s - s(1 - \epsilon_s)\rho} \right) \frac{V}{A}$$

que se lleva a:

$$m_s = \left\{ \rho / \left[ \frac{1}{s} - 1 - \frac{(1 - \epsilon_s)\rho}{\epsilon_s \rho_s} \right] \right\} \frac{V}{A}$$

Sustituyendo en la expresión para la humedad del revoque y reordenando resulta la ecuación 4.19:

$$m_s = \left( \frac{s\rho}{1 - sm} \right) \frac{V}{A} \quad (4.19)$$

Usando la definición de  $\omega$  en la ecuación 4.19 se reduce a la ecuación 4.18 cuando la proporción de humedad de la torta es la unidad. Por lo tanto:

$$\omega = \left( \frac{s\rho}{1 - sm} \right) \quad (4.20)$$

Dependiendo de los datos disponibles y del grado de complejidad de la solución requerida. En ambos casos el término de la concentración en el lado derecho de la ecuación ( $m_s$  y  $s$ ) se refiere al filtrado, y  $\omega$  será constante para la torta de filtración incompresible. Físicamente, el término  $\omega$  representa la masa de torta seca depositada por unidad de volumen de filtrado. Para tortas compresibles en la ecuación 4.20, sin embargo,  $m$  no es una constante.

El análisis anterior demuestra que el conocimiento de la concentración de la torta, por consiguiente, no es esencial, como fue evaluado en la ecuación 4.12, con tal de que el líquido retenido en la torta sea pequeño.

#### 4.5.4 Ecuación Fundamental de formación de la torta <sup>(14)</sup>

Sustituyendo la ecuación 4.18 en la ecuación 4.16 resulta:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{A^2 \Delta P}{\mu \omega V \alpha} \quad (4.21)$$

La ecuación 4.21 contiene tres variables y cuatro constantes: tiempo, volumen de filtrado y presión; y área de filtración, viscosidad, concentración y resistencia específica. Las dos últimas sólo son constantes si la torta es incompresible. La ecuación analíticamente sólo puede resolverse si se sostiene que una de las tres variables es constante. Esto refleja el modo físico de funcionamiento de los filtros industriales; la filtración al vacío tiende a ser a presión constante y la presión de filtración a menudo está bajo proporción constante, o por lo menos hasta que se predetermine que la presión se ha logrado.

##### 4.5.4.1 Filtración a presión constante<sup>(14)</sup>

Bajo estas condiciones la ecuación 4.13 puede reestructurarse e integrarse como sigue:

$$\int_0^t dt = \frac{\mu \omega \alpha}{A^2 \Delta P} \int_0^V V dV$$

los límites se dan por: cero volumen de filtrado al tiempo cero,  $V$  volumen filtrado después de un tiempo  $t$ , así:

$$t = \frac{\mu \omega \alpha}{A^2 \Delta P} \frac{V^2}{2} \quad (4.22)$$

De acuerdo a la ecuación 4.22 cualquier pérdida de presión debido al flujo de filtrado a través del medio filtrante se desprecia. La caída de presión en el medio  $DP_m$  puede sumarse a la caída de presión a través de la torta de filtración  $DP_c$ , para dar la caída de presión total o global:

$$\Delta P = \Delta P_c + \Delta P_m \quad (4.23)$$

Aplicando la ley de Darcy a ambos términos:

$$\Delta P = \frac{\mu \omega \alpha}{A^2} V \frac{dV}{dt} + \frac{\mu}{A} \frac{L_m}{K_m} \frac{dV}{dt} \quad (4.24)$$

donde  $L_m$  y  $K_m$  son la profundidad del medio y la permeabilidad, respectivamente; si estas dos variables permanecen constantes durante la filtración, ambas pueden reemplazarse por una sola constante conocida como la resistencia del medio  $R_M$ , con unidades de  $m^{-1}$ :

$$R_M = \frac{L_m}{K_m}$$

Esta expresión puede sustituirse en la ecuación 4.24 que puede reestructurarse e integrarse para dar:

$$\int_0^t dt = \frac{\mu \omega \alpha}{A^2 \Delta P} \int_0^V V dV + \frac{\mu R_M}{A} \int_0^V dV$$

Después de la integración y reestructuración la siguiente ecuación, conocida como la ley de proporción parabólica linearizada resulta:

$$\frac{t}{V} = \frac{\mu \omega \alpha}{2A^2 \Delta P} V + \frac{\mu R_M}{A \Delta P} \quad (4.25)$$

La ecuación 4.25 es una línea recta dónde  $t/V$  es la variable dependiente y  $V$  la independiente. Así, mediante un gráfico de datos experimentales de  $t/V$  contra  $V$  se puede obtener la pendiente y la intercepción de la ecuación 4.25:

La pendiente e intercepción son:

$$\text{Pendiente} = \frac{\mu \omega \alpha}{2A^2 \Delta P} \quad (4.26)$$

y:

$$\text{Intercepción} = \frac{\mu R_M}{A \Delta P} \quad (4.27)$$

Si la viscosidad del líquido ( $\mu$ ), el área del filtro ( $A$ ), la presión de filtración ( $\Delta P$ ) y la masa de torta seca por unidad de volumen ( $\omega$ ), de la ecuación 4.26 o 4.27, se conocen, los valores gráficos pueden usarse para calcular la resistencia específica de la torta ( $\alpha$ ) y la resistencia del medio filtrante ( $R_M$ ).

#### 4.5.5 Efectos de la presión sobre el revoque<sup>(14)</sup>

La manera más económica de quitar el líquido de una torta de filtración incompresible es filtrar a la presión más baja requerida para superar el arrastre del fluido dentro de la torta. Con el aumento de la presión no se logra una torta más seca (contenido de sólido más alto) pero podría acelerar el proceso de escurrimiento. Todas las tortas filtrantes exhiben alguna forma de compresibilidad en la práctica, ya que aumentando la presión de filtración se incrementa la concentración de sólido en la torta. Un aumento en la concentración conlleva a una disminución en la permeabilidad del revoque, así la ventaja de aumentar la concentración de sólido tiene como desventaja el operar a un grado más bajo de permeabilidad, o a una resistencia específica más alta, al decidir una presión para usar durante la filtración del revoque compresible.

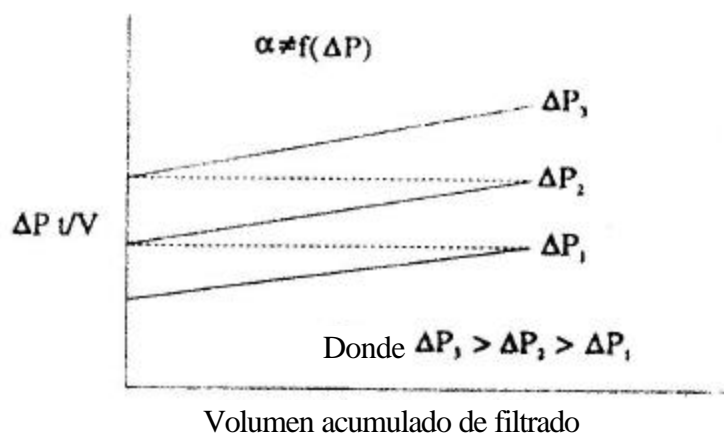
Muchos materiales pueden formar un revoque de concentración aproximadamente constante, al filtrarse bajo condiciones de presión constante, como se esperaría de una filtración incompresible. Incrementando la presión de filtración se puede obtener un revoque de concentración aproximadamente uniforme pero superior al obtenido por presión constante. Así la compresibilidad se manifiesta entre las filtraciones pero no, necesariamente, dentro de una filtración. Esta observación ha conducido a la adopción casi universal del concepto de *concentración promedio* del revoque y permeabilidad o resistencia específica, al modelar revoques compresibles en una balanza industrial. Los valores promedios reemplazan la permeabilidad o la resistencia específica en las ecuaciones descritas anteriormente.

Un hecho útil de las características compresibles de un material bajo investigación resulta de la manipulación de la ecuación 4.25: tomando la presión de filtración como la variable dependiente da:

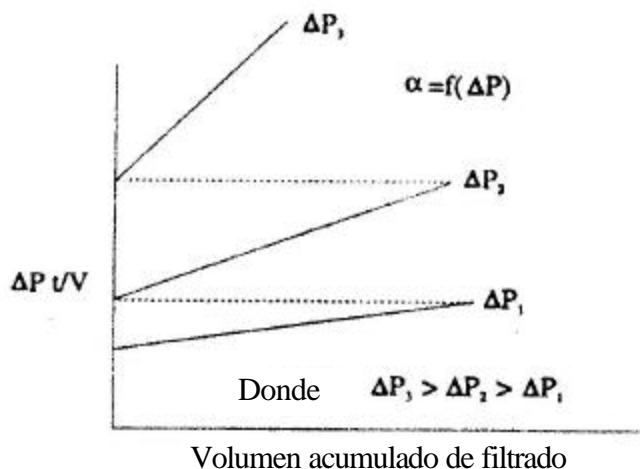
$$\Delta P \frac{t}{V} = \left( \frac{\mu \omega \alpha}{2A^2} \right) V + \left( \frac{\mu R_M}{A} \right) \quad (4.28)$$

Si la presión es aumentada por pasos incrementales durante una filtración y entonces

se sostiene constante hasta el próximo aumento incremental, resulta una de las Figuras 4.15, dependiendo de la compresibilidad del material.



**Figure 4.15a** Gráfica de la ley modificada de proporción parabólica para mostrar el efecto de las tortas incompresibles.



**Figure 4.15b** Gráfica de ley modificada de proporción parabólica para mostrar el efecto de las tortas compresibles.

El volumen acumulado de filtrado se restablece a cero después de cada cambio en la presión. La filtración debe comenzar desde la presión más baja e ir incrementando por pasos hacia la más alta. En las Figuras 4.15 se muestra dos pasos de presión más alta a la presión original.

El primer término entre paréntesis de la ecuación 4.28 contiene sólo constantes en el caso de una filtración incompresible, y el término de la resistencia del medio incluye una contribución a la resistencia del flujo debido a las capas de torta depositadas al aumentar la presión de la filtración.

Si una figura semejante a la Figura 4.15b resulta de una prueba experimental, pero con linealidad razonable, entonces el material es claramente compresible, pero con una resistencia específica promedio y valores de concentración constantes de la torta durante la filtración. En muchos casos se puede encontrar un cero o una intercepción negativa, esto se ilustra en Figura 4.16.



**Figure 4.16** Gráfica de la ley modificada de proporción parabólica mostrando la intercepción negativa para una torta compresible.

Las ecuaciones 4.25 o 4.28 sugieren que una intercepción negativa indica una fuerza tendencia adicional para la filtración ajena a la presión de filtración. Éste no es el caso. La relación, sin embargo, si siguió de cerca al comienzo donde se muestra considerable la curvatura cóncava desde el origen hacia arriba. Bajo estas circunstancias la resistencia del medio debe calcularse aplicando la Ley de Darcy a las fases iniciales de la filtración, como se muestra en la Figura 4.12, y usando la ecuación 4.29:

$$R_M = \frac{A\Delta P}{\mu q_0} \quad (4.29)$$

La caída de presión a través del medio filtrante  $\Delta P_M$  puede evaluarse entonces en cualquier fase durante la filtración de la Ley de Darcy, usando la ecuación 4.30:

$$\Delta P_M = \frac{\mu R_M}{A} \frac{dV}{dt} \quad (4.30)$$

Así es posible calcular la caída de presión a través de la torta  $\Delta P_c$  mediante el rearrreglo de la ecuación 4.23:

$$\Delta P_c = \Delta P - \Delta P_M \quad (4.31)$$

Hay muchas ecuaciones teóricas o desarrollos que sólo son aplicables a la caída de presión por encima del pastel del revoque, o se asume que la caída de presión por encima del medio es despreciable. Así la ecuación anterior para calcular la caída de presión por encima del revoque a cualquier instante en el tiempo es muy importante en el desarrollo de estos modelos.

La relación entre la resistencia específica y la caída de presión a través de la torta a menudo se expresa por la siguiente expresión:

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}_0 \Delta P_c^{n'} \quad (4.32)$$

o:

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}_0 \left( 1 + \frac{\Delta P_c}{P_0} \right)^{n'}$$

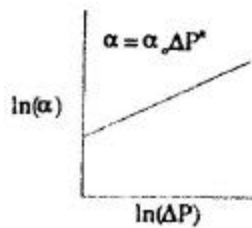
En términos de concentración:

$$C = C_0 \Delta P_c^u \quad (4.33)$$

o:

$$C = C_0 \left( 1 + \frac{\Delta P_c}{P_0} \right)^u$$

donde  $u$ ,  $C_0$ ,  $P_0$ ,  $\mathbf{a}_0$  y  $n'$  son constantes empíricas. Se han propuesto ecuaciones similares para correlacionar la porosidad con la presión. Las constantes empíricas se obtienen de un gráfico como la Figura 4.17.



**Figura 4.17** Variación logarítmica de la resistencia específica con la presión

La relación de la caída de presión a través del revoque lleno a la resistencia específica promedio se considera igual a la integral del diferencial de presión sobre la resistencia específica:

$$\frac{\Delta P_c}{\mathbf{a}_{av}} = \int_0^{\Delta P_c} \frac{d\Delta P}{\mathbf{a}}$$

Sustituyendo la ecuación 4.32:

$$\frac{\Delta P_c}{\mathbf{a}_{av}} = \frac{1}{\mathbf{a}_0} \int_0^{\Delta P_c} \frac{d\Delta P}{\Delta P^n}$$

qué integrando y reestructurando queda:

$$\mathbf{a}_{av} = \mathbf{a}_0 (1 - n) \Delta P_c^{n'} \quad (4.34)$$

Esto puede sustituirse en las Ecuaciones (4.21) o (4.24) para dar la ecuación general de la filtración para las tortas compresibles. Considerando sólo la caída de presión debido a la torta la ecuación general es:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{A^2}{\mathbf{m} \mathbf{a}_0 (1 - n') \Delta P_c^{(n'-1)} V} \quad (4.35)$$

Puede deducirse una expresión para la concentración promedio en una torta de una forma similar a esta usando una derivación de la ecuación 4.35. Esto lleva a:

$$C_{av} = C_0 (1 - u) \Delta P_c^u \quad (4.36)$$

donde  $C_0$  y  $u$  se derivan empíricamente como constantes.

#### 4.5.6 Métodos para la determinación de la Resistencia Específica<sup>(15)</sup>

La determinación experimental de la resistencia específica de una torta de filtración ( $r_c$  o  $\alpha$ ), así como del medio filtrante empleado ( $R_M$ ), debe ser realizada de manera conjunta debido a la dificultad práctica que implica evaluar la diferencia de presión a ambos lados de la torta, por lo que se prefiere la medición de dicho parámetro entre la alimentación y la descarga del filtro, lo que implica la consideración de la resistencia impuesta por el medio filtrante, que se supone de carácter constante. Adicionalmente, la evaluación del proceso de filtración a presión constante es la más frecuente debido a que permite establecer



condiciones más estables en cuanto al rendimiento del filtro y las propiedades uniformes para la torta obtenida. En tal sentido, la determinación de la resistencia específica de la torta se lleva a cabo experimentalmente a partir de los siguientes métodos:

#### 4.5.6.1. Método de Formación de la Torta<sup>(15)</sup>

El método involucra la formación de la torta, por medio de la filtración a presión constante, cuyo comportamiento puede ser descrito teóricamente a partir de la aplicación de la ley de Darcy y un balance de masa diferencial del sólido en la torta, con lo que se obtiene la siguiente ecuación (equivalente a la ecuación de la ley de proporción parabólica descrita anteriormente):

$$t = a \cdot V^2 + b \cdot V \quad (4.37)$$

donde:

$$a = \frac{r_c \cdot \kappa \cdot \mu}{2 \cdot A^2 \cdot \Delta P} \quad (4.38)$$

$$b = \frac{R_M \cdot \mu}{A \cdot \Delta P} \quad (4.39)$$

A partir de datos experimentales de tiempo de filtrado (t) en función del volumen de filtrado (V) obtenido, y con el uso de esta ecuación, se puede determinar la resistencia específica de la torta y la resistencia del medio filtrante, a través de los siguientes métodos:

En algunos casos, conviene expresar la resistencia al flujo del fluido agrupando los términos  $r_c$  y  $\mu$ , dicho agrupamiento es referido en la industria petrolera como la movilidad, que no es una propiedad intrínseca del medio poroso, sino del conjunto fluido – medio poroso:

$$\text{Movilidad} \equiv \frac{1}{\mu \cdot r_c} = \frac{K}{\mu} \quad (4.40)$$

#### 4.5.6.1.1 Método lineal <sup>(15)</sup>

Se basa en la definición de una recta con la forma:

$$\frac{t}{V} = a \cdot V + b \quad (4.41)$$

Por lo tanto al realizar un gráfico de los valores experimentales de filtración de  $t/V_l$  con respecto a  $V_l$  debe obtenerse una recta con pendiente (a) y punto de corte (b), lo cual permite conseguir los valores respectivos tanto de la resistencia específica de la torta ( $r_c$ ) como los de la resistencia del medio filtrante ( $R_M$ ).

#### 4.5.6.1.2 Método cuadrático <sup>(15)</sup>

Basado en un ajuste por mínimos cuadrados de los datos experimentales a la ecuación 4.37 se obtienen los valores de a y b, lo que permite obtener después tanto el valor de  $r_c$ , como el valor de  $R_M$ .

#### 4.5.6.2 Método de Permeación de la Torta <sup>(15)</sup>

Este se basa en la permeación de una torta de espesor conocido, a través del paso de un volumen determinado de líquido claro (sin sólido) a un caudal constante, lo que equivale a reproducir el experimento de Darcy, por lo tanto a partir de esta ley el proceso es descrito de la manera siguiente:

$$\Delta P = (r_c \cdot h + R_M) \cdot \mu \cdot \frac{Q}{A} \quad (4.42)$$

Una vez obtenida la resistencia específica, se puede determinar la permeabilidad con la siguiente relación:

$$K = \frac{1}{r_c} \quad (4.43)$$

#### **4.6 Análisis del tamaño de partículas** <sup>(16)</sup>

La caracterización de la partícula, es decir la descripción de las propiedades primarias de las partículas en un sistema de partículas, es la base del trabajo en la tecnología de la partícula. Las propiedades primarias de la partícula como la distribución del tamaño de partícula, la forma de la partícula, la densidad superficial y otras propiedades, junto con las propiedades primarias del líquido (viscosidad y densidad) y también con la concentración y el estado de dispersión, gobiernan a otras propiedades secundarias como las velocidades del establecimiento de las partículas, la permeabilidad de un lecho o la resistencia específica del revoque. El conocimiento de estas propiedades es vital en el diseño y operación de equipos para la separación sólido-líquido.

El tamaño de partícula afecta la permeabilidad grandemente, o a la resistencia específica de lechos empacados, la resistencia específica de la torta ( $\alpha$ ) esta dada por:

$$\alpha \sim 1/x^2$$

donde  $x$  es el tamaño de la partícula, ya que la superficie específica de las partículas que constituyen el lecho es inversamente proporcional al tamaño de la partícula, por tanto el tamaño de partícula puede usarse para una valoración cualitativa de la permeabilidad.

La caracterización de partículas sólidas, la mayoría de las cuales, en la práctica, tienen forma irregular, normalmente se realiza analizando el tamaño de la partícula y su distribución.

Antes de seleccionar una técnica para el análisis de tamaño de partícula, deben tomarse dos decisiones importantes sobre las variables a medir: la medida del tamaño de partícula  $x$  y el tipo de distribución de tamaño  $\phi$  requerido.

##### **4.6.1 Descripción del tamaño de partícula** <sup>(16)</sup>

Una partícula irregular puede describirse por un número de tamaños que dependen de qué dimensión o propiedad es medida. Existen básicamente tres grupos de tamaños:

diámetros de esferas equivalentes, diámetros de círculos equivalentes y diámetros estadísticos.

El primer grupo de tamaños son los *diámetros de una esfera* que tendrían las mismas propiedades de una esfera (es decir el mismo volumen, la misma área proyectada, la misma velocidad de sedimentación, etc.) - ver Tabla 4.1.

**Tabla 4.1** Lista de definiciones de diámetros de esferas equivalentes

Símbolo	NOMBRE	Propiedad equivalente de una esfera
$x_v$	Diámetro Volumétrico	Volumen
$x_s$	Diámetro Superficial	Superficie
$x_{sv}$	Diámetro Superficie-volumen	Relación superficie-volumen
$x_d$	Diámetro de Arrastre	Resistencia al movimiento en el mismo fluido y velocidad
$x_f$	Diámetro de Caída libre	Velocidad de caída libre en el mismo líquido e igual densidad de partícula.
$x_{st}$	Diámetro de Stokes	Velocidad de caída libre bajo el cumplimiento de la ley de Stoke ( $Re < 0.2$ )
$x_A$	Diámetro de Tamiz	Paso a través del mismo tamaño de apertura (tamiz)

El segundo grupo de tamaños son los *diámetros de un círculo*, que tendrían la misma propiedad como la proyectada por el contorno de las partículas. En la Tabla 4.2 se observa la lista de diámetros de círculo equivalente y la propiedad con la cual están relacionados.

El tercer grupo de tamaños son los *diámetros estadísticos*, los cuales se obtienen cuando se mide una dimensión lineal (por microscopía) paralela a una dirección fija. Ver Tabla 4.3.

Los diferentes métodos de medición del tamaño de partícula determinan medidas diferentes de tamaño, por lo tanto debe tenerse sumo cuidado cuando se hace una selección

acerca de qué tamaño es más pertinente a la propiedad o proceso que serán controlados. Por ejemplo, en los métodos de separación de sólido-líquido en los que el movimiento relativo de la partícula al fluido es el mecanismo gobernante (gravedad o sedimentación centrífuga, hidrociclones) es claro que es más pertinente usar un método que mida el diámetro de caída libre o, más a menudo, el diámetro de Stokes (sedimentación o métodos de clasificación de fluido). Por otro lado, en la filtración, es el diámetro de volumen de superficie (el que es medido, por ejemplo, por la permeabilidad) que es más pertinente al mecanismo de separación.

**Tabla 4.2** Lista de diámetros de círculo equivalente.<sup>(16)</sup>

Símbolo	NOMBRE	Propiedad equivalente de un círculo
$x_a$	Diámetro de Área proyectada	Área proyectada si la partícula descansa en una posición estable
$x_p$	Diámetro de Área proyectada	Área proyectada si la partícula está orientada aleatoriamente
$x_c$	Diámetro Perimetral	Perímetro del contorno

**Tabla 4.3** Lista de diámetros estadísticos.<sup>(16)</sup>

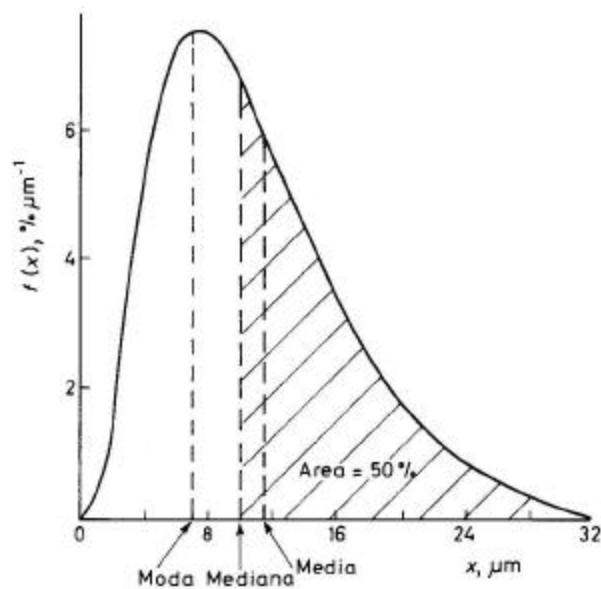
Símbolo	NOMBRE	DIMENSIÓN MEDIDA
$x_F$	Diámetro de Feret`s	Distancia entre dos tangentes opuestas a los lados de la partícula, paralelas a una dirección fija
$x_M$	Diámetro de Martin`s	Longitud de la línea que bisecciona la imagen de la partícula
$x_{SH}$	Diámetro de corte	Ancho de partícula obtenido del corte visual
$x_{CH}$	Diámetro de máximo contorno	Longitud máxima de una línea limitada por el contorno de la partícula

#### 4.6.2 Medidas de tendencia central<sup>(16)</sup>

Existe un gran número de promedios diferentes o tamaños medios que pueden definirse para una distribución de tamaño de partícula dada. El propósito de las mediciones

de tendencia central es representar una población de partículas por una sola figura; esto no da ninguna indicación acerca de la anchura de la distribución pero a veces puede significar muy útil para el control de procesos. Las relaciones y definiciones siguientes están basadas en conceptos matemáticos generales, aplicados específicamente a los sistemas particulados.

Existen tres medidas importantes de tendencia central para una distribución de tamaño dada: la moda, la mediana y la media, como se muestra en la Figura 4.18.



**Figura 4.18** La moda, la mediana y la media de una distribución de tamaño<sup>(16)</sup>

La moda es el tamaño que ocurre con más frecuencia, es decir el tamaño que corresponde a la cresta en la curva de frecuencia de distribución de tamaño. Algunas distribuciones normalmente pueden tener más de una cresta, las cuales son llamadas distribuciones multimodales, las que presentan una sola cresta (como en la Figura 4.18) obviamente son las de tipo monomodal, las cuales son el caso de estudio en este trabajo especial de grado.

La mediana o el tamaño 50% ( $x_{50}$ ) es el tamaño que divide el área bajo la curva de distribución de frecuencias (Figura 4.19a) en dos mitades iguales, una mitad son las partículas más grandes y la otra las más pequeñas. La mediana se determina más fácilmente

de la curva de porcentaje acumulado (Figura 4.19b) en donde corresponde exactamente al 50%.

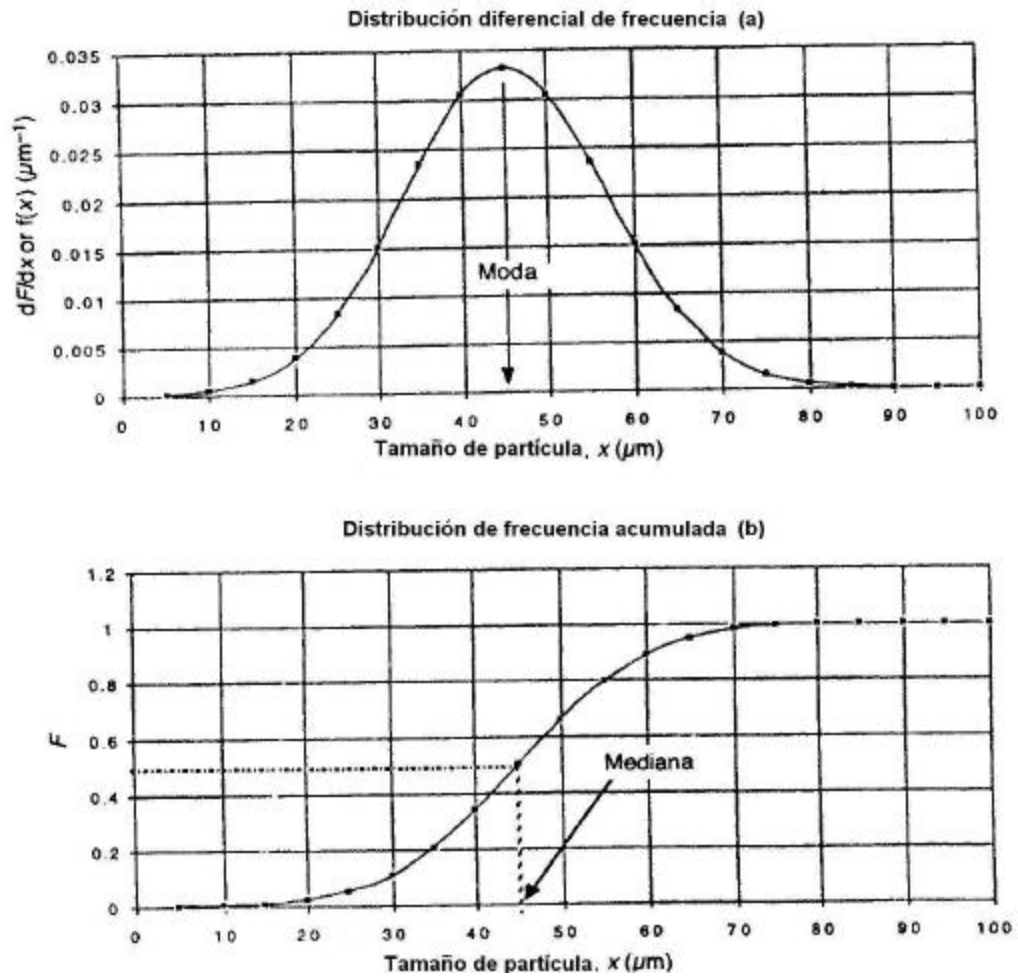


Figura 4.19 Curva de distribución de frecuencias diferencial (a) y acumulada (b)<sup>(17)</sup>

Hay muchas medias que pueden definirse a partir de una distribución de tamaño de partícula dada; su definición en forma general es:

$$g(\bar{x}) = \int_0^{\infty} g(x) f(x) dx \quad (4.44)$$

o

$$g(\bar{x}) = \int_0^1 g(x) dF$$

siendo entonces:

$$f(x) = dF/dx \quad (4.45)$$

donde  $f(x)$  es la frecuencia de distribución de tamaño de partícula por número, longitud, área o masa, según sea la variable de interés, y  $g(x)$  es función del tamaño de la partícula  $x$ . Dependiendo de la forma de esta función se tienen varios tipos de media  $x$  como se muestra en la Tabla 4.4. Así, por ejemplo, la media aritmética se define como:

$$\bar{x}_a = \int_0^1 x \cdot dF = \int_0^{\infty} x \cdot f \cdot dx \quad (4.46)$$

**Tabla 4.4** Tipos de medias  $x$  <sup>(16)</sup>

Forma de $g(x)$	Nombre de la media $x$
$g(x) = x$	media aritmética, $\bar{x}_a$
$g(x) = x^2$	media cuadrática, $\bar{x}_q$
$g(x) = x^3$	media cúbica, $\bar{x}_c$
$g(x) = \log x$	media geométrica, $\bar{x}_g$
$g(x) = 1/x$	media armónica, $\bar{x}_h$

En la Figura 4.20 se puede observar la comparación entre las medidas de tendencia central para una distribución de tamaño de partícula dada. Esta figura resalta dos puntos: (a) que los valores de las diferentes expresiones de tendencia central pueden variar significativamente y (b) que dos distribuciones bastante diferentes pueden tener la misma media aritmética o mediana, etc. <sup>(17)</sup>

### 4.6.3 Métodos de medición del tamaño de partículas

Los métodos para medir el tamaño de las partículas dependen del dispositivo de medida utilizado, y la elección del más apropiado obedece al tamaño de partícula que se desea obtener.



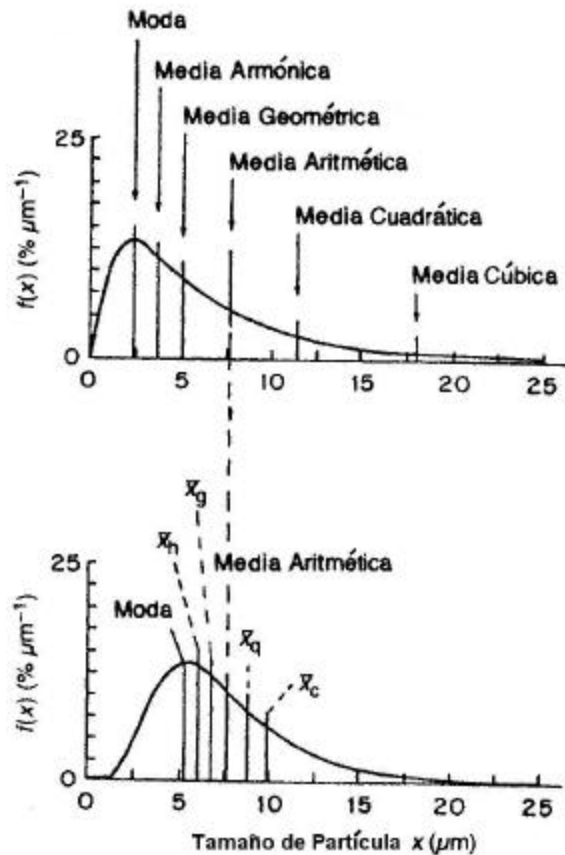


Figura 4.20 Comparación entre las medidas de tendencia central.<sup>(17)</sup>

#### 4.6.3.1 Tamizado<sup>(17)</sup>

El tamizado seco usando tamices tejidos de alambre es un método simple y económico de análisis de tamaño conveniente para partículas de tamaño mayor a 45  $\mu\text{m}$ . El tamizado da una distribución másica y un tamaño conocido como el diámetro de tamiz, el cual depende de la anchura máxima y espesor máximo de la partícula. Los tamices modernos más comunes están en tamaños tales que la proporción al tamaño del tamiz adyacente es la raíz cuarta de dos (45, 53, 63, 75, 90, 107  $\mu\text{m}$ ). Si se siguen los procedimientos estándares con cuidado, el tamizado resulta fiable y el análisis de tamaño obtenido es reproducible. El tamizado por corriente de aire, en el que el polvo en el tamiz fluye por miedo del aire, puede lograr un análisis para partículas por debajo de 20  $\mu\text{m}$ . Un análisis para partículas aún menores (por debajo de 5  $\mu\text{m}$ ) se puede lograr mediante el tamizado húmedo en el que la muestra de polvo se suspende en un líquido.

#### 4.6.3.2 Difracción láser <sup>(17)</sup>

Este método consiste en el paso de la luz a través de una suspensión, el ángulo de difracción es inversamente proporcional al tamaño de la partícula. El instrumento a utilizar consiste de un láser como fuente de luz coherente de longitud de onda fija conocida (típicamente  $0.63 \mu\text{m}$ ), un detector adecuado (normalmente de silicio fotosensible) con varios detectores discretos, y algunos medios para pasar la muestra de partículas a través del rayo de luz láser (la suspensión de las partículas puede ser en líquidos o en gases).

Para relacionar el ángulo de difracción con el tamaño de la partícula, los instrumentos se rigen por la teoría de Fraunhofer, la cual puede dar lugar a errores grandes bajo algunas circunstancias (por ejemplo cuando los índices de refracción del material de la partícula y el medio de suspensión se acercan uno del otro). Los instrumentos modernos usan la teoría Mie para la interacción de la luz con la materia. Esto permite clasificar las partículas según tamaños en el rango de  $0.1 - 2000 \mu\text{m}$ , con tal de que los índices de refracción del material de la partícula y el medio de suspensión sean conocidos.

Este método da una distribución de volumen y mide un diámetro conocido como el diámetro láser. El análisis del tamaño de partícula mediante la difracción láser es muy común en la industria hoy en día. El software asociado con este método permite el despliegue de una variedad de distribuciones de tamaños y medios derivados de la distribución medida originalmente.

## 5. *Antecedentes*

---

La mejor manera de caracterizar el revoque formado durante un proceso de filtración de una suspensión de sólidos, es por medio del estudio de la distribución del tamaño de partícula y de las principales características como lo son: permeabilidad, porosidad, compresibilidad, movilidad y resistencia específica.

Es por ello que hacia 1927, Kozeny propuso el modelo más simple de permeabilidad en una sola fase, el cual fue modificado por Carman posteriormente en 1937. El modelo fue desarrollado comparando la ley de Darcy y la ley de Hagen-Poiseuille para un flujo laminar estacionario, fluido incomprensible y a través de un conjunto de tubos capilares circulares.

Glenn y Slusser<sup>(18)</sup> presentaron en 1957 sus estudios en relación con los factores que afectan la productividad de los pozos, los cuales fueron divididos en dos partes.

La primera parte de dicho estudio trata acerca de la filtración de fluidos de perforación, donde se concluye que el periodo de filtración se realiza en tres etapas: un periodo de pérdida súbita, donde ocurre la pérdida de filtrado a una velocidad elevada con respecto a las siguientes etapas; seguido de un período donde la torta formada no posee un espesor uniforme y un último período de filtración a presión constante.

La conclusión más importante obtenida en esta primera parte del trabajo fue que las partículas del lodo forman puentes en los poros de la formación durante la primera etapa de filtración y que la formación del revoque ocurre durante las etapas subsiguientes; además que la pérdida inicial de filtrado aumenta con la permeabilidad y la presión diferencial.

La segunda parte<sup>(19)</sup> del estudio realizado por Glenn y Slusser se relacionó con el efecto de la invasión de las partículas de los lodos de perforación en la formación, la cual puede causar daños permanentes en la permeabilidad del medio perforado. Por esto se llegó a la conclusión que para que se pueda constituir el revoque es necesario que el lodo de

perforación contenga partículas capaces de formar puentes en los poros de la formación, y así nace la importancia de determinar un tamaño de partícula adecuado para que pueda ocurrir la formación del revoque sin ocasionar daños a la formación perforada.

Sorrentino en 1997, inicia los estudios del efecto de los parámetros estadísticos de la distribución de tamaños de partículas sobre la resistencia específica y porosidad de la torta, concluyendo que variaciones leves en este parámetro puede tener como consecuencia cambios importantes tanto en la permeabilidad como en la porosidad de la torta de filtración. Parte de estos resultados se encuentran reportados en el informe titulado Estudio de la formación de revoques de fluidos de perforación con sólidos de distintas granulometrías<sup>(2)</sup>.

Luego de la presentación de dicho informe, en el laboratorio de Separaciones Mecánicas se han venido realizando diferentes estudios relacionados con la formación y caracterización de revoques. Entre los cuales se pueden mencionar Magual y Torres<sup>(5)</sup>, De Sousa y Zambrano<sup>(20)</sup>, Del Hierro y Fabiani<sup>(21)</sup>, García y Gimón<sup>(22)</sup> y Pessolano<sup>(23)</sup>.

El objetivo principal del trabajo realizado por Magual y Torres<sup>(5)</sup> sobre la formación de revoques con esferas sintéticas fue evaluar el efecto de la granulometría de ciertas esferas sintéticas sobre el espesor, la permeabilidad y la compresibilidad del revoque formado por un pseudo – lodo.

El estudio realizado reportó revoques delgados y compresibles. Las distribuciones de partículas de las esferas utilizadas eran muy similares con relación al tamaño medio de partícula, amplitud y sesgo lo que impidió investigar el efecto de estos factores sobre las características del revoque. Una variable que afectó significativamente fue la variabilidad de la viscosidad del filtrado, lo cual alteraba los cálculos de la permeabilidad notablemente.

Del análisis de los resultados reportados por Magual y Torres<sup>(5)</sup> se llegó a la conclusión que las esferas empleadas producen revoques de buenas características y con permeabilidades realmente bajas.

Posteriormente De Sousa y Zambrano<sup>(20)</sup>, realizaron un estudio titulado Formación de revoques con carbonato de calcio, que tubo como objetivo principal la determinación de la porosidad, permeabilidad y compresibilidad de revoques formados con dicho material.

Este estudio de formación de revoques se vio afectado por los siguientes factores: control de pH, temperaturas relativamente altas (120°F) y valores de viscosidad muy variables. Estos problemas hicieron que los resultados obtenidos tuviesen poco valor para el establecimiento de las tendencias que se buscaban, ya que se observó variaciones importantes entre pruebas realizadas para un mismo lodo. El valor de la pérdida de filtrado obtenido, engloba el resultado de las tres etapas de la formación del revoque: el chorro de lodo, la zona incipiente y la zona de revoque uniforme, equivalentes a las descritas por Glenn y Slusser<sup>(18)</sup>.

De los resultados se llegó a la determinación de que es necesario aislar el efecto de la etapa incipiente y tratar de resolver la variabilidad fuera de control que se observó durante la preparación del lodo de perforación para garantizar que la única incertidumbre presente sea la debida a los cambios en la granulometría o a los errores experimentales.

La principal conclusión del estudio de formación de revoques con carbonato de calcio<sup>(20)</sup> fue que la relación del tamaño de partículas de las mezclas y la proporción másica son determinantes para la obtención de una mezcla con baja permeabilidad.

Del Hierro y Fabiani<sup>(21)</sup>, se enfocaron en el efecto del tamaño de partículas de carbonato de calcio en las características del revoque, tales como, permeabilidad, porosidad, movilidad, espesor y compresibilidad. Prepararon un pseudo-lodo a partir de mezclas de carbonato de calcio de granulometría controlada, tomando como referencia tres tamaños promedios variando la desviación estándar.

Para formar el revoque, el pseudo-lodo se filtró, utilizando papel de filtro como medio filtrante, tomando datos de tiempo y volumen de filtrado durante la filtración, para el cálculo de movilidad. Luego aplicaron el método de permeación para el cálculo de la

permeabilidad y para la porosidad utilizaron la masa y la altura de la torta seca.

Las conclusiones a las que llegaron Del Hierro y Fabiani<sup>(21)</sup> con su trabajo fueron las siguientes:

- ★ La movilidad, permeabilidad y porosidad de los revoques disminuyen con el tamaño promedio de las partículas.
- ★ Los pseudo-lodos preparados con las distintas granulometrías formaron revoques lisos, delgados y con una altura que se encuentra por debajo del límite establecido (4 mm).
- ★ La desviación estándar aumenta a medida que la movilidad, permeabilidad y porosidad disminuyen.
- ★ La variedad del tamaño de partículas es determinante para obtener mezclas con baja permeabilidad.

García y Gimón<sup>(22)</sup>, desarrollaron un trabajo cuyo principal objetivo fue determinar la influencia del contenido de partículas finas en las características de revoques de carbonato de calcio. Las características que evaluaron fueron la porosidad, la permeabilidad y la movilidad, añadiendo partículas menores a la mediana ( $X_{50}$ ).

Las principales conclusiones a las que llegaron fueron:

- ★ La porosidad, permeabilidad y movilidad de los revoques formados disminuyen a medida que aumenta la diferencia de presión utilizada para la formación de los mismos.
- ★ Los revoques formados son compresibles, delgados e irregulares.

- ★ La resistencia del medio filtrante empleado aumenta con la diferencia de presión de 100 a 300 psi y disminuye de 300 a 500 psi.
- ★ La etapa incipiente determina el desarrollo de la filtración, influyendo en el volumen de filtrado y las características del revoque.

Las características de la primera etapa de formación del revoque o zona incipiente fueron tratadas ampliamente por Pessolano<sup>(23)</sup>, en su trabajo se presentó un análisis detallado sobre la primera etapa de formación del revoque conocida como etapa inicial o etapa incipiente, las principales conclusiones a las que llegó fueron:

- ★ Al incrementarse la resistencia del medio filtrante disminuye la cantidad de volumen de filtrado durante la formación del revoque.
- ★ Es necesario controlar la manera de preparación del pseudo-lodo, el tiempo de maduración y las condiciones de filtración, de tal manera de obtener reproducibilidad de las pruebas.
- ★ Al incrementar el pH del pseudo-lodo, se incrementa el volumen de filtrado.
- ★ Al incrementarse la temperatura de filtración se incrementa el volumen de filtrado.
- ★ Al incrementarse el diferencial de presión durante la filtración se incrementa el volumen de filtrado.
- ★ El tiempo de maduración del pseudo-lodo afecta directamente al tiempo incipiente y al volumen de filtrado.

Sorrentino y otros<sup>(24)</sup>, introducen el concepto de la doble permeabilidad en la caracterización del revoque, en donde se plantea que durante la etapa incipiente de formación del revoque se obtiene la mayor pérdida de volumen de filtrado, por lo cual debe existir un método de análisis de los datos de filtración que pueda representar

adecuadamente. Como principales conclusiones de este trabajo están:

- ★ Se introduce el concepto de la doble permeabilidad del revoque, que postula la existencia de dos zonas perfectamente delimitadas, una zona la constituye la fracción del revoque producido durante la etapa incipiente y la otra la fracción formada al final.
- ★ Las características de la etapa incipiente se ven fuertemente influidas por el sustrato, por lo que conviene estudiarlas directamente sobre el núcleo poroso sobre el que se usará el fluido de perforación y no sobre papel de filtro.
- ★ Mediante la técnica de permeación con agua luego de formado el revoque, se puede medir la permeabilidad global combinada de las dos zonas. Al realizarla sobre un revoque formado en el tiempo correspondiente a la etapa incipiente, permite la determinación de la permeabilidad de dicha zona.
- ★ Se introduce el uso de una corrección a la curva de filtrado que permite estimar la movilidad del revoque final.



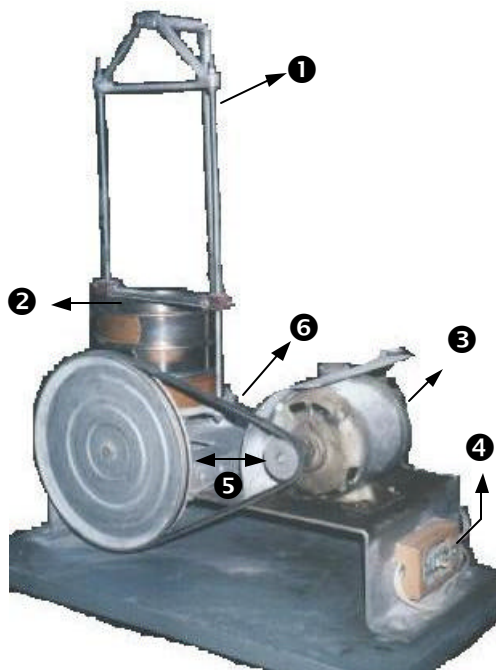
## 6. *Equipo Experimental*

---

### 6.1 Tamizador oscilatorio

Este tamizador se puede observar en la Figura 6.1, será empleado en el procedimiento de tamizado por vía seca, con la finalidad de obtener un tamaño nominal de partículas menor a  $125\mu\text{m}$ . El tamizador consta de una estructura metálica oscilante ❶ que sirve de soporte a los tamices ❷ de  $140$  y  $125\mu\text{m}$ , y a una bandeja recolectora. Los tamices se aseguran a la estructura mediante un par de seguros que se encuentran en las barras laterales.

El movimiento oscilatorio lateral de la estructura se lleva a cabo mediante un motor ❸, que es accionado por un interruptor ❹, el motor se encuentra conectado a una pequeña polea ❺ a la cual hace girar, girando a su vez otra de mayor tamaño, a la que se encuentra conectada por medio de una correa ❻.



#### Leyenda

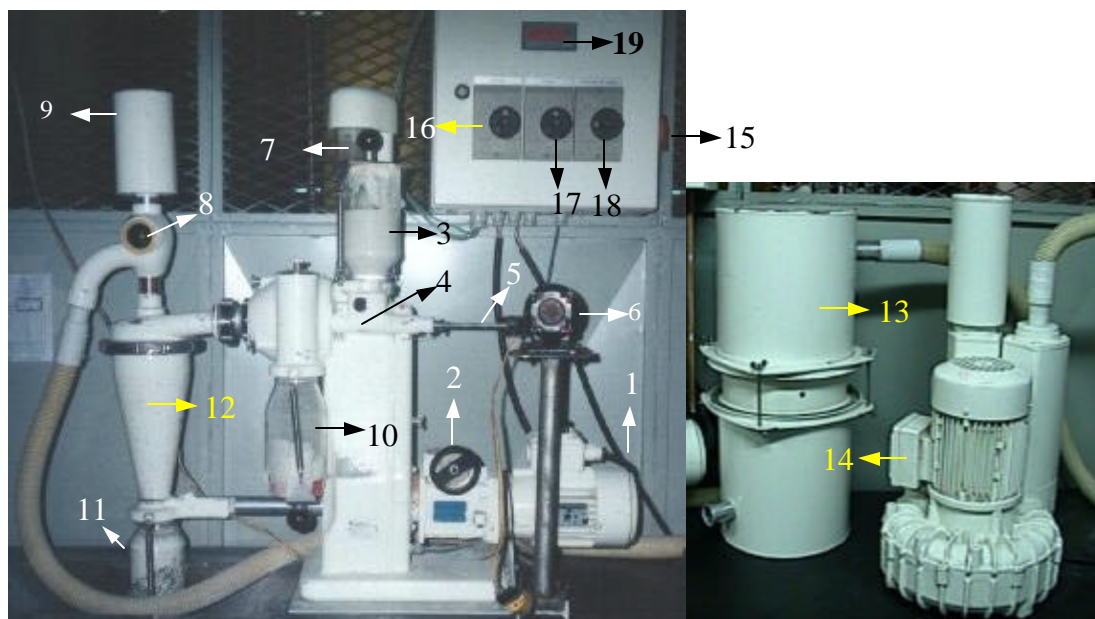
- ❶ Estructura Metálica
- ❷ Tamices
- ❸ Motor
- ❹ Interruptor
- ❺ Poleas
- ❻ Correa

**Figura 6.1** Tamizador oscilatorio.

## 6.2 Clasificador centrífugo

El clasificador centrífugo se muestra en la Figura 6.2, este equipo permite obtener fracciones estrechas en un rango comprendido entre 2,5 y 70 $\mu$ m, está constituido por un motor 1, donde se fijan las revoluciones, haciendo girar el volante de revoluciones 2. Un recipiente para la alimentación 3, la cual es introducida a la unidad de alimentación 4 reguladamente por medio de un tornillo sin fin 5 que gira gracias a un motor eléctrico 6, las partículas son arrastradas por medio de un caudal de aire medido en un rotámetro 7, controlado por medio del regulador 8, conectado a un silenciador 9. Las partículas gruesas se recogen en el recipiente para gruesos 10 y las finas en el recipiente para finos 11, las cuales son recogidas mediante un ciclón 12. El flujo de aire saliente se libera de las partículas finas al pasar por el filtro 13 accionado por el ventilador 14.

El equipo se acciona mediante un interruptor general 15, la opción de clasificación se activa mediante el interruptor 16, el ventilador por el interruptor 17 y la unidad de alimentación por el 18. La velocidad de clasificación se puede leer en el indicador 19.



**Figura 6.2** Clasificador Centrifugo

Leyenda:

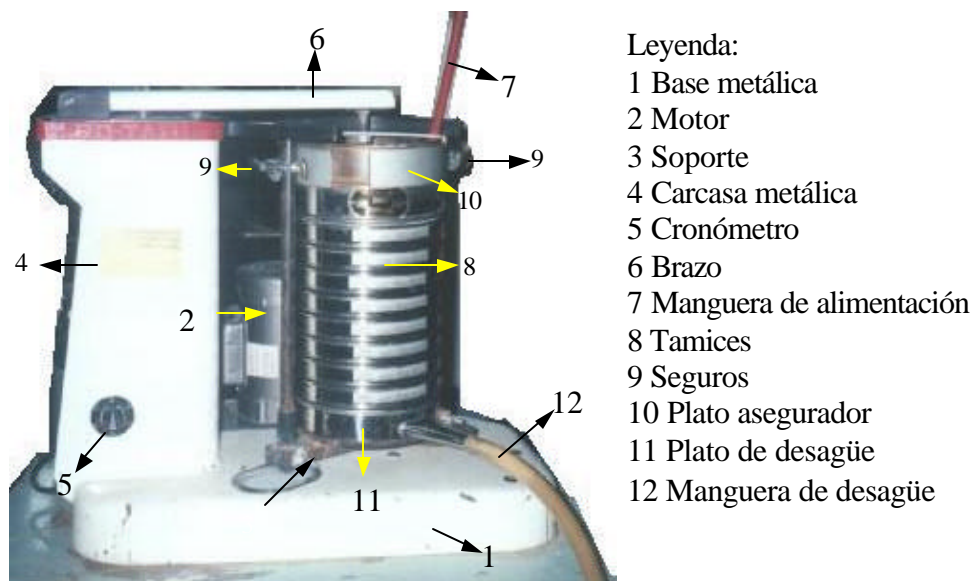
1 Motor	8 Regulador de aire	15 Interruptor general
2 Volante de revoluciones	9 Silenciador	16 Interruptor del clasificador
3 Recipiente de alimentación	10 Recipiente para gruesos	17 Interruptor del ventilador
4 Unidad de alimentación	11 Recipiente para finos	18 Interruptor de la unidad de alimentación
5 Tornillo sin fin	12 Ciclón	19 Indicador de la velocidad del clasificador
6 Motor eléctrico	13 Filtro	
7 Rotámetro	14 Ventilador	

### **6.3 Tamizador vibratorio**

El tamizador vibratorio (tamizado vía húmeda) mostrado en la Figura 6.3, se utiliza para la obtención de partículas gruesas de granulometría estrecha comprendida entre 38 y 125  $\mu\text{m}$ , las partículas se suspenden en agua para hacerlas pasar con mayor facilidad a través de los tamices. Este equipo está constituido por una base metálica 1, que sostiene al motor 2 y al soporte 3.

El movimiento se genera cuando el motor acciona los dos tubos verticales, que se encuentran dentro de la carcasa metálica 4, en la cual se ubica un contador de tiempo 5, y ocasionan que el brazo 6 golpee los tamices, generando el movimiento vibratorio.

El agua es alimentada por el tope de los tamices, por medio de una manguera de alimentación 7, y fluye a través de estos por gravedad a un caudal que debe ser ajustado previamente a 110 ml/min. El conjunto de tamices 8 está constituido por ocho platos con tamaño nominal de: 38, 45, 53, 63, 75, 90, 106 y 125  $\mu\text{m}$ , y se fija al equipo mediante dos seguros 9, en la parte superior de los tamices se coloca un plato asegurador 10, con la finalidad de sujetar la torre de tamices. En la parte inferior de los tamices se ubica un plato de desagüe 11, por el cual desemboca el agua al exterior mediante la manguera 12 luego de pasar por la torre de tamices.



**Figura 6.3** Tamizador vibratorio. Tamizado vía húmeda

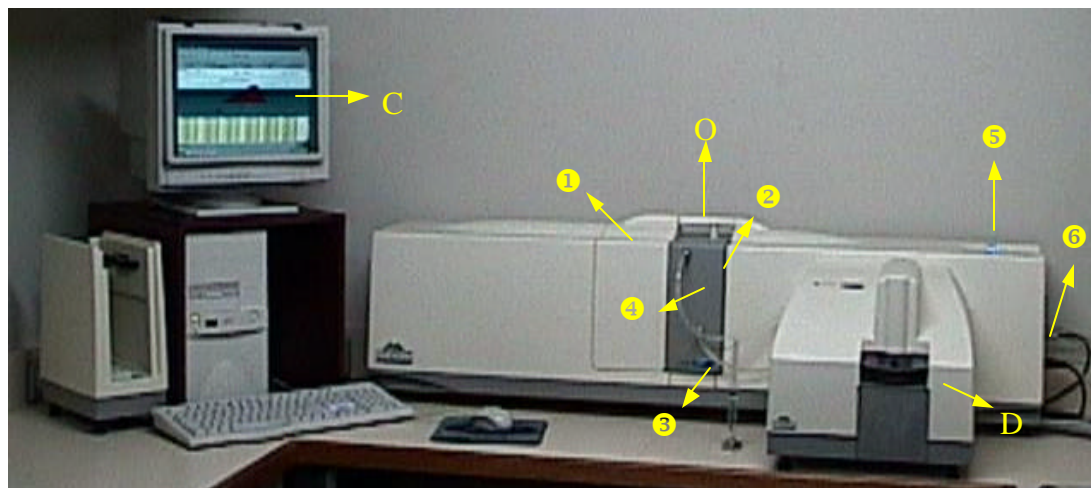
#### **6.4 Analizador de tamaño de partículas. Mastersizer 2000**

Por medio del Mastersizer 2000 (Figura 6.4) se pueden analizar las partículas de tamaños comprendidos entre 0.2 y 2000  $\mu\text{m}$ , mediante el principio de difracción láser. Consta principalmente de un mecanismo de medición láser y un computador (C), el cual contiene un software que registra la lectura láser y calcula la distribución del tamaño de partículas.

El mecanismo de medición láser se lleva a cabo primeramente en el accesorio de dispersión (D) y posteriormente en la unidad óptica (O).

El accesorio de dispersión tiene como objetivo preparar la muestra para posteriormente llevarla a la unidad óptica para ser medida. Está constituido por un protector para el área de la celda ❶ que se usa para prevenir el paso del polvo que puede contaminar la celda; una ventana de protección ❷ que impide que se deterioren los detectores internos, un drenaje ❸, una celda de tipo húmeda ❹, un indicador de poder ❺, y la terminación del panel ❻ que contiene todas las salidas digitales de la unidad óptica.

La unidad óptica tiene como función generar y recolectar la información necesaria para el análisis y la medición del tamaño de las partículas.



**Figura 6.4** Mastersizer 2000

Leyenda:

C Computador	❶ Protector de celda	❷ Celda húmeda
D Accesorio de dispersión	❸ Ventana de protección	❹ Indicador de poder
O Unidad óptica	❺ Drenaje	❻ Terminación del panel

### **6.5 Medidor de pH**

El medidor de pH se puede observar en la Figura 6.5, se utiliza con la finalidad de lograr las condiciones óptimas para el agua y la solución de agua con viscosificante, que se utiliza en la preparación del fluido de perforación o lodo, de tal manera que el viscosificante logre mantener las partículas de carbonato en suspensión hasta que se realice la filtración del lodo.

El equipo consta principalmente de un electrodo de vidrio ❶, una base ❷ para dicho electrodo y el panel ❸ que permite llevar a cabo las diversas funciones que ofrece el medidor de pH.



Leyenda:

- ❶ Electrodo de vidrio
- ❷ Base del electrodo
- ❸ Panel de control

Figura 6.5 Medidor de pH

## 6.6 Agitadores

Para la preparación adecuada de un lodo se necesita mantener una agitación a alta revolución, para mezclar de manera homogénea el agente viscosificante con el agua, sin que se forme ningún tipo de grumos que puedan arruinar el lodo.

Uno de los equipos que realizan esta función es el agitador MONOMIXER ❶ que se puede observar en la Figura 6.6a, tiene tres velocidades, mantiene una agitación constante cumpliendo así con los tiempos de agitación que son importantes para la formulación del lodo. Posee un vaso metálico ❷ que al colocarlo sobre el soporte ❸ del agitador acciona el equipo.

Con la finalidad de eliminar las burbujas que se forman por la fuerte agitación se utiliza un agitador de bajas revoluciones ❷, que se muestra en la Figura 6.6b, posee una perilla ❸ que permite regular la intensidad de la agitación y diferentes tipos de brazos de agitación ❹, que se pueden ajustar mediante una llave especial.

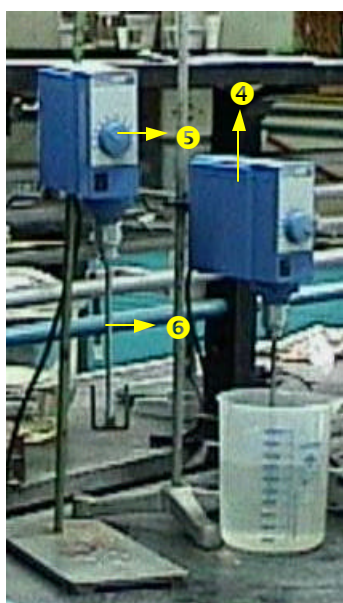
Para ambos agitadores se emplea un potencial de 110 voltios.



**Figura 6.6a** Agitador de alta revolución

Leyenda:

- ❶ Agitador MONOMIXER
- ❷ Soporte
- ❸ Vaso metálico



**Figura 6.6b** Agitador de bajas revoluciones

- ❹ Agitador de baja revolución
- ❺ Perilla
- ❻ Brazo de agitación

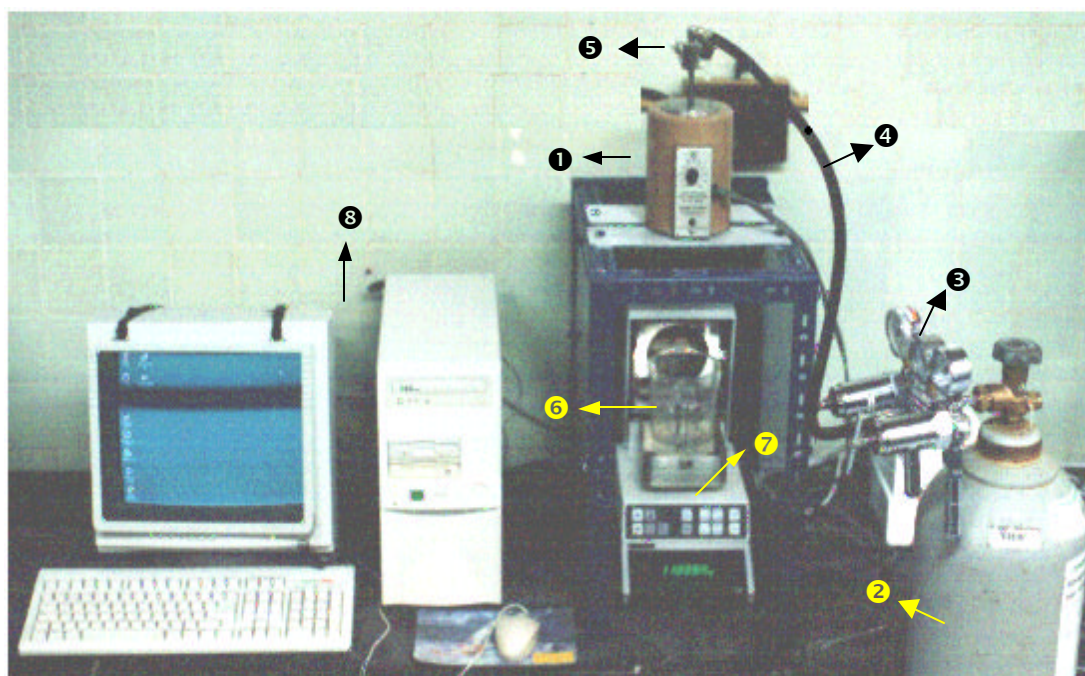
### **6.7 Equipo de filtración estática: celda HPHT**

El equipo de filtración estática, mostrado en la Figura 6.7, consta principalmente de una celda de filtración a alta presión y temperatura (HPHT), la cual se encuentra dentro de una camisa de calentamiento ❶. La presión se inyecta a la celda empleando una bombona de nitrógeno ❷, que debe contener una presión mínima de 700 psi. La presión en la bombona se mide por medio de un manómetro ❸ que se encuentra conectado a la misma y se regula por medio de otro que posee una válvula de aguja.



Al final de la manguera ④ que conecta la bombona al equipo se encuentra una válvula de purga ⑤ para aliviar la presión y así poder extraer la celda. La manguera se encuentra recubierta con una tela metálica y resiste presiones superiores a 800 psi.

El volumen de filtrado proveniente de la celda se recoge en un beaker ⑥ colocado sobre una balanza digital ⑦ (ver sección 6.8), que registra la masa de filtrado depositada en el beaker a cada instante de la filtración, y por medio de una conexión a un computador ⑧ se puede transcribir al mismo todos los valores registrados por la balanza a cada instante de tiempo.



**Figura 6.7** Equipo de filtración estática

Leyenda:	③ Manómetros	⑥ Beaker
① Camisa de calentamiento	④ Manguera	⑦ Balanza digital
② Bombona de nitrógeno	⑤ Válvula de purga	⑧ Computador

La celda de filtración (Figura 6.8) está conformada por doce pernos ①, el cuerpo ②, una tapa superior ③, una inferior ④, un aro ⑤ que se utiliza como soporte de la tapa superior cuando no se utilizan discos de cerámica, una rejilla ⑥ y dos válvulas vástagos



con sus empacaduras **7**. Esta celda también permite la realización de los procedimientos de permeación, al sustituir el lodo por agua u otro líquido libre de sólidos.

Los pernos se ajustan a la celda por medio de una pieza especial o palanca **8**, y las válvulas se aseguran a las tapas de la celda empleando una llave **9**.



Figura 6.8 Celda HPHT

Leyenda:

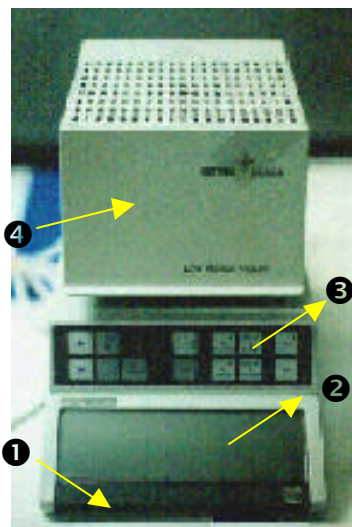
- ❶ Pernos
- ❷ Cuerpo
- ❸ Tapa superior
- ❹ Tapa inferior
- ❺ Aro
- ❻ Rejilla
- ❼ Válvula vástago
- ❽ Palanca
- ❾ Llave

### **6.8 Balanza con desecador infrarrojo**

La balanza digital con desecador infrarrojo se muestra en la Figura 6.9, se utiliza para determinar el contenido de humedad presente en una muestra y la masa de la misma. Por medio de este equipo el revoque que se forma durante la filtración se seca uniformemente a una temperatura constante. La apreciación de la balanza es  $\pm 0.001$  g.

El equipo se enciende y se apaga mediante la tecla de mando principal **1**, al encenderlo se puede visualizar en una pantalla **2** la masa que se está pesando, los valores de temperatura y tiempo de secado se controlan mediante el teclado del desecador **3** y además posee una unidad de desecación **4** constituida por una tapa y un platillo de aluminio que cumple las funciones de portamuestra.

La balanza posee una interface que le permite reportar al computador en una hoja de cálculo de Excel los valores correspondientes a la masa medida a cada intervalo de tiempo.



Leyenda:

- ❶ Tecla de mando
- ❷ Pantalla
- ❸ Teclado del desecador
- ❹ Unidad de desecación

**Figura 6.9** Balanza con desecador infrarrojo

## **6.9 Divisor de muestras PT 1000**

El divisor de muestras es empleado para separar cuantitativa y cualitativamente una muestra a granel. El equipo consta las siguientes partes principales:

- ★ Un embudo de alimentación por el cual se carga la muestra que va a ser dividida, éste sólo se emplea si el material que va a ser dividido es a granel y en forma sólida.
- ★ Un dosificador que regula la velocidad de entrada a la corona divisora, éste tiene en el panel frontal los dispositivos de encendido, regulación de vibración (en porcentaje) y cronómetro de funcionamiento.
- ★ Una corona divisora que gira a 800 rpm con la finalidad de dividir la muestra
- ★ Seis envases recolectores en los cuales se deposita la muestra dividida.

- ★ La base principal del equipo en cuyo interior se encuentra el motor que impulsa la corona giratoria. Contiene un panel frontal donde se encuentran incorporados los dispositivos de encendido y cronómetro de funcionamiento.



**Figura 6.10** Divisor de mu estras

### **6.10** Micrómetro

Este instrumento permite la medición de la altura del revoque y del papel de filtro. Tiene un rango de apreciación de  $\pm 0.001$  mm. Posee un tornillo que gira para cerrar los tubos metálicos que presionan el revoque, para obtener la altura. Permite mediciones en pulgadas o en milímetros. El botón “origin” permite la calibración del instrumento.

## **7 Procedimiento Experimental**

---

### **7.1 Tamizado en Vía Seca**

Se lleva a cabo con la finalidad de retirar las partículas mayores a 125  $\mu\text{m}$ , de la siguiente manera:

- 7.1.1 Verificar que el motor se encuentre enchufado
- 7.1.2 En un recipiente limpio y seco, pesar aproximadamente entre 200 a 250 gramos de la muestra a tamizar.
- 7.1.3 Ordenar los tamices en forma decreciente primero el de 140 $\mu\text{m}$ , luego el de 125 $\mu\text{m}$  y, por último, la bandeja recolectora.
- 7.1.4 Esparcir la muestra de manera uniforme sobre el primer tamiz (140 $\mu\text{m}$ )
- 7.1.5 Fijar los tamices con las barras laterales, apretando los seguros.
- 7.1.6 Poner en funcionamiento el tamizador accionando el interruptor.
- 7.1.7 Luego de aproximadamente 5 minutos, cuando se evidencien en el tamiz superior partículas gruesas retenidas, apagar el equipo y retirar los tamices.
- 7.1.8 Extraer la muestra de la bandeja recolectora y depositarla en un recipiente destinado para partículas menores o iguales a 125 $\mu\text{m}$ .
- 7.1.9 Desechar la muestra que quedó en los tamices.
- 7.1.10 Limpiar los tamices haciéndoles pasar aire a presión a través de ellos.

### **7.2 Clasificador Centrífugo**

Por medio de este equipo se puede obtener tamaño de partículas menores o iguales a 38 $\mu\text{m}$ . El procedimiento general de operación del clasificador centrífugo es el siguiente:

- 7.2.1 Verificar que el equipo se encuentre limpio, de lo contrario llevar a cabo los pasos 7.2.17 al 7.2.22 y luego regresar al paso 7.2.3.
- 7.2.2 Colocar el interruptor principal en encendido y el interruptor clasificador en 1.

- 7.2.3 Llenar el recipiente de alimentación con la muestra a clasificar y colocar los tres recipientes en el equipo, el de alimentación, el de finos y el de gruesos
- 7.2.4 Colocar en uno el interruptor del soplador
- 7.2.5 Activar el interruptor del rotor
- 7.2.6 Girar el volante de las revoluciones hasta conseguir la velocidad deseada
- 7.2.7 Fijar el caudal de aire necesario para lograr la separación deseada mediante el regulador de la altura del rotámetro, utilizando para ello la curva de calibración (Ver Figura 7.1).
- 7.2.8 Levantar el envase de la alimentación y colocarlo en su posición ajustando el tornillo que se encuentra debajo.
- 7.2.9 Verificar que el tornillo sin fin de la alimentación esté conectado con el motor que permite el paso de la alimentación.
- 7.2.10 Iniciar la clasificación conectando el enchufe del motor a la toma de corriente.

Una vez separada la muestra alimentada:

- 7.2.11 Colocar en cero la velocidad del aire.
- 7.2.12 Colocar en cero la velocidad del rotor.
- 7.2.13 Desactivar el interruptor del rotor.
- 7.2.14 Desconectar el motor.
- 7.2.15 Desactivar el interruptor del soplador.
- 7.2.16 Bajar el envase de la alimentación, y guardar las muestras recogidas en el envase de gruesos y en el de finos en envases identificados para ello. Finalmente limpiar el equipo.

Para la limpieza del equipo:

- 7.2.17 Desmontar el ciclón.
- 7.2.18 Activar el interruptor del soplador.
- 7.2.19 Aspirar el equipo, el ciclón, todas las partes desmontables y las interiores.
- 7.2.20 Desactivar el interruptor del soplador.
- 7.2.21 La limpieza del filtro se debe realizar fuera del laboratorio, pasándole aire a presión.
- 7.2.22 Montar de nuevo el ciclón y las partes desmontadas.
- 7.2.23 Desactivar el interruptor del clasificador y el interruptor principal.

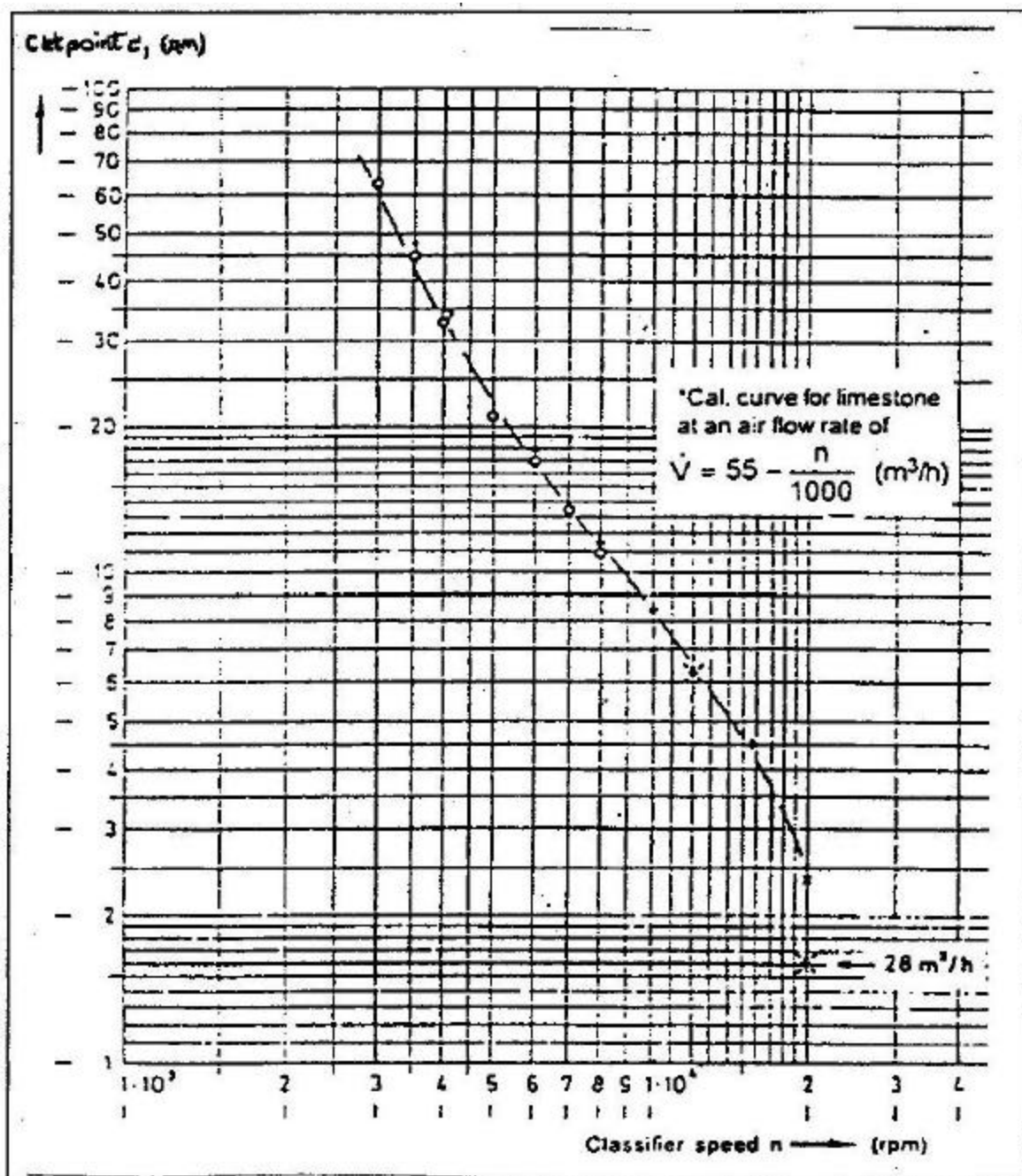


Figura 7.1 Curva de calibración del Clasificador centrífugo

### 7.3 Tamizado en vía húmeda

El procedimiento de tamizado vía húmeda permite obtener fracciones de granulometría estrecha dentro de un rango de 38-125µm, y es como sigue:

- 7.3.1 Pesar una muestra de 150 gramos.
- 7.3.2 Diluir la muestra con agua
- 7.3.3 Ordenar los tamices de mayor a menor apertura nominal: 38, 45, 53, 63, 75, 90, 106 y 125  $\mu\text{m}$ . Colocar en el tamizador vibratorio el plato de desagüe, luego la columna de tamices y por último el plato asegurador
- 7.3.4 Asegurar la columna formada por medio de los sujetadores y bajar el brazo de metal
- 7.3.5 Agregar la mezcla al plato asegurador
- 7.3.6 Encender el equipo y ajustar un tiempo de tamizado de 12 minutos por medio de los selectores
- 7.3.7 Cada tres minutos, agregar un caudal de agua durante un minuto de 110 ml/min
- 7.3.8 Transcurrido el tiempo, retirar los tamices. El contenido recogido en cada uno de ellos se recolecta de acuerdo a su fracción en recipientes debidamente identificados, empleando un pequeño caudal de agua para barrer con todo el material depositado en el tamiz. No se debe raspar el tamiz con los dedos, ni con cualquier otro instrumento
- 7.3.9 Al finalizar cada proceso de tamizado, se deben lavar los tamices empleados con abundante agua, luego se les hace pasar una corriente de aire para secarlos

#### **7.4 Diseño y simulación de mezclas**

El diseño y simulación de mezclas se realiza a partir de las granulometrías de las fracciones estrechas, utilizando el programa de Simulación de Mezclas.

#### **7.5 Preparación de mezclas**

La preparación de las mezclas se lleva a cabo empleando el divisor de muestras PT 1000, según el siguiente procedimiento:

- 7.5.1 Colocar los frascos de recolección sobre los adaptadores y ajustarlos al equipo
- 7.5.2 Activar el interruptor principal, que se encuentra en la parte posterior izquierda del divisor.
- 7.5.3 Ajustar el tiempo de marcha requerido, que se lee en el recuadro *time*, luego presionar el botón *start*
- 7.5.4 Activar el dosificador de alimentación
- 7.5.5 Ajustar el dosificador a tiempo ilimitado, que aparezca el símbolo – en el recuadro *time*.
- 7.5.6 Llenar la tolva del dosificador con la muestra a dividir.
- 7.5.7 Activar el divisor y ajustar el potenciómetro *amplitus* a la velocidad de dosificación deseada.

## **7.6 Medición de la distribución del tamaño de partícula**

La medición de la distribución del tamaño de partícula de la muestra a analizar o DTP, se realiza en el equipo Mastersizer 2000 por medio de la ayuda del técnico asignado para el laboratorio, dicho equipo arroja un análisis detallado de la muestra ( $X_{50}$ , desviación estándar, simetría, distribución de frecuencias,  $D_{3,2}$ , etc.).

## **7.7 Preparación del lodo de perforación**

El proceso para la elaboración del fluido de perforación o lodo es el siguiente:

- 7.7.1 Calibrar el pH-metro con soluciones buffers de pH 4,00; 7,00 y 9,00.
- 7.7.2 No apagar el pH-metro luego de su calibración
- 7.7.3 Pesar en la balanza desecadora, 2 g de goma xantana
- 7.7.4 Pesar 338,00 g de agua destilada en un beaker
- 7.7.5 Medir y anotar el pH inicial del agua



- 7.7.6 Agitar el agua usando el agitador de bajas revoluciones colocando la perilla de velocidad en 5
- 7.7.7 Agregar los 2 g de Goma Xantana lentamente, de forma tal que caiga justo en el remolino que se forma en el agua. No agregar cerca del eje del agitador
- 7.7.8 Continuar la agitación por un lapso de 5 minutos después de agregar la goma
- 7.7.9 Dejar reposar por 20 minutos sin agitar. No es necesario sacar el aspa de la solución
- 7.7.10 Pesar, utilizando papel encerado, 30 g de carbonato de calcio en la balanza desecadora. El carbonato puede ser una mezcla o una fracción determinada
- 7.7.11 Encender el agitador colocando el indicador en 5
- 7.7.12 Elevar el pH de la solución hasta  $9,50 \pm 0,05$ . Para ello:
- 7.7.13 Agregar una gota de solución de KOH al 0,5 N con la pipeta o el gotero, agitando la solución simultáneamente, con el indicador en la posición 5
- 7.7.14 Medir el pH de la solución
- 7.7.15 Repetir los pasos 7.6.13 y 7.6.14 hasta lograr el pH deseado ( $9,50 + 0,05$ )
- 7.7.16 Anotar el pH de la solución goma-agua
- 7.7.17 Añadir el carbonato lentamente con la espátula en el borde del remolino que se forma en la solución, para evitar que se aglomere
- 7.7.18 Agitar hasta que la mezcla esté homogénea
- 7.7.19 Agregar una o dos gotas de antiespumante
- 7.7.20 Verter la mezcla en el envase del agitador de alta revolución
- 7.7.21 Agitar en el agitador de altas revoluciones, en la posición L, por 15 minutos
- 7.7.22 Agitar en el agitador de bajas revoluciones en la posición 4 durante 3 minutos, con la finalidad de eliminar burbujas
- 7.7.23 Medir el pH del lodo y registrar el valor en la tabla de datos
- 7.7.24 Transvasar el pseudo lodo preparado a un envase de vidrio limpio y seco identificado previamente
- 7.7.25 Anotar la hora de culminación de preparación del lodo
- 7.7.26 Guardar el lodo en un sitio fresco, limpio, seco y oscuro por 24 horas
- 7.7.27 Limpiar el agitador de bajas revoluciones, el agitador de altas revoluciones y el pH-metro

7.7.28 Lavar el envase del agitador de altas revoluciones

7.7.29 Limpiar y secar todos los utensilios usados

## **7.8 Resistencia del medio limpio**

Este procedimiento permite estimar el valor de la resistencia del medio filtrante, y se realiza en la celda HPHT (High Pressure-High Temperature), así como también los procedimientos de filtración y permeación, los pasos a seguir son los siguientes:

- 7.8.1 Ajustar la temperatura de la manta de calentamiento la celda HPHT en 30 °C
- 7.8.2 Ajustar la válvula a la tapa inferior
- 7.8.3 Colocar la goma, luego la rejilla y finalmente el papel de filtro previamente humedecido con agua destilada
- 7.8.4 Acoplar el cuerpo de la celda y fijar la estructura cuerpo-tapa inferior mediante los pernos usando la palanca para apretarlos
- 7.8.5 Llenar la celda con agua destilada hasta por debajo de la goma superior
- 7.8.6 Colocar el aro y posteriormente la tapa superior con su goma y válvula, ajustarla con los pernos
- 7.8.7 Colocar la celda en la camisa de calentamiento
- 7.8.8 Conectar la bombona a la celda
- 7.8.9 Abrir la válvula de la bombona
- 7.8.10 Regular con la válvula de aguja del manómetro una presión de 100 psi
- 7.8.11 Abrir la válvula superior de la celda media vuelta
- 7.8.12 Verificar que la balanza esté encendida y que la interface de la computadora esté conectada
- 7.8.13 Colocar el recipiente para recolectar el filtrado sobre la balanza y tararla.
- 7.8.14 Activar el programa de software de la balanza y programarla para que adquiera el valor de la masa filtrada cada segundo.
- 7.8.15 Abrir el vástago de la válvula inferior media vuelta
- 7.8.16 Guardar los datos obtenidos en una hoja de excel
- 7.8.17 Esperar a que termine de salir el filtrado

- 7.8.18 Cerrar la válvula inferior
- 7.8.19 Cerrar la válvula de aguja
- 7.8.20 Abrir la válvula de alivio
- 7.8.21 Desmontar la parte superior de la celda.

## **7.9 Filtración del lodo**

La filtración del lodo de perforación se lleva a cabo en 24 horas aproximadamente después de haber preparado el lodo. El procedimiento que se debe cumplir es el siguiente:

- 7.9.1 Colocar el lodo en el agitador de baja revolución (velocidad 4 o 5) y agitarlo durante 1 hora.
- 7.9.2 Luego de haber realizado la prueba correspondiente a la resistencia del medio limpio. Agregar aproximadamente 50 ml de lodo en la celda.
- 7.9.3 Ensamblar la parte superior de la celda, y ajustar la tapa con los pernos.
- 7.9.4 Colocar la celda en la camisa de calentamiento.
- 7.9.5 Conectar la fuente de gas con presión regulada al vástago de la válvula superior de la celda.
- 7.9.6 Abrir la válvula de la bombona de gas.
- 7.9.7 Regular con la válvula de aguja una presión de 500 psi.
- 7.9.8 Abrir la válvula superior de la celda.
- 7.9.9 Verificar que la balanza esté enchufada y conectada a la computadora. Programar el software Balancelink para que registre la masa recogida cada 30 seg.
- 7.9.10 Colocar el recipiente para recolectar el filtrado sobre la balanza y tararla.
- 7.9.11 Simultáneamente, abrir el vástago de la válvula inferior media vuelta e iniciar la recolección de datos en la computadora.
- 7.9.12 Anotar el valor medido en la balanza para el tiempo cero.
- 7.9.13 Detener la filtración a los 1800 segundos (30 min), para ello se debe cerrar la válvula inferior, luego cerrar la válvula superior y detener la recolección de datos.
- 7.9.14 Cerrar el regulador de presión, purgar la manguera que lo conecta a la válvula y desconectarlo del vástago de la válvula superior.

- 7.9.15 Abrir lentamente la válvula superior y esperar a que se libere toda la presión. Sacar la celda de la camisa.
- 7.9.16 Abrir la parte superior de la celda.

### **7.10 Permeación del revoque**

Luego de haber realizado la filtración del lodo, se procede a permear el revoque formado mediante el paso de agua. Para determinar la permeabilidad del revoque. Los pasos a seguir son los siguientes:

- 7.10.1 Retirar todo el lodo que haya quedado, cuidando de no ocasionar daños al revoque.
- 7.10.2 Añadir agua destilada para realizar el lavado de la superficie.
- 7.10.3 Agregar 100 ml de agua destilada dentro de la celda. Cerrar la parte superior de la celda.
- 7.10.4 Colocar la celda en la camisa de calentamiento
- 7.10.5 Regular la presión de la celda en 500 psi.
- 7.10.6 Repetir los pasos 6.17.8 al 6.17.12
- 7.10.7 Detener la prueba cuando hayan transcurrido 10 minutos, para ello se debe cerrar la válvula inferior, luego la válvula superior y detener el registro de datos.
- 7.10.8 Cerrar el regulador de presión, purgar la manguera que lo conecta a la válvula y desconectarlo del vástago de la válvula superior.
- 7.10.9 Abrir la parte superior de la celda.
- 7.10.10 Recoger la torta
- 7.10.11 Lavar la celda.

### **7.11 Uso del desecador infrarrojo**

- 7.11.1 Conectar la balanza analítica al desecador y activar el desecador
- 7.11.2 Oprimir el botón de temperatura y verificar que se encuentre en 70C, sino es así llevarla a este valor
- 7.11.3 Oprimir Enter

- 7.11.4 Tarar la balanza
- 7.11.5 Colocar el revoque obtenido luego de haber sido permeado
- 7.11.6 Cerrar el desecador
- 7.11.7 Mantener oprimida la tecla start hasta que la luz del botón deje de titilar
- 7.11.8 Esperar a que la luz vuelva a titilar
- 7.11.9 Oprimir el botón que se encuentra encima del botón enter, para leer la masa del revoque. Anotar la masa
- 7.11.10 Retirar el revoque del desecador.
- 7.11.11 Apagar el desecador

## 8 *Metodología*

---

La metodología que se llevó a cabo para cumplir con los objetivos de este trabajo especial de grado, fue la siguiente:

- 8.1 Revisión bibliográfica sobre los siguientes temas:
  - 8.1.1 Fluidos de perforación,
  - 8.1.2 Fundamentos de filtración,
  - 8.1.3 Medición de tamaño de partículas,
  - 8.1.4 Clasificación de tamaños.
- 8.2 Familiarizarse con los equipos de clasificación de tamaño de partículas, de preparación de lodo y de filtración a utilizar.
- 8.3 Realizar las pruebas preliminares que garanticen la reproducibilidad de los resultados.
- 8.4 Diseñar las series de mezclas a analizar, estableciendo grupos de mezclas de características bien definidas que permitan identificar las características de las granulometrías que más influyen sobre las características del revoque.
- 8.5 Preparar fluidos de perforación de manera reproducible, controlando las principales variables de formulación.
- 8.6 Filtrar los lodos preparados sobre papel y sobre membranas utilizando celdas HPHT (High Pressure-High Temperature) para formar los revoques a analizar.
- 8.7 Caracterizar los revoques mediante la determinación de su permeabilidad y su porosidad.

8.8 Discutir los resultados y analizar las tendencias obtenidas, a fin de diseñar nuevas mezclas.

8.9 Redacción del informe.

8.10 Presentación.

## 9 *Plan de Experiencias*

---

En esta sección se presentan los pasos seguidos para el cumplimiento de los objetivos planteados en este trabajo especial de grado:

- 9.1 Realización de pruebas de tamizado vía seca para los diferentes grados del carbonato Intecarb CM 1015, CM 2025, CM 3035 y CM 4045, de manera de obtener partículas menores a 125  $\mu\text{m}$ .
- 9.2 Realización de pruebas de clasificación de tamaño para la obtención de las fracciones estrechas, mediante la clasificación centrífuga y el tamizado vía húmeda.
- 9.3 Obtención de la distribución del tamaño de partícula mediante el equipo de difracción láser Mastersizer 2000, para las muestras producidas del tamizado en seco y para las fracciones de los procesos de clasificación centrífuga y tamizado vía húmeda.
- 9.4 Diseño y simulación de las mezclas. Se definieron nueve mezclas a partir de la combinación de las fracciones estrechas y una a partir del material obtenido del procedimiento de tamizado en seco.
- 9.5 Obtención de la distribución del tamaño de partícula de las mezclas simuladas a partir del equipo Mastersizer2000.
- 9.6 Comparación de la distribución de tamaño de partícula arrojada por Mastersizer con las obtenidas mediante el proceso de diseño y simulación de mezclas.
- 9.7 Preparación de lodos a partir del material obtenido del tamizado vía seca para cada uno de los diferentes grados del carbonato Intecarb, a los cuales se llamaran bases, y también a partir de las mezclas diseñadas con las fracciones estrechas obtenidas.



- 9.8 Ejecución de pruebas para cada lodo formulado, en la celda HPHT. Todas las pruebas se realizaron a una temperatura de 30°C. Se realizaron en total 49 pruebas, cada una de las cuales se subdivide en tres:
- 9.8.1 Permeación del medio limpio (papel de filtro) con agua. Esta prueba se llevó a cabo a un diferencial de presión de 100 psi, recopilando datos de filtrado cada segundo hasta vaciar la celda.
  - 9.8.2 Formación de la torta. Esta prueba se llevó a cabo en un tiempo de 30 minutos, a un diferencial de presión de 500 psi y recopilando datos de filtrado cada 5 segundos.
  - 9.8.3 Permeación del revoque formado. Se llevó a cabo a 500 psi de presión, durante un tiempo de 10 minutos, recopilando datos cada 5 segundos.
- 9.9 Análisis de datos y representación de resultados.

## 10 Descripción de Mezclas

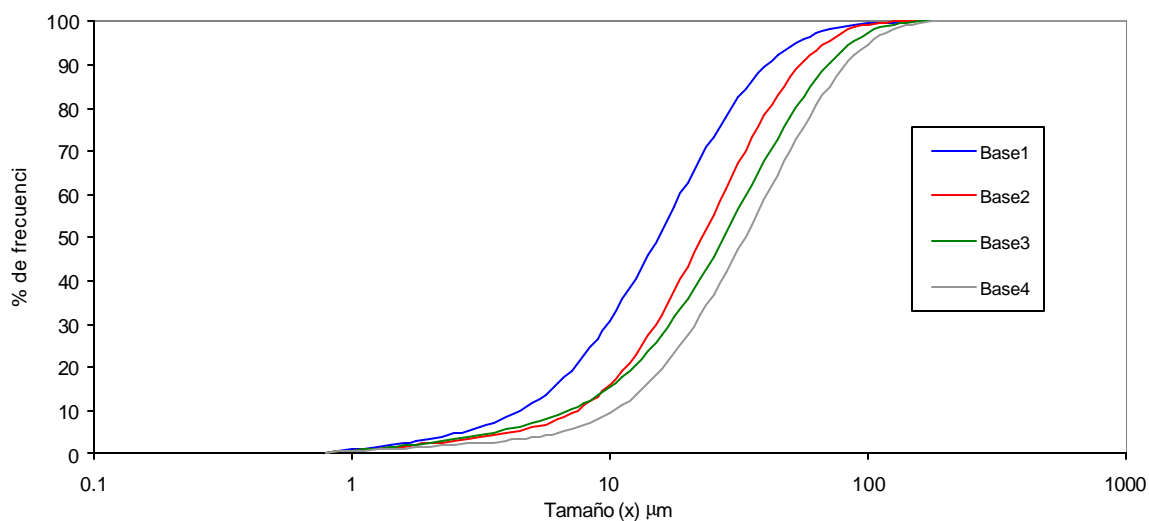
Las mezclas se diseñaron y simularon a partir de las granulometrías bases del carbonato comercial Intecarb grados: CM 1015, 2025, 3035 y 4045 y sus fracciones estrechas obtenidas de los procesos de clasificación centrífuga y tamizado vía húmeda. Para efectos de este estudio dichas granulometrías bases se denominaran base 1, base 2, base 3 y base 4, respectivamente.

En total se trabajo con 12 fracciones estrechas con tamaños promedios de 3,5 a 113  $\mu\text{m}$ , los cuales se refieren a la media nominal de la distribución de tamaño de partícula o  $X_{50}$ , del proceso de clasificación centrífuga se generaron seis fracciones y las otras seis del proceso de tamizado vía húmeda. En la Tabla 10.1, se muestra de manera esquemática la descripción de las fracciones estrechas escogidas para la preparación de las mezclas.

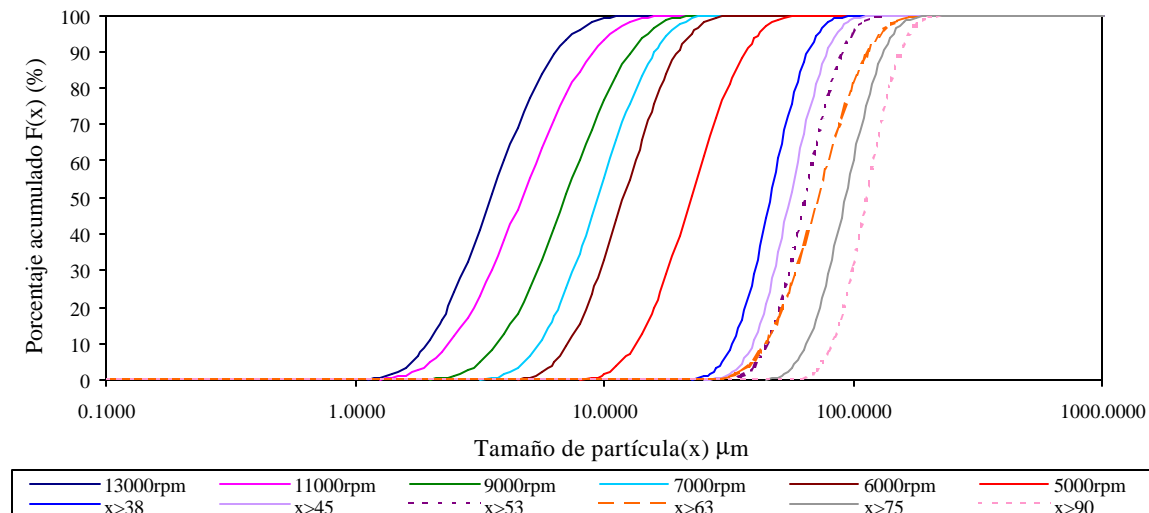
**Tabla 10.1** Fracciones estrechas

Grado del carbonato Intecarb de procedencia	Proceso de clasificación		Tamaño promedio $X_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )
1015	Clasificación centrífuga (clasificación de menor a mayor rpm)	a 13000 rpm	3,5
		a 11000 rpm	4,7
		a 9000 rpm	7,0
2025		a 7000 rpm	9,5
		a 6000 rpm	12,0
		a 5000 rpm	22,4
3035	Tamizado vía húmeda	38 $\mu\text{m}$ <x< 45 $\mu\text{m}$	46,6
		45 $\mu\text{m}$ <x< 53 $\mu\text{m}$	55,8
		53 $\mu\text{m}$ <x< 63 $\mu\text{m}$	64,1
4045		63 $\mu\text{m}$ <x< 75 $\mu\text{m}$	72,0
		75 $\mu\text{m}$ <x< 90 $\mu\text{m}$	93,1
		90 $\mu\text{m}$ <x< 106 $\mu\text{m}$	113,1

Las granulometrías definidas como bases son las procedentes del proceso de tamizado vía seca donde se obtienen partículas menores a 125  $\mu\text{m}$ . En la Figura 10.1, se puede observar las granulometrías de las bases y en la Figura 10.2 las de las fracciones estrechas escogidas para la preparación de las mezclas.



**Figura 10.1** Distribución del tamaño de partículas para las bases



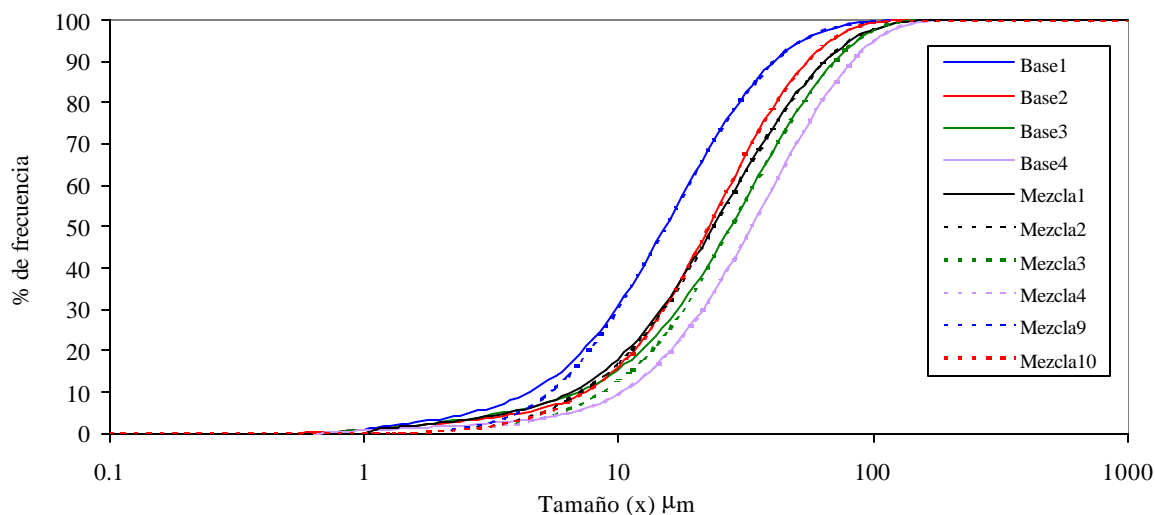
**Figura 10.2** Distribución del tamaño de partículas (DTP) para las fracciones estrechas

Se formularon diez mezclas de las cuales se trabajaron con 8, ya que dos de ellas generaron lodos que no pudieron ser filtrados para formar una torta durante un tiempo de treinta minutos.

Se diseñaron mezclas tomando como guía las granulometrías bases a partir de las fracciones estrechas, obteniendo primeramente cuatro, una por cada base, y adicionalmente se formuló una mezcla equimásica de las cuatro bases, denominada mezcla 1, de la cual también se diseñó una mezcla. Estas mezclas diseñadas tomando como guía las bases y la mezcla1, se denominaran reconstituidas, ya que por medio de estas se trató de reproducir o reconstituir las granulometrías bases.

Se diseñaron las mezclas reconstituidas de la base 1 y 2, identificadas como 9 y 10, pero los lodos preparados a partir de las mismas generaron un revoque altamente permeable, que no se pudo formar durante un lapso de 30 minutos, por lo cual fueron descartadas del análisis.

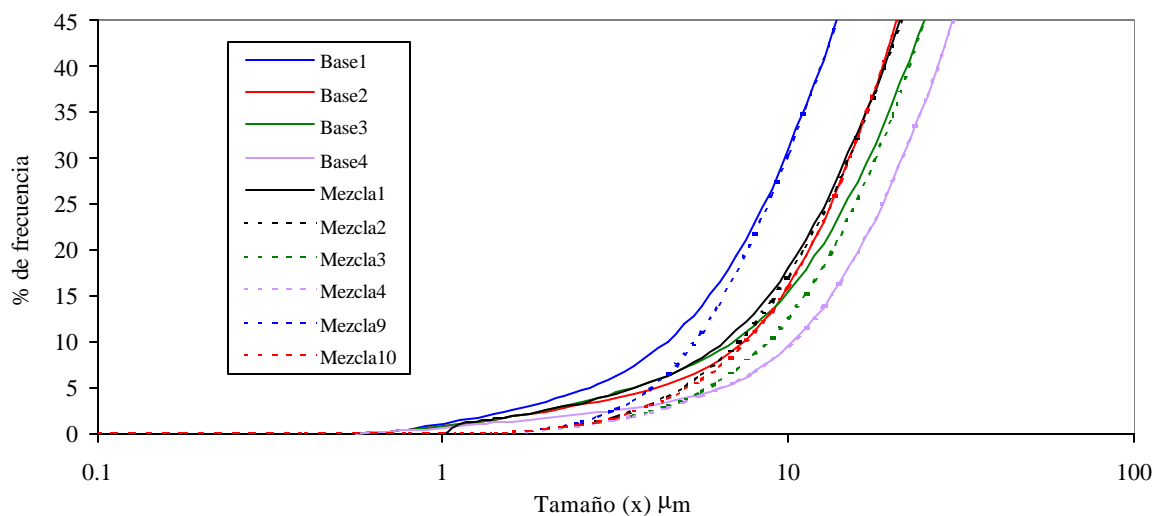
La mezcla reconstituida de la mezcla 1 es la mezcla 2, de la base 3 es la mezcla 3 y de la base 4 es la mezcla 4. En la Figura 10.3, se puede observar la comparación de las granulometrías bases con sus respectivas mezclas reconstituidas.



**Figura 10.3** DTP de las bases y sus mezclas reconstituidas.

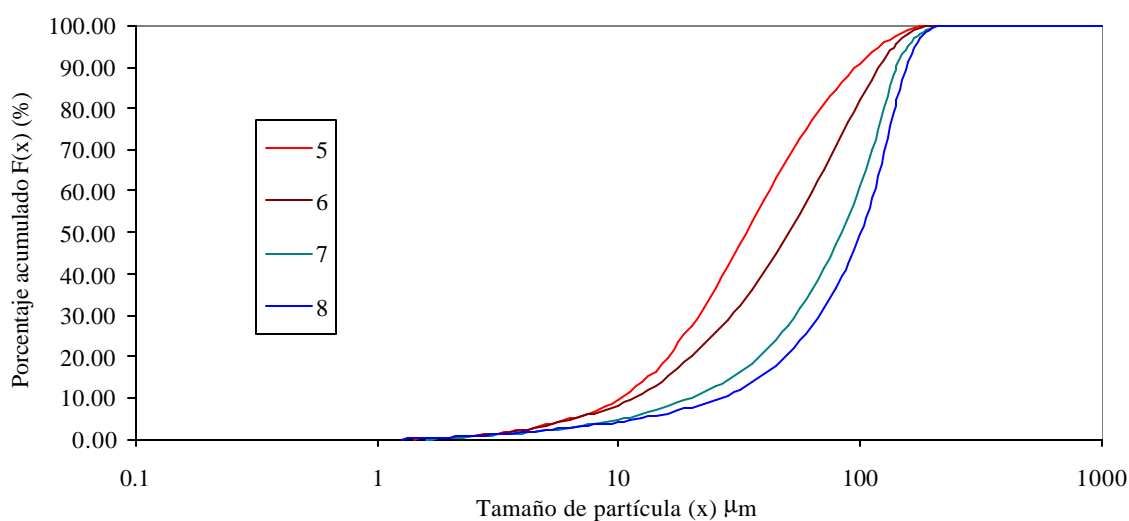
Como se puede observar las mezclas reconstituidas no poseen exactamente la misma granulometría de las bases, esto se debe a que las partículas finas menores a  $1,3 \mu\text{m}$  contenidas en las bases no pudieron ser conseguidas mediante el proceso de clasificación centrífuga, puesto que se pierden durante la clasificación, la fracción estrecha más fina

obtenida fue a 13000 rpm, la cual presentó un tamaño promedio  $X_{50}$  igual a  $3,5 \mu\text{m}$ , con tamaños de partículas contenidos entre  $1,3$  y  $11,3 \mu\text{m}$ . En la Figura 10.4 se muestra un acercamiento de la Figura 10.3, de tal manera de poder observar más fácil la diferencia entre las bases y sus mezclas reconstituidas.



**Figura 10.4** Zoom de las DTP de las bases y sus mezclas reconstituidas.

Las otras mezclas diseñadas poseen un tamaño promedio mayor a los que presentan las bases, es decir poseen un mayor porcentaje de gruesos (partículas mayores a  $38 \mu\text{m}$ ) que el contenido en las bases. En la Figura 10.5, se puede observar la DTP de estas mezclas.



**Figura 10.5** DTP de las mezclas 5, 6, 7 y 8

En la Tabla 10.2, se puede observar la composición de cada una de las mezclas diseñadas en función de las fracciones estrechas añadidas por cada 30 gramos de mezcla.

**Tabla 10.2** Composición de las mezclas diseñadas a partir de las fracciones estrechas.

Masa (g) Fracción	MEZCLAS DISEÑADAS						
	2	3	4	5	6	7	8
13000 rpm	1,087	0,843	0,815	1,450	0,900	0,622	0,809
11000 rpm	0	0	0	0	0	0,026	0
9000 rpm	1,432	1,048	1,179	0	0,953	0,246	0,156
7000 rpm	4,931	3,345	1,630	1,678	1,264	0,887	0,027
6000 rpm	0	0	0	0,685	0	0	0,837
5000 rpm	13,732	13,797	12,201	11,880	7,561	3,397	1,534
38 <x< 45 $\mu\text{m}$	5,535	6,594	8,190	7,541	5,569	1,832	5,080
45 <x< 53 $\mu\text{m}$	0	0	0	0,452	0	5,888	0
53 <x< 63 $\mu\text{m}$	1,638	2,463	2,068	0,020	4,558	0,203	0
63 <x< 75 $\mu\text{m}$	0	0	0	1,278	0	0	0
75 <x< 90 $\mu\text{m}$	1,645	1,911	3,917	3,121	3,613	0	0
90<x<106 $\mu\text{m}$	0	0	0	1,896	5,581	16,898	21,557

## **11      *Análisis de Datos***

---

Antes de discutir los resultados obtenidos, es importante realizar un análisis de los datos, ya que por medio de estos se puede de alguna manera establecer la validez y/o confiabilidad de los resultados.

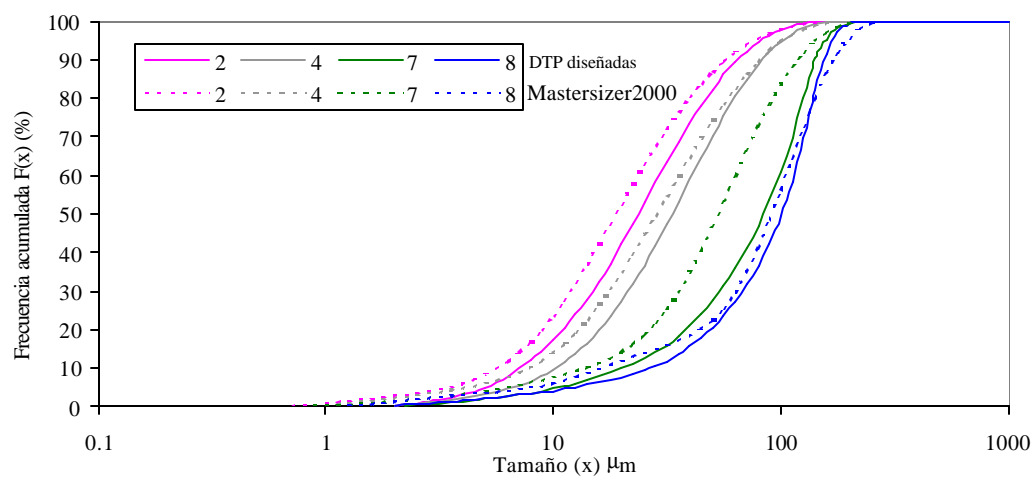
El análisis de los datos se va a llevar a cabo mediante el estudio de varias variables como los son: las granulometrías de las mezclas diseñadas, el volumen de filtrado, altura del revoque y masa del revoque.

### **11.1 Distribución del tamaño de partícula de las mezclas diseñadas.**

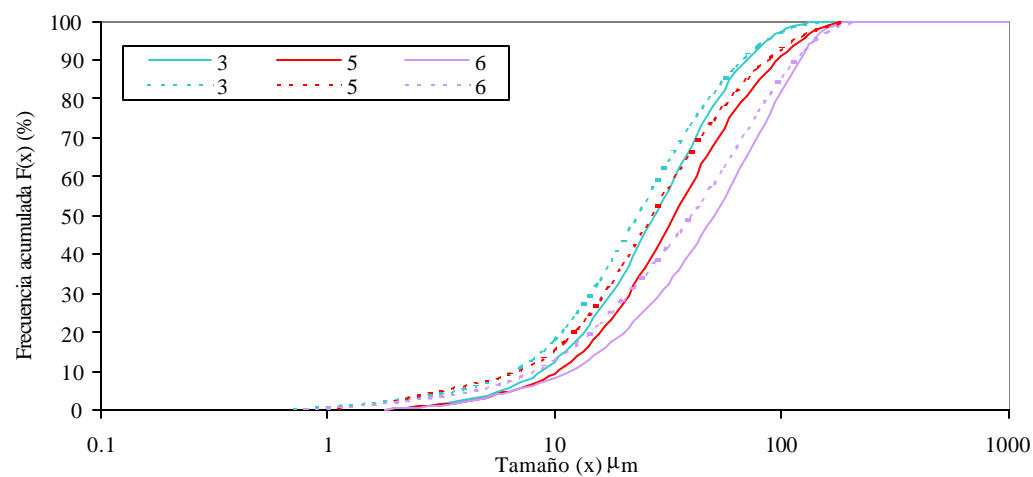
A pesar que se tiene la certeza de que las partículas menores a  $1,3 \mu\text{m}$ , que desde ahora se denominaran “ultrafinos”, se pierden durante el proceso de clasificación centrífuga; al analizar las granulometrías de las mezclas diseñadas a partir de las fracciones estrechas por medio del equipo de difracción láser Mastersizer 2000, las DTP resultante agrega esta cola de finos, desplazando al mismo tiempo la curva de forma paralela disminuyendo un poco el  $X_{50}$ . De todas formas, el estudio se siguió con las granulometrías obtenidas por Mastersizer, aunque se repitieron las mediciones de las mezclas diseñadas, arrojando resultados similares.

En la Figura 11.1, se observa la diferencia entre las granulometrías obtenidas por Mastersizer2000 para las diferentes mezclas con las obtenidas mediante la simulación y diseño.

En la Figura 11.2 se muestra la representación de los tamaños de partículas obtenidas por Mastersizer para todas las mezclas en función de la densidad de frecuencia  $f(x)$ , en la cual se puede evidenciar que las mezclas diseñadas son mezclas monomodales amplias, puesto que poseen una sola moda e incluyen un rango de tamaños grande o amplio.

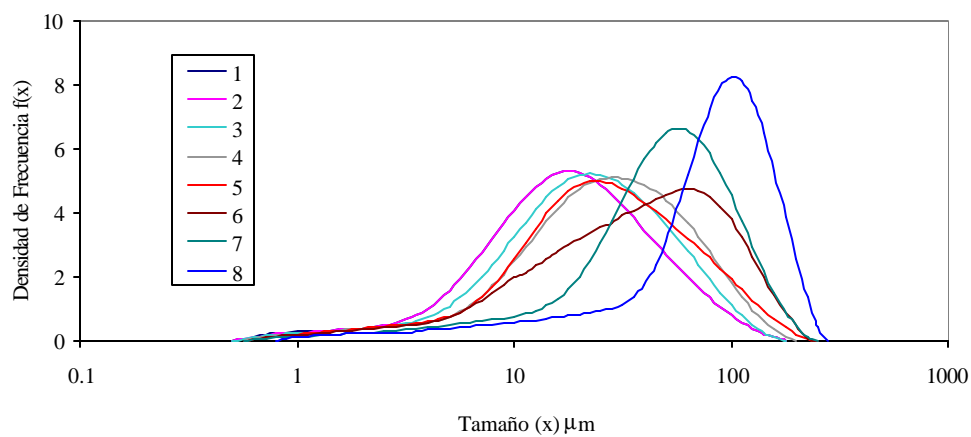


(a)



(b)

**Figura 11.1** Comparación de la DTP obtenida de las mezclas diseñadas y las arrojadas por Mastersizer 2000, a) mezclas 2, 4, 7 y 8, b) mezclas 3, 5 y 6



**Figura 11.2** Distribución del tamaño de partícula en función de la densidad de frecuencias.



## **11.2 Volumen de filtrado**

El volumen de filtrado obtenido para cada filtración fue medido cada 5 segundos durante 30 minutos, utilizando el programa BalanceLink, el cual por medio de una conexión de la balanza digital a un computador puede registrar los datos de masa de filtrado a cada instante medidos por la balanza en una hoja de cálculo de Excel.

Debido a que la densidad de filtrado es aproximadamente igual a  $1 \text{ g/cm}^3$ , según pruebas previas realizadas anteriormente<sup>(23)</sup>, el valor registrado como masa de filtrado en gramos se empleó directamente como volumen de filtrado.

Las variaciones entre los volúmenes de filtrado obtenidos a los treinta minutos para un mismo lodo, se pueden atribuir a posibles cambios en la temperatura, puesto que otras variables como: la presión, volumen de lodo introducido en la celda y apertura de las válvulas, que son las que pueden influir en la obtención de un determinado volumen de filtrado para un mismo lodo al que se realiza filtraciones de manera simultánea, se mantuvieron relativamente constantes, ya que son fácilmente ajustadas por el operador, en cambio la temperatura que brinda la chaqueta a la celda no se mantiene constante, sino que varía durante el transcurso de la filtración, en un rango pequeño ( $5^\circ\text{C}$ ) pero varía. Según trabajos realizados anteriormente<sup>(24)</sup>, la temperatura de filtración afecta directamente en la cantidad de volumen de filtrado, si aumenta la temperatura aumenta el volumen de filtrado.

### **11.2.1 Volúmenes de filtrado obtenidos para las bases y la mezcla 1**

Los volúmenes de filtrado obtenidos a los treinta minutos de filtración para los lodos preparados con las bases y la mezcla 1 se muestran en la Tabla 11.1. Como se puede observar se mantiene relativamente constante, ya que el coeficiente de variabilidad obtenido es pequeño, lo cual puede garantizar la reproducibilidad de los resultados.

**Tabla 11.1** Volúmenes de filtrado obtenidos para las filtraciones de las bases y la mezcla 1.

Pruebas	Volumen de filtrado a los treinta minutos $V_L$ (cm <sup>3</sup> )				
	Base 1	Base 2	Mezcla 1	Base 3	Base 4
1	11,1	10,6	11,5	11,7	16,5
2	11,5	11,6	12,0	11,4	16,4
3	11,7	12,8	11,1	11,8	10,8
4	11,9	10,4	11,9	10,7	15,4
5	11,6	10,9		11,8	14,2
6	12,5			11,9	15,0
7	11,8			11,1	13,8
Coefficiente de variabilidad CV (%)	3,7	8,6	3,4	4,0	13,5
Promedio	11,7	11,3	11,6	11,5	14,6

### 11.2.2 Volúmenes de filtrado obtenidos para las mezclas diseñadas.

En el caso de las mezclas diseñadas a partir de las fracciones estrechas, se obtuvo mayor variabilidad, la cual se puede atribuir, como se dijo anteriormente a la variación de la temperatura de filtración, o en este caso particularmente al volumen de lodo contenido en la celda, puesto que para las primeras filtraciones correspondientes a las de las mezclas 2 y 3, primero se intentó filtrar agregando un volumen de lodo de 50 ml a la celda, el cual fue insuficiente, puesto que antes que se alcanzara los treinta minutos se había filtrado todo el lodo, luego de este intento se cargó la celda con 100 ml de lodo en lugar de 50 ml, y fue cuando se pudo filtrar durante el tiempo establecido para la formación de la torta.

Debido a lo ocurrido durante las filtraciones de las mezclas 2 y 3, la filtración del lodo preparado con la mezcla 4, se llevó a cabo filtrando en la primera prueba con un volumen de lodo de 100 ml, y en la segunda y tercera con un volumen de 75 ml, como se puede observar en la Tabla 11.2 los datos obtenidos de volumen de filtrado a los treinta

minutos para cada una de las pruebas conlleva a inferir que el contenido de lodo agregado dentro de la celda influye en la cantidad de volumen de filtrado conseguido, por lo cual en las pruebas siguientes que se llevaron a cabo para las mezclas 5, 6, 7 y 8, se agregó la misma cantidad de lodo a la celda (75 ml), de tal manera de observar como se comportaba el volumen de filtrado, y como se muestra en la Tabla 11.2, la desviación estándar obtenida para estos casos resultó menor que la generada para la mezcla 4.

**Tabla 11.2** Volumen de filtrado obtenido para las mezclas diseñadas a partir de las fracciones estrechas.

		Volumen de filtrado a los treinta minutos $V_L$ (cm <sup>3</sup> )					
Mezclas Pruebas	2	3	4	5	6	7	8
1	31,3	31,4	44,0	48,0	26,7	20,0	41,5
2			65,0	58,4	41,3	27,5	28,7
3			59,9	61,8	35,8	22,2	47,1
4				60,1	40,5	34,2	44,3
Desviación estándar	--	--	11,0	6,2	6,7	6,3	8,2
Promedio	31,3	31,4	56,3	57,1	36,1	26	40,4

### 11.3 Altura del revoque

La altura del revoque se obtiene empleando el micrómetro mostrado en la Figura 11.3. Para cada revoque se midió la altura en diferentes puntos de la torta y el valor utilizado para los cálculos fue el valor promedio de las mediciones. En el apéndice A.4, se muestra las alturas obtenidas para cada revoque, el valor promedio y sus respectivos coeficientes de variación.

La altura de la torta es la variable que introduce la mayor incertidumbre en los cálculos de porosidad y permeabilidad del revoque, puesto que las alturas medidas experimentalmente varían mucho según los puntos en los que se mida y según la irregularidad que presente el revoque, por lo que se obtuvo coeficientes de variabilidad que oscilaron entre 1 y 42 %, en adición, los cálculos de porosidad y permeabilidad se realizan

a partir de un valor promedio de las mediciones de la altura del revoque, por lo que la porosidad y permeabilidad calculadas corresponden a valores promedios.

#### **11.4 Masa del revoque**

Luego de la permeación con agua, la torta obtenida se coloca dentro del desecador infrarrojo para secarla a una temperatura de 70°C, cuando la torta se ha secado completamente se obtiene el valor de su masa mas el papel de filtro al leer de la balanza, y al restarle la masa del medio filtrante o papel de filtro se obtiene la masa del revoque, en el apéndice A.5, se muestra la masa obtenida para cada revoque formado.

## ***12 Discusión de Resultados***

---

Esta sección se divide en cinco puntos principales, en el primero se establece la comparación de las características de los revoques obtenidos a partir de las cuatro bases diferentes y la mezcla 1, como son la permeabilidad y porosidad global y permeabilidad de la etapa darcyana, en función del tamaño  $D_{3,2}$ , el cual es un tamaño promedio que equivale al diámetro superficie – volumen ( $x_{sv}$ ) pero asumiendo que las partículas son esféricas.

En la segunda parte se realiza el mismo estudio pero comparando las bases con las mezclas reconstituidas de las mismas. En la tercera se establece la comparación de las mezclas 5, 6, 7 y 8 con la base 4. En la cuarta se discute las dos etapas de formación del revoque (etapa incipiente y etapa darcyana). En la quinta se presenta un análisis de la curva de filtrado y finalmente en la última parte se compara el rango de magnitud de la permeabilidad con el obtenido mediante la ecuación de Carman-Kozeny.

Los revoques obtenidos para las diferentes bases y para la mezcla 1 presentaron alturas (entre 0,36 y 0,62 mm) y masas (1,2 a 2 g) menores a las obtenidas de los revoques formados por los lodos constituidos por las mezclas 2 a la 8, los cuales presentaron alturas entre 0,65 y 2,3 mm y masas entre 2,6 y 6,5 g, esta diferencia se debe principalmente a la marcada diferencia existente entre las etapas iniciales o incipientes de las dos clases de lodos (bases y mezclas), puesto que el tiempo incipiente promedio obtenido para las mezclas resultó ser 10 veces mayor al obtenido para las bases y la mezcla 1.

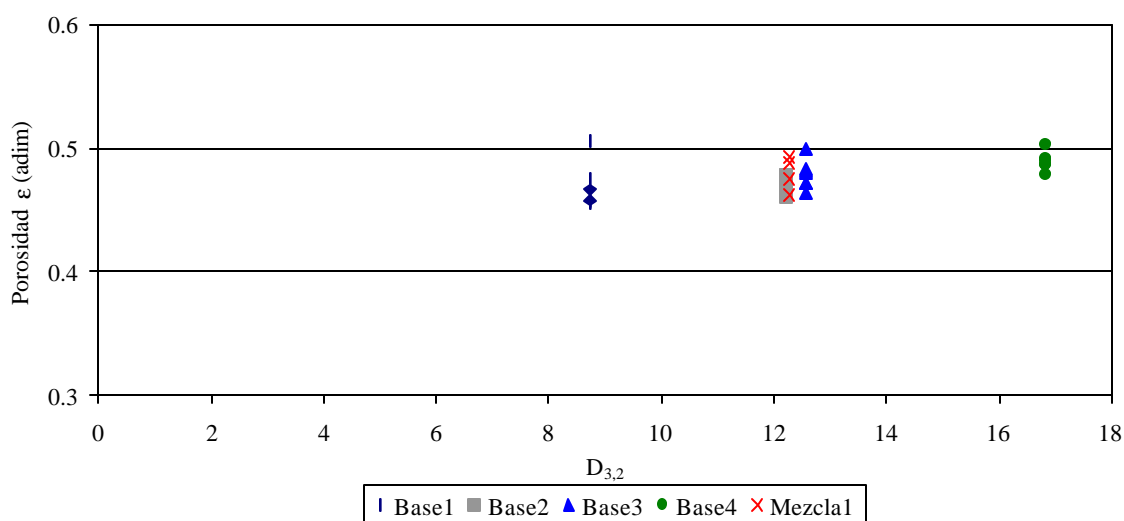
Todos los revoques obtenidos fueron formados y permeados con agua a una caída de presión de 500 psi y a una temperatura de aproximadamente 30°C, y luego secados a 70°C.

### **12.1 Comparación de los revoques formados a partir de los lodos formulados por las diferentes bases y la mezcla 1.**

Los revoques en cuestión son los obtenidos por la filtración de los lodos formulados con las bases 1, 2, 3 y 4 y la mezcla1, la cual constituye una mezcla equimásica de las bases. Las alturas y masas que presentaron estos revoques resultaron ser más constantes que para las mezclas formuladas a partir de las fracciones estrechas, las cuales resultaron en revoques mucho más irregulares.

### 12.1.1 Porosidad global

En la Figura 12.1 se muestra el comportamiento de la porosidad global de los revoques obtenidos a partir de las bases y la mezcla1. En el eje de las abscisas se representa el tamaño  $D_{3,2}$  y en el eje de las ordenadas se presentan los valores de la porosidad.

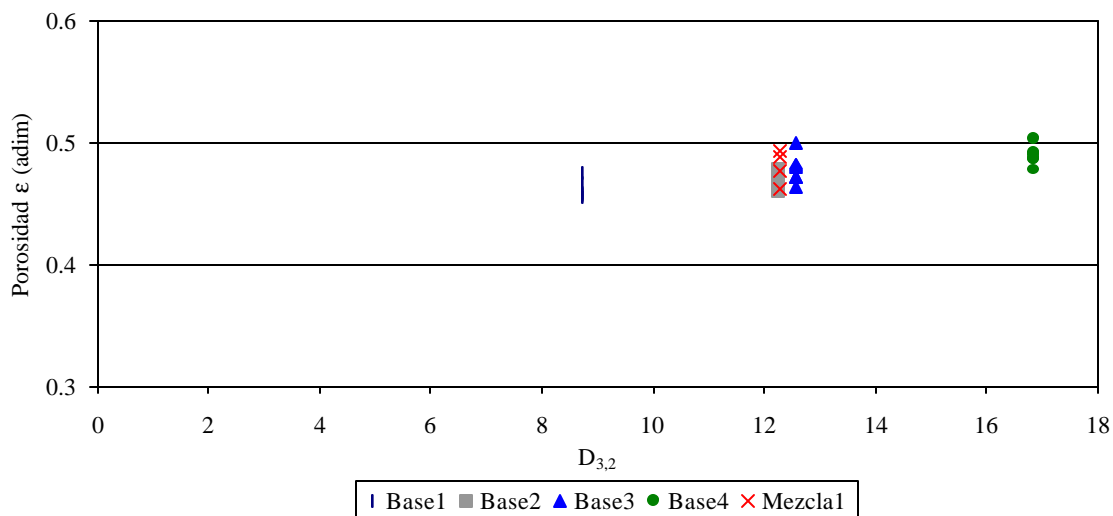


**Figura 12.1** Influencia del tamaño  $D_{3,2}$  en la porosidad del revoque para las bases y la mezcla1

El comportamiento de la porosidad de los revoques se muestra relativamente constante a medida que aumenta el tamaño  $D_{3,2}$ , como se puede observar en la Figura 12.1.

La mayor variabilidad que se presenta es para la base 1 la cual representa un porcentaje del 4,1 %, mientras que para la 2, 3, 4 y mezcla 1 son del 1,5, 2,4 y 1,7% respectivamente.

Si se descarta el punto más desviado para la base 1, se puede observar un leve aumento de la porosidad global a medida que aumenta el tamaño  $D_{3,2}$ . Como se observa en la Figura 12.2.



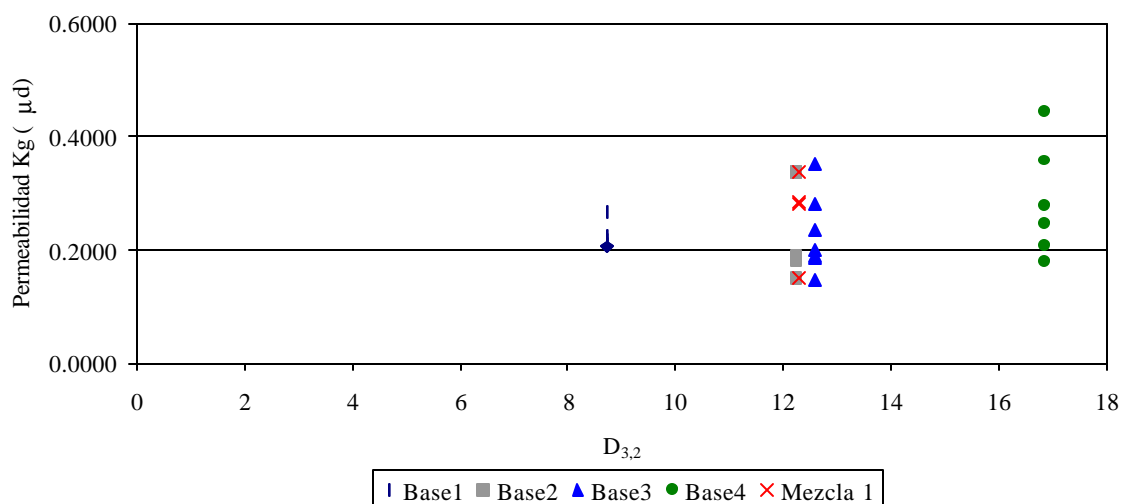
**Figura 12.2** Influencia del tamaño  $D_{3,2}$  en la porosidad del revoque para las bases y la mezcla 1. Corrección de desviaciones.

La porosidad se ve afectada principalmente por la altura y masa del revoque, siendo mucho más sensible a las variaciones de la altura que a la masa del revoque. En el apéndice A.6 se puede observar la sensibilidad que presenta la porosidad con respecto a la altura del revoque, donde cambios del 10% en la altura del revoque ocasiona mas o menos una variación del mismo porcentaje en la porosidad promedio.

Debido a esto se realizaron quince mediciones de altura para cada revoque obtenido, descartando las siete alturas más desviadas, de manera de reducir con el número de mediciones el error que se comete al utilizar una altura promedio.

### 12.1.2 Permeabilidad global

En la Figura 12.3 se muestra el comportamiento de la permeabilidad global en función del tamaño  $D_{3,2}$ .



**Figura 12.3** Influencia del tamaño  $D_{3,2}$  en la permeabilidad del revoque para las bases y la mezcla 1.

La permeabilidad se ve afectada principalmente por la altura del revoque, la resistencia que ofrece el medio filtrante y la pendiente de la curva de permeación  $V$  vs  $t$ . Por lo tanto, los valores de la permeabilidad global tienen involucrado un cierto grado de incertidumbre, ya que se calcularon a partir de las mediciones del espesor del revoque, hecho que se refleja en la falta de tendencia que se observa en los valores representados en la Figura 12.3.

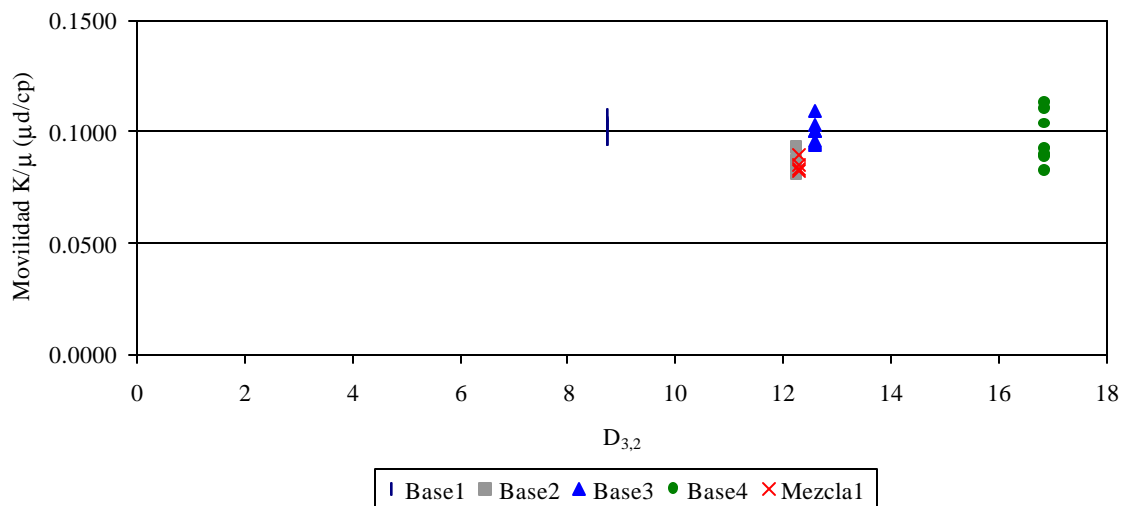
### 12.1.3 Movilidad de la etapa Darcyana- Permeabilidad Darcyana

La movilidad del revoque tiende a permanecer relativamente constante a medida que aumenta el tamaño  $D_{3,2}$ , como se puede observar en la Figura 12.4.

Los parámetros que afectan de manera directa a la movilidad son la pendiente del gráfico  $t'/V'$  vs  $V'$  y el parámetro adimensional  $\kappa$ , que depende directamente de la porosidad. La pendiente de la curva  $t'/V'$  vs  $V'$ , depende primordialmente del valor que tome el tiempo incipiente ( $t_0$ ), y del volumen de filtrado ( $V_0$ ) correspondiente a dicho tiempo, como se pudo observar dichas pendientes presentaron poca variabilidad a través de las diferentes filtraciones que se realizaron para un mismo lodo, por lo cual se puede afirmar que la discordancia observada o falta de tendencia en el comportamiento de la



movilidad se puede adjudicar a la porosidad, primeramente porque se utilizó una porosidad promedio que es sensible a las mediciones de la altura y masa del revoque y en segundo lugar porque la porosidad utilizada para calcular la movilidad de la etapa darcyana, fue la porosidad global, cometiendo de esta manera un error, ya que la porosidad utilizada no corresponde a la que se debe utilizar, la de la etapa darcyana. Se utilizó la global, ya que no hubo forma de poder estimar la porosidad de la etapa darcyana, ya que durante la filtración sobre papel de filtro no se pueden separar experimentalmente las dos zonas y por lo tanto no se puede medir la altura y masa de la etapa darcyana para poder calcular su porosidad.

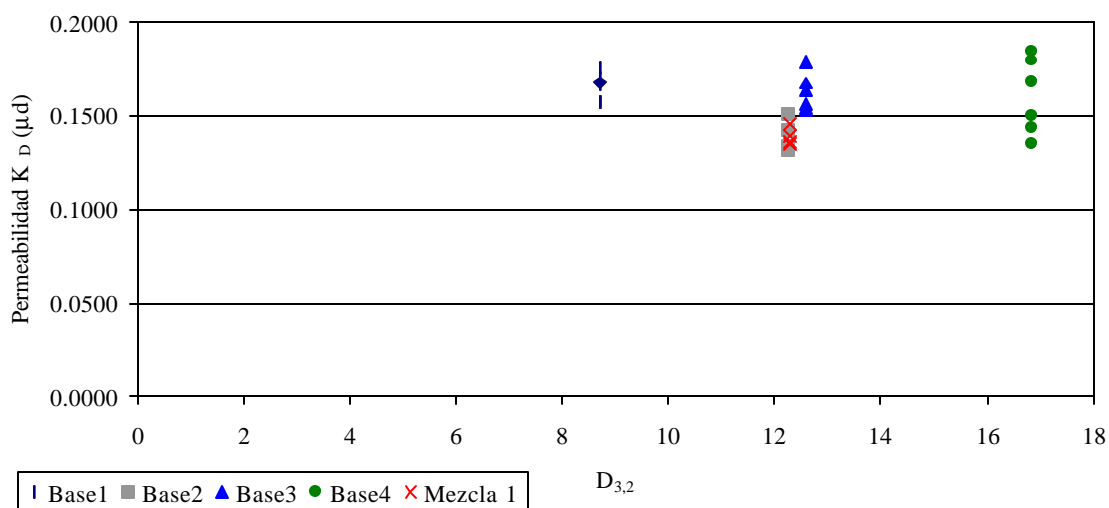


**Figura 12.4** Influencia del tamaño  $D_{3,2}$  en la movilidad del revoque para las bases y la mezcla1.

Uno de los objetivos originales planteados en este trabajo especial de grado fue filtrar los lodos preparados sobre membranas, con la finalidad de caracterizar el revoque por medio de la etapa darcyana, ya que al poseer la membrana un tamaño regular de poro bastante pequeño se suponía que la formación del revoque se llevaría a cabo solamente en la etapa que en realidad importa que es la etapa darcyana, por lo que al realizar mediciones de la altura del revoque obtenido se podría estimar la porosidad de dicha zona. Pero pruebas realizadas al comienzo de este estudio arrojaron resultados en los cuales también se incluye una zona incipiente en la formación del revoque en la filtración sobre membranas.

En estudios anteriores<sup>(23)</sup> a este trabajo, se caracterizaron los revoques mediante su movilidad, ya que no había manera de estimar la viscosidad del filtrado (goma Xhantana), pero como se muestra en el Apéndice A.1.6, hay una forma de estimarla suponiendo que la resistencia global para la permeación con agua es igual a la resistencia global para el momento final de la filtración. Estos cálculos se realizaron para las bases y la mezcla1, arrojando valores relativamente constantes de la viscosidad, por lo que se tomó un valor promedio de la misma para los cálculos posteriores. Dicho valor resultó ser 0,00163 cp, mas o menos el doble de la viscosidad del agua a 30°C.

Por lo tanto se pudo estimar la permeabilidad de la zona darcyana, cuyo comportamiento en función del tamaño  $D_{3,2}$  se muestra en la Figura 12.5. De manera similar a la movilidad, la permeabilidad obtenida de la etapa darcyana tiende a permanecer relativamente constante a medida que aumenta el tamaño  $D_{3,2}$ , aunque se observa mayor variabilidad en este caso.

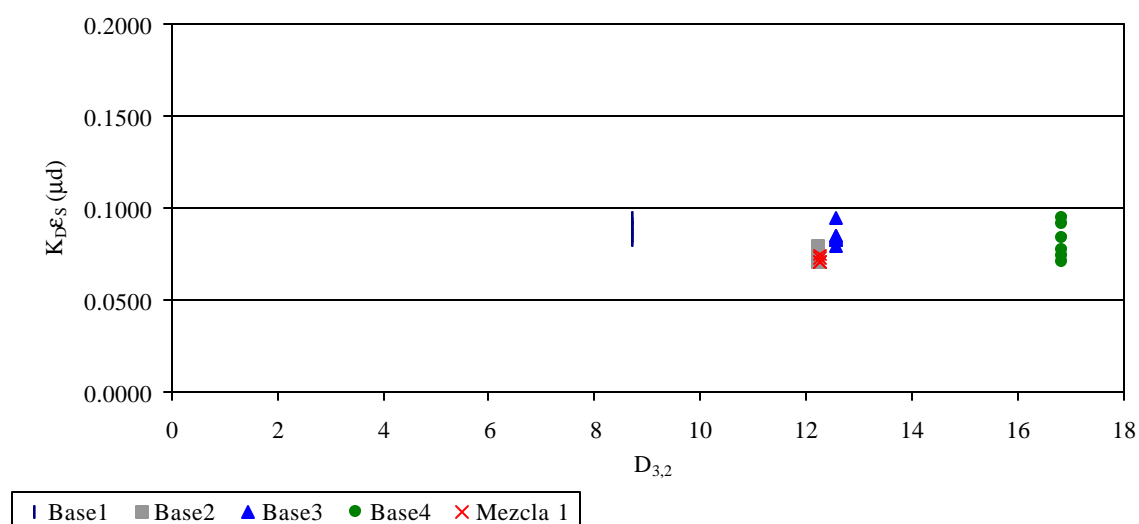


**Figura 12.5** Influencia del tamaño  $D_{3,2}$  en la permeabilidad de la etapa darcyana del revoque para las bases y la mezcla1.

Como la porosidad es la principal variable que afecta la movilidad y por ende la permeabilidad de la etapa darcyana del revoque, y hasta ahora no hay forma de medir experimentalmente la altura y masa de esta zona, surgió la idea<sup>(26)</sup> de tratar de expresar la permeabilidad darcyana sin utilizar el valor inseguro de la porosidad calculado a partir de

las mediciones de la altura del revoque, como se observa en el Apéndice A.1.13, se pudo obtener el producto permeabilidad darcyana solidosidad, mediante la resistencia específica de la zona darcyana, calculada a partir de la pendiente  $a'$  del gráfico  $t'/V'$  vs  $V'$ , la viscosidad obtenida de la goma xantana y del parámetro  $\omega$  que se expresa como la masa de torta seca por volumen de filtrado, de manera que se encuentre menos influenciado por el valor incierto que representa la porosidad global.

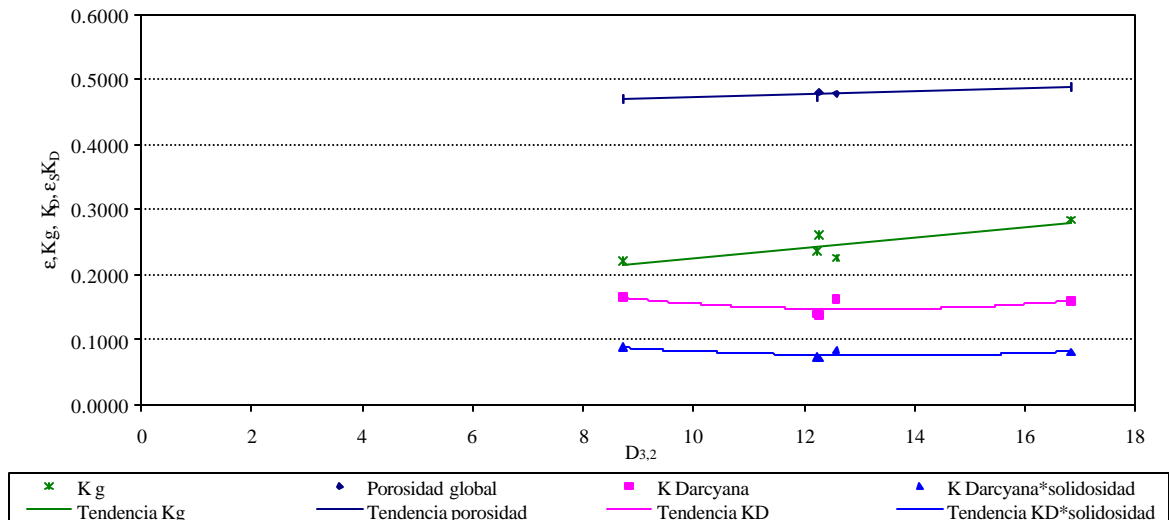
En la Figura 12.6 se puede observar el comportamiento del producto permeabilidad-solidosidad de la etapa darcyana, en función del tamaño  $D_{3,2}$ . Como se puede observar dicho producto se mantiene relativamente constante a medida que aumenta el tamaño  $D_{3,2}$ .



**Figura 12.6** Influencia del tamaño  $D_{3,2}$  en el producto permeabilidad-solidosidad de la etapa darcyana del revoque para las bases y la mezcla 1.

En la Figura 12.7 se puede observar el comportamiento de los valores promedios de la porosidad, permeabilidad global, permeabilidad darcyana y del producto permeabilidad-solidosidad darcyana en función del tamaño  $D_{3,2}$ . En el caso de la permeabilidad y del producto permeabilidad-solidosidad de la zona darcyana, dichos parámetros se muestran relativamente constantes a medida que cambia el tamaño  $D_{3,2}$ . En cambio la permeabilidad y porosidad global aumentan a medida que aumenta el tamaño  $D_{3,2}$ , aunque la permeabilidad global presenta gran variabilidad en comparación a los otros parámetros.

Los parámetros que presentan la menor variabilidad, son el producto permeabilidad-solidosidad de la zona darcyana y la porosidad global, valor en el cual no se debe confiar por lo argumentado anteriormente.



**Figura 12.7** Influencia del tamaño  $D_{3,2}$  en las características del revoque formado a partir de las bases y la mezcla 1.

## **12.2 Comparación de los revoques formados a partir de los lodos formulados por las diferentes bases y sus respectivas mezclas reconstituidas.**

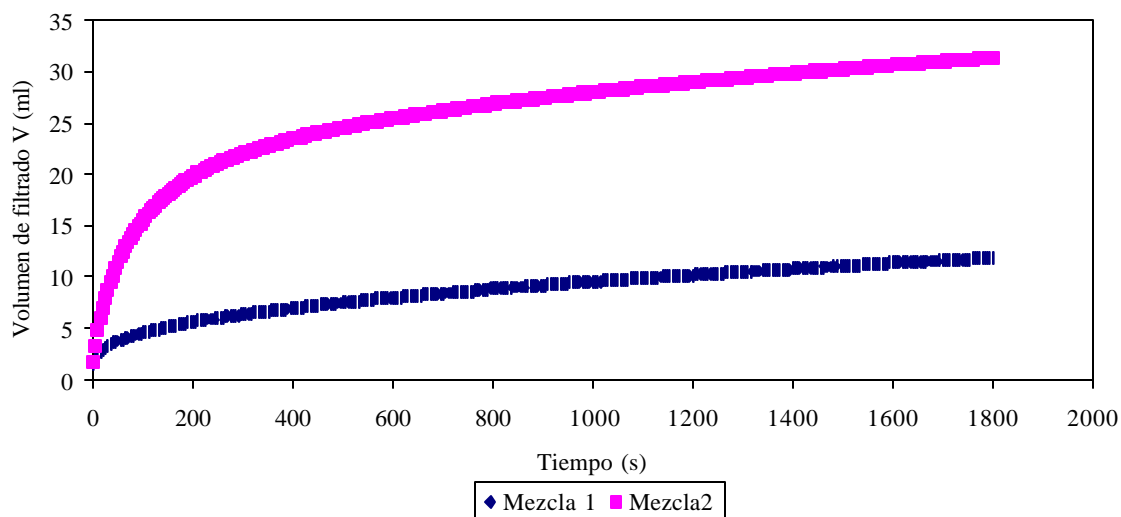
Como se pudo observar en la sección 11, las granulometrías de las bases se quisieron reconstituir diseñando mezclas a partir de las fracciones estrechas obtenidas por los procesos de clasificación centrífuga y tamizado vía húmeda de los carbonatos bases.

La fracción de partículas más finas con la que se trabajó fue la obtenida a 13000 rpm del proceso de clasificación centrífuga, la cual presentó un tamaño promedio de 3,5 micrones aproximadamente y un rango de tamaños entre 1,3 y 11,3 micrones. Por lo cual no se pudo obtener partículas menores a 1,3 micrones, denominadas ultrafinos, que representan las partículas sellantes, es decir las formadoras de puentes que permiten la obtención de una torta delgada, con un tiempo incipiente pequeño y firme sobre el medio filtrante.

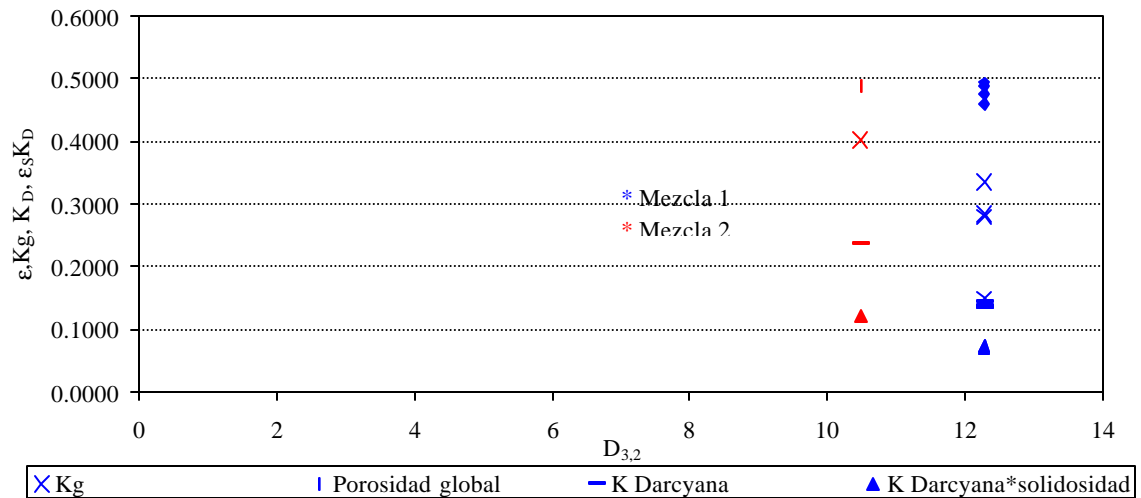
Debido a esto todas las mezclas diseñadas a partir de las fracciones estrechas, no contienen esas partículas ultrafinas presentes en las bases, hecho que puede ser la causa de la obtención de revoques más gruesos, más porosos y con un tiempo incipiente de alrededor de 10 veces mayor a los obtenidos mediante la filtración de las bases y la mezcla 1.

La base 1 y la base 2, se trataron de reconstituir a partir de las fracciones estrechas, pero los lodos preparados a partir de estas mezclas, filtraron muy rápido, formando una torta muy permeable, sin producirse ese sello que culmine la formación de la etapa incipiente y genere la formación de la darcyana. Produciendo revoques altos, pesados y frágiles que se separan del papel de filtro con mucha facilidad.

La mezcla 1 que representa una mezcla equimásica de las cuatro bases, sirvió como base para formar la mezcla 2 a partir de las fracciones estrechas. La filtración generó un tiempo incipiente de alrededor de 7 minutos, con un volumen final de filtrado relativamente alto de 32 ml, ocasionando un revoque mucho más alto y más poroso que el formado con la mezcla 1, el cual tuvo un tiempo incipiente de 1 min y un volumen de filtrado final de 12 ml como se puede observar en la Figura 12.8. En la Figura 12.9 se muestra los valores de porosidad y permeabilidad para la mezcla 2 en función del tamaño  $D_{3,2}$ , y la comparación con la mezcla 1.



**Figura 12.8** Volumen de filtrado a los treinta minutos para la mezcla 1 y mezcla 2.



**Figura 12.9** Influencia del tamaño  $D_{3,2}$  en las características del revoque formado a partir de la mezcla 1 y mezcla 2.

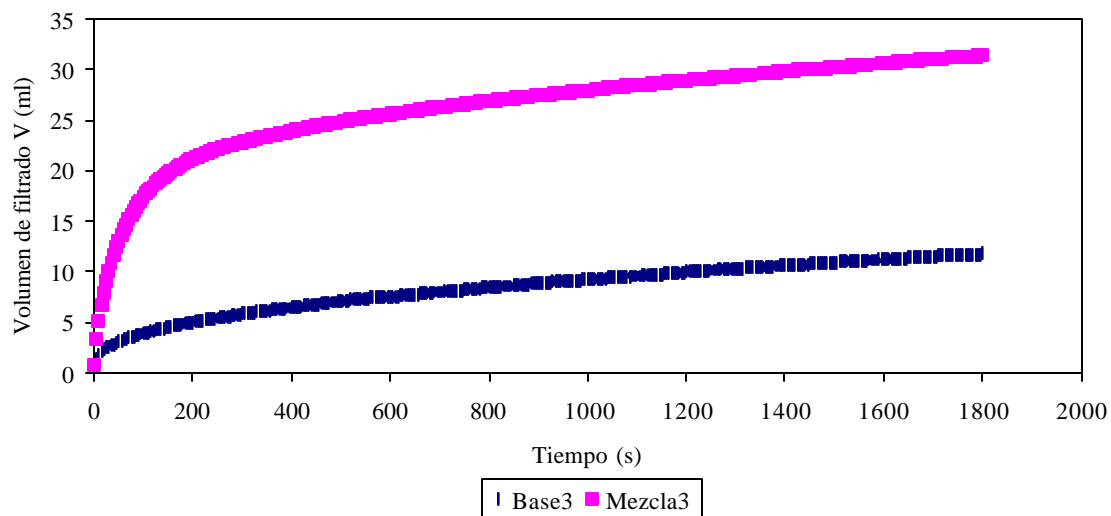
Como se puede observar en la Figura 12.9, el revoque formado a partir de la mezcla 2, resultó ser más permeable que el resultante de la mezcla 1, aunque la porosidad se mantiene relativamente constante.

La granulometría de la base 3 se diseñó a partir de las fracciones estrechas resultando la mezcla 3, la filtración del lodo preparado a partir de esta mezcla generó un tiempo incipiente de 12 minutos aproximadamente y un volumen de filtrado alto (31.4 ml), comparado con un tiempo incipiente de 1 min y un volumen de filtrado de 12 ml obtenido al filtrar el lodo preparado con la base 3. La comparación de los volúmenes de filtrado obtenidos se muestra en la Figura 12.10 y la comparación de las características de los revoques obtenidos a partir de la mezcla 3 y la base 3 en función del tamaño  $D_{3,2}$ , se muestra en la Figura 12.11.

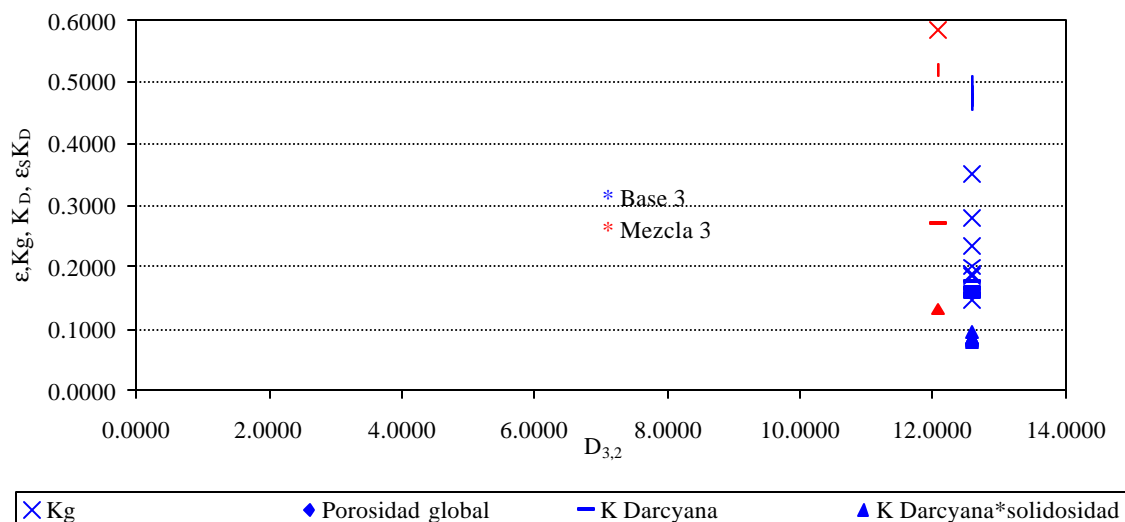
El revoque obtenido al filtrar un lodo preparado con la mezcla 3 resultó mucho más permeable y más poroso que el obtenido mediante la filtración de un lodo preparado con la base 3.

Las mezclas que generaron el mayor volumen de filtrado fueron las dos analizadas anteriormente: la mezcla 2 y la mezcla 3, por lo que solo se pudo realizar una filtración de

cada una, ya que fue necesario llenar todo el volumen de la celda de filtración (150 ml) con lodo para poder filtrar durante un tiempo de 30 minutos.



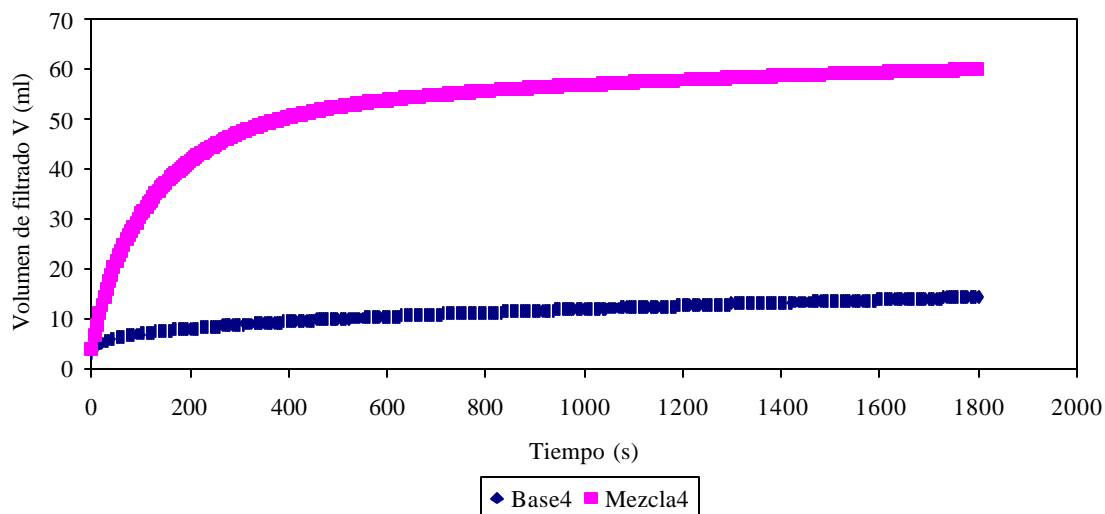
**Figura 12.10** Volúmenes de filtrado a los treinta minutos para la base3 y la mezcla3



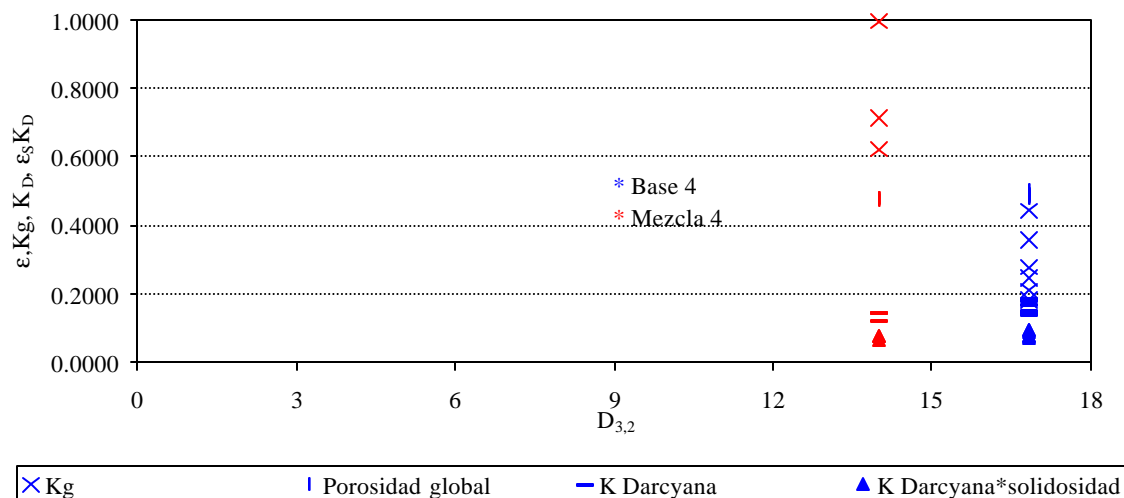
**Figura 12.11** Influencia del tamaño  $D_{3,2}$  en las características del revoque formado a partir de la Base 3 y la mezcla 3.

La base 4 también se trató de reconstruir con las fracciones estrechas generando la mezcla 4, el revoque obtenido midió aproximadamente el triple del obtenido con la base 4 y pesó el doble. El tiempo incipiente de la mezcla también resultó ser por el orden de diez

veces mayor al de la base. En la Figura 12.12 se muestra la comparación del volumen de filtrado obtenido a los treinta minutos. En la Figura 12.13 se puede observar la comparación de las características que presentaron estos dos revoques en función del tamaño  $D_{3,2}$ .



**Figura 12.12** Volúmenes de filtrado a los treinta minutos para la base 4 y la mezcla 4.



**Figura 12.13** Influencia del tamaño  $D_{3,2}$  en las características del revoque formado a partir de la base 4 y la mezcla 4.

Como se puede observar en la Figura 12.13, el revoque obtenido a partir de la mezcla 4 resultó mucho más permeable que el obtenido a partir de la base 4, aunque de manera discordante la porosidad se mantiene constante, pero se debe recordar que los valores de porosidad no deben ser tomados como fiables. En cambio el producto permeabilidad-



solidosidad de la zona darcyana resulta más confiable, ya que es independiente de la altura del revoque y por lo tanto de la porosidad. Al comparar la mezcla 4 y la base 4 con dicho producto, se puede observar que éste se mantiene aproximadamente constante, lo cual indica que la zona darcyana que se forma en ambos revoques tiene características similares, es decir luego de cumplido el tiempo incipiente en ambas filtraciones, comienza a formarse la segunda zona o etapa darcyana de manera similar para las dos, con un volumen de filtrado ( $V'$ ) en dicha zona de 6 ml para la mezcla 4 y 8 ml para la base 4. Esto indica la mezcla 4 se ve menos influencia por la ausencia de los finos menores a  $1,3 \mu\text{m}$ .

La gran diferencia que se presenta en las permeabilidades globales se puede atribuir a la presencia en la mezcla de una etapa incipiente diez veces mayor que para la base 4, generando un revoque incipiente para la mezcla reconstituida mucho más permeable que para la base.

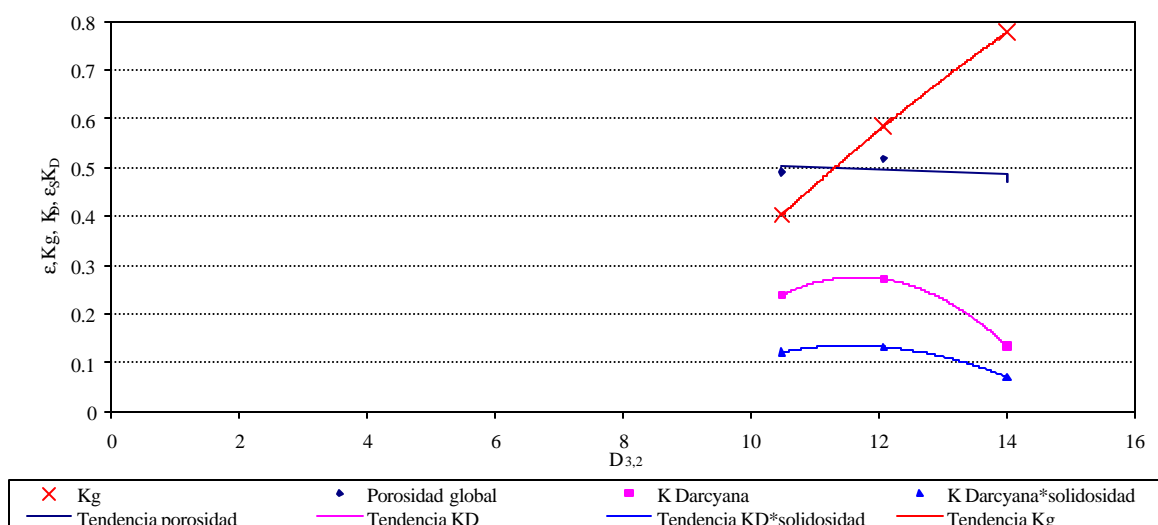
Para todas las mezclas hizo falta la cola de ultrafinos (partículas sellantes) presente en las diferentes bases y en la mezcla 1, ya que para reconstituir las mezclas se obligó a que el menor tamaño presente en las mismas fuese mayor a 1.3 micrones (menor tamaño de la fracción estrecha más fina), por lo cual se puede explicar la obtención de revoques con una etapa incipiente por el orden de diez veces mayor (10 min) a los revoques formados con las granulometrías bases y la mezcla 1 (1 min), y por supuesto mucho más permeables.

De todas las mezclas reconstituidas, la mezcla 4 presentó valores de la etapa darcyana (permeabilidad y producto solidosidad-permeabilidad) similares a los obtenidos para la base 4. En cambio para la base 3 y la mezcla 1 resultaron valores bastantes diferentes a los de sus mezclas reconstituidas (3 y 2 respectivamente). Esto parece ser debido a que la mezcla 4 se parece mucho más a la base, a pesar de que la cola de finos tampoco contiene las partículas menores a dicho tamaño

La cola de finos resultante en la mezcla 4 no se diferencia mucho con respecto a la de la base 4, en comparación con las otras mezclas reconstituidas y sus respectivas granulometrías bases. Pareciera que la distribución de los diferentes tamaños de partícula

presentes en un granulometría específica influye mucho en la formación del revoque, obteniendo un revoque con una etapa incipiente muy corta con la presencia adecuada de cantidad y proporción de las partículas ultrafinas, o un revoque por el contrario con una zona incipiente larga con una cantidad y/o relación de partículas sellantes incorrecta.

En la Figura 12.14 se muestra el comportamiento de las diferentes características de los revoques formados con las mezclas 2, 3 y 4, en función del tamaño  $D_{3,2}$ . Se puede apreciar que el comportamiento de la zona darcyana presenta una tendencia totalmente contraria a la esperada al aumentar el tamaño  $D_{3,2}$ , puesto que debería aumentar con el incremento del tamaño, y no lo hace sino lo contrario, disminuye con el aumento del tamaño. Se puede alegar, por los resultados obtenidos anteriormente, los cuales presentaron de manera general una falta de tendencia con respecto al cambio del tamaño  $D_{3,2}$ , y por los obtenidos mediante las mezclas 2 y 3 en comparación a la 4, que la granulometría no parece influir en la formación del revoque, sino la proporción o el equilibrio que debe presentarse entre los diferentes tamaños de partícula contenidos en la granulometría de una mezcla.

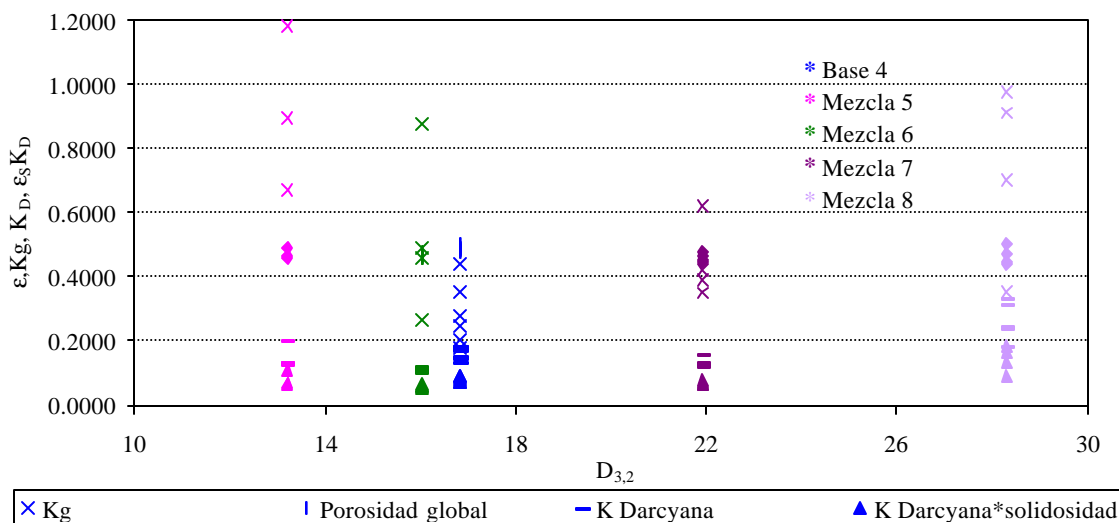


**Figura 12.14** Influencia del tamaño  $D_{3,2}$  en las características de los revoques formados a partir de las mezclas 2, 3 y 4.

### 12.3 Comparación de los revoques formados a partir de los lodos formulados por las mezclas 5 a la 8 y la base 4.

Las mezclas diseñadas: 5, 6, 7 y 8 poseen tamaños promedios  $D_{3,2}$ , mayores a las bases 1, 2 y 3, por lo que se compararan en esta sección con la base que posee el mayor  $D_{3,2}$  que es la base 4.

Como se puede observar en la Figura 12.15, la permeabilidad global no presenta una tendencia clara a medida que aumenta el tamaño  $D_{3,2}$ . La porosidad se mantiene aproximadamente constante, igualmente el producto permeabilidad-solidosidad darcyana, lo que hace inferir que la zona darcyana que se forma en las mezclas mencionadas se puede comparar con la obtenida por la base 4, y nuevamente la variabilidad presente en la permeabilidad global de las mezclas se puede atribuir a la existencia de una etapa incipiente en las mismas de diez veces mayor que la presente en la base 4, generando revoques más permeables.



**Figura 12.15** Influencia del tamaño  $D_{3,2}$  en las características de los revoques formados a partir de las mezclas 5, 6, 7 y 8.

La mezcla que presenta la menor variabilidad es la mezcla 7, como se puede observar en la Figura 12.15, dicha mezcla arrojó el menor tiempo incipiente (7 min) y el menor volumen de filtrado (26 ml) de todas las mezclas formadas con las fracciones estrechas.

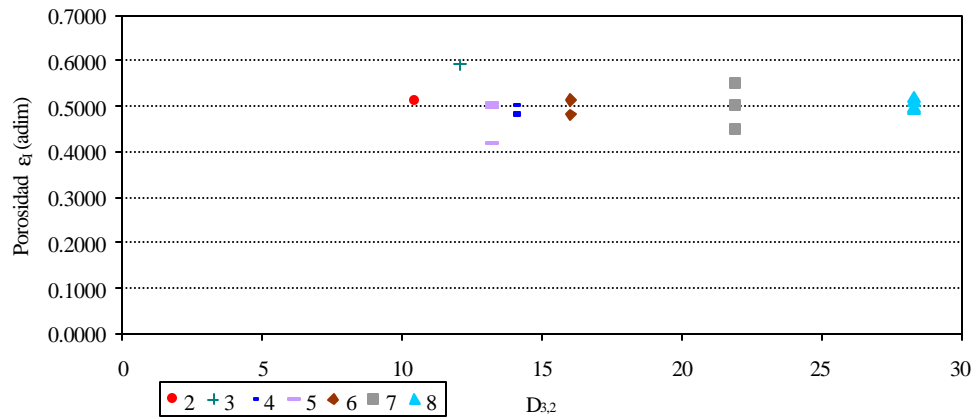
Posee un comportamiento similar a la base 4, puesto que las características ofrecidas por ambos revoques son similares. Se debe destacar que las granulometrías de la mezcla 7 y la base 4 no son similares, por lo cual se puede ratificar que las características del revoque obtenidas no dependen de la granulometría de la mezcla, sino de la relación del contenido de los diferentes tamaños de partículas que constituyen la granulometría.

#### **12.4 Etapas de formación del revoque**

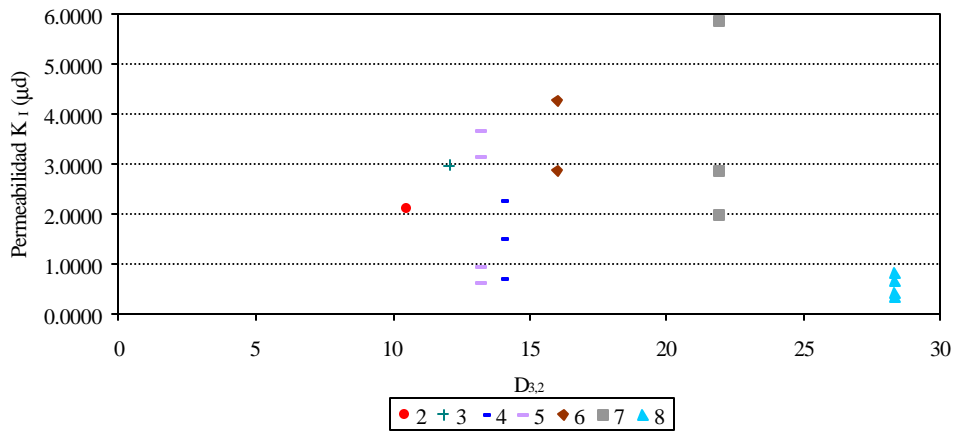
Como se ha visto hasta ahora, la formación del revoque se lleva a cabo durante dos etapas, una etapa incipiente, donde ocurre el paso del mayor volumen de filtrado en el menor tiempo, formando un “revoque incipiente” con porosidad y permeabilidad mucho más altas que las que presenta el revoque obtenido en la segunda etapa o zona darcyana, en la cual el volumen de filtrado que se obtiene es mucho menor en un tiempo mayor, y se muestra constante a través del tiempo siguiendo la Ley de Darcy.

La zona que realmente importa en este estudio es la zona darcyana, puesto que sus características tienden a no depender del sustrato donde se forme y por lo tanto se puede comparar a la que se obtendría en la formación al sustituir el lodo de perforación por el analizado mediante filtración sobre papel de filtro, las zonas darcyanas que se formarían en ambos casos presentarían características similares. En cambio la zona incipiente obtenida mediante filtración sobre papel, no se puede comparar de ninguna forma con la obtenida en la perforación petrolera al introducir el lodo de perforación en el yacimiento, puesto que la distribución de poro de los medios filtrantes en ambos casos es diferente y por supuesto la resistencia ofrecida por los mismos también lo es.

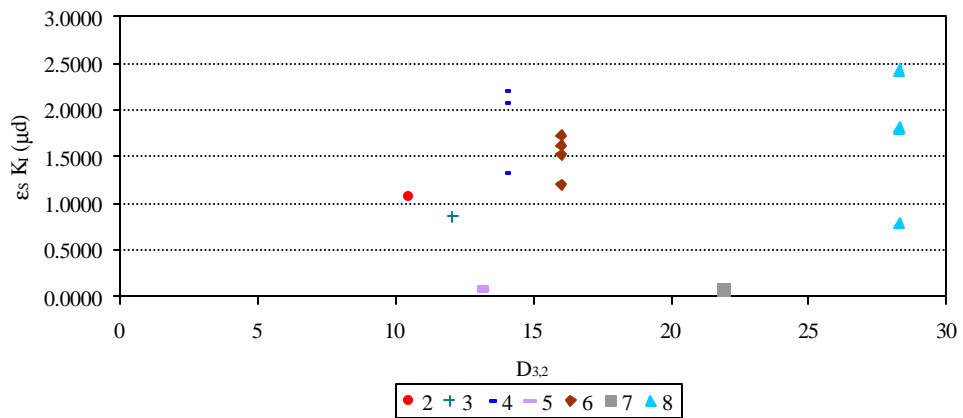
De igual forma en la Figura 12.16 se puede observar el comportamiento de la porosidad de la zona incipiente en función de la variación del tamaño  $D_{3,2}$ , la cual no presenta una tendencia clara, así como la permeabilidad (Figura 12.17), la cual presenta una variabilidad más alta y lo mismo sucede con el producto permeabilidad-solidosidad, como se muestra en la Figura 12.18.



**Figura 12.16** Influencia del tamaño  $D_{3,2}$  en la porosidad del revoque incipiente formado a partir de las mezclas preparadas con las fracciones estrechas.



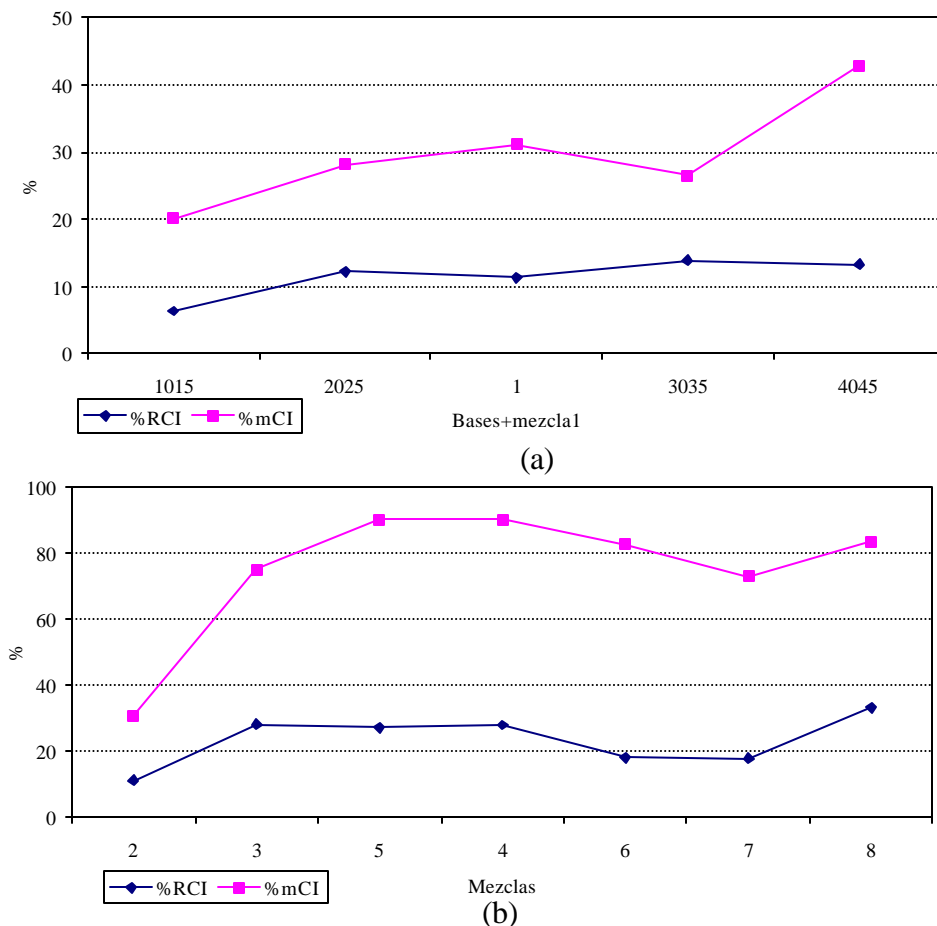
**Figura 12.17** Influencia del tamaño  $D_{3,2}$  en la permeabilidad del revoque incipiente formado a partir de las mezclas preparadas con las fracciones estrechas.



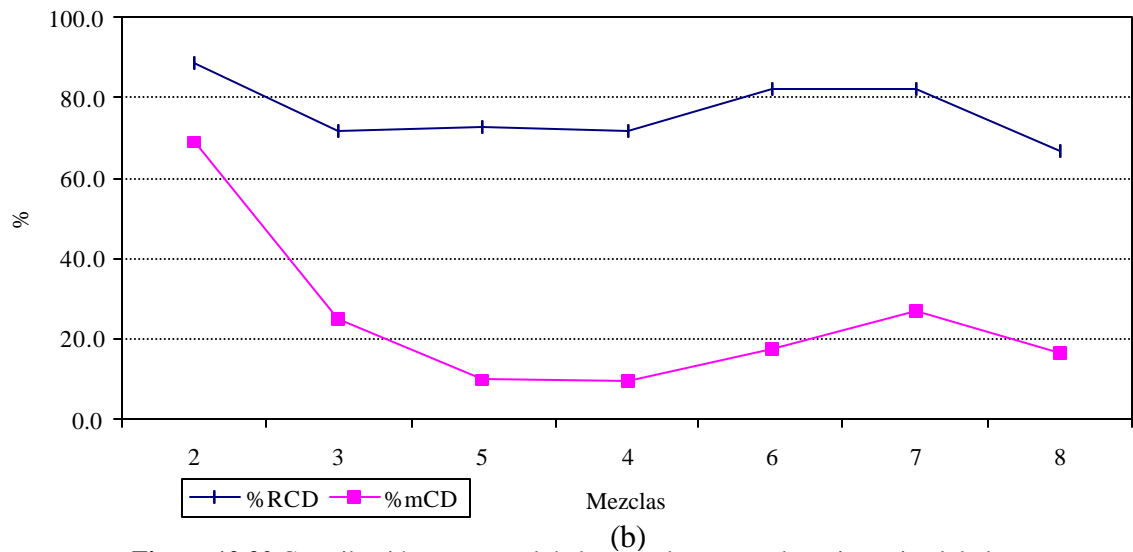
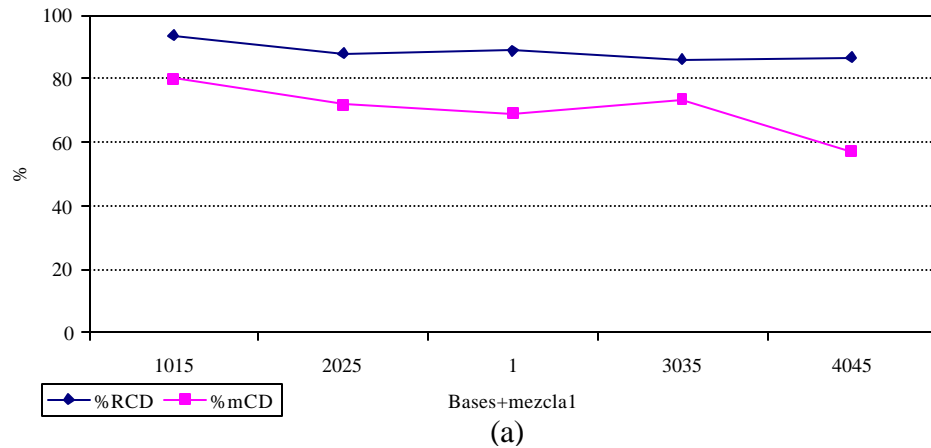
**Figura 12.18** Influencia del tamaño  $D_{3,2}$  en el producto permeabilidad-porosidad de la etapa incipiente del revoque formado a partir de las mezclas preparadas con las fracciones estrechas.

Mediante el Apéndice A.1.11, se puede calcular la contribución porcentual que ofrece cada zona a la resistencia global y a la cantidad de revoque, es decir la resistencia que ofrece la zona darcyana ( $R_{CD}$ ) y la que ofrece la zona incipiente ( $R_{CI}$ ), ambas expresadas en porcentaje, de tal manera que se puede observar la influencia que ejerce cada una de las zonas en la formación del revoque. Así como también la contribución porcentual de cada zona a la cantidad de revoque, es decir, el porcentaje de cantidad de revoque depositado en la zona incipiente ( $\%m_{CI}$ ) y en la darcyana ( $\%m_{CD}$ ).

En la Figura 12.19 se puede observar el comportamiento de las resistencia ofrecida por la etapa incipiente y el porcentaje de cantidad de revoque depositado en esta zona. En la Figura 12.20 se muestra el comportamiento de la cantidad de revoque depositado en la zona darcyana y la resistencia que ofrece dicha zona.



**Figura 12.19** Contribución porcentual de la etapa incipiente a la resistencia global y a la cantidad de revoque formado, a) para las bases y la mezcla 1, b) para las mezclas 2 a la 8.



**Figura 12.20** Contribución porcentual de la zona darcyana a la resistencia global y a la cantidad de revoque formado, a) para las bases y la mezcla 1, b) para las mezclas 2 a la 8.

Como se pudo observar en las Figuras 12.19 y 12.20, existen en la formación del revoque dos zonas absolutamente diferenciadas, una mucho menos permeable que la otra, ya que para el caso de las bases y la mezcla 1, el 70% de la masa depositada en la zona darcyana corresponde a una resistencia del 90% sobre la resistencia global ofrecida, y solo el 30% de la masa depositada en la etapa incipiente corresponde a una resistencia del 10%, esto corresponde con el hecho de que los tiempos incipientes para estos revoques resultaron alrededor de un minuto.

Para las mezclas diseñadas a partir de las fracciones estrechas sucede lo contrario, el 75% de la masa depositada en la etapa incipiente ofrece una resistencia del 23%, debido a

que el tiempo incipiente promedio resulto diez veces mayor, mientras que el 25% de la masa ofrece una resistencia mucho mayor del 77% en la zona darcyana, lo cual sustenta el hecho de que las dos zonas existentes en la formación del revoque se encuentran efectivamente marcadas, la zona darcyana es mucho menos permeable que la incipiente, ofreciendo la mayor resistencia en ambos casos, para las bases y para las mezclas diseñadas con las fracciones estrechas.

### **12.5 Análisis de la curva de filtrado**

Anteriormente se han caracterizado los revoques mediante el análisis de la curva  $V$  vs  $t$ , en función del volumen final de filtrado, y a través de la gráfica  $t/V$  vs  $V$ , por medio de la pendiente que se genera (a) en la zona darcyana, la cual al cortar en la gráfica identifica el final de la etapa incipiente y el comienzo de la darcyana.

En este trabajo, dicho estudio se llevó a cabo mediante el análisis de la gráfica  $t'/V'$  vs  $V'$ , donde la pendiente  $a'$  que se genera en la segunda etapa marca igualmente la diferencia entre las dos zonas.

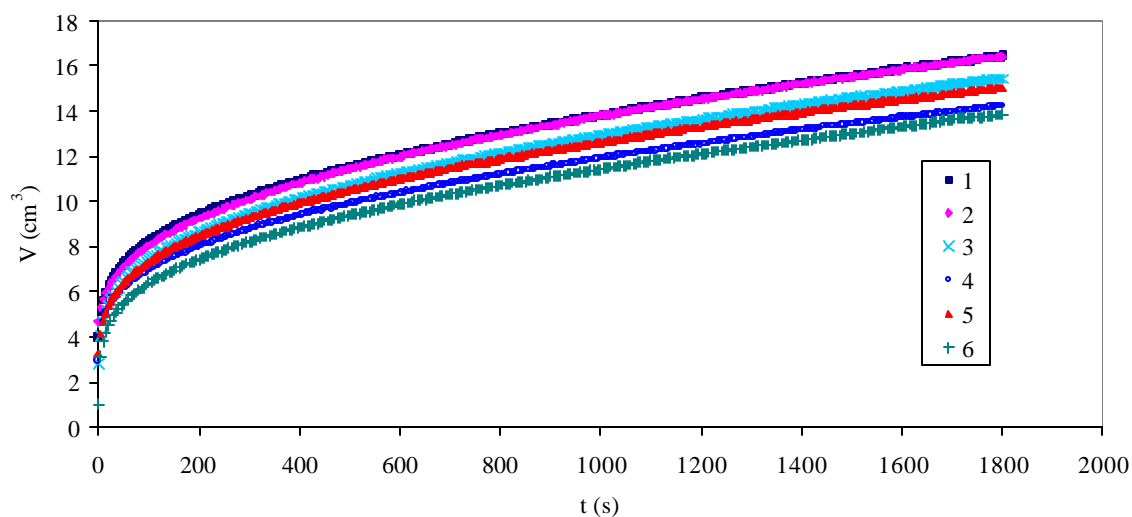
En la Figura 12.21 se puede observar las curvas  $V$  vs  $t$  obtenidas para las diferentes filtraciones realizadas con el lodo preparado a partir de la base 4, se puede observar la variabilidad existente (13.5%) en la cantidad de filtrado final a los 30 minutos.

En la Figura 12.22 se encuentran representados los mismos datos obtenidos para la base 4, pero transformando los datos según la ecuación 4.28, graficando  $t/V$  vs  $V$ , también se puede observar la variabilidad entre las pendientes (a) obtenidas para la etapa darcyana (20.1%).

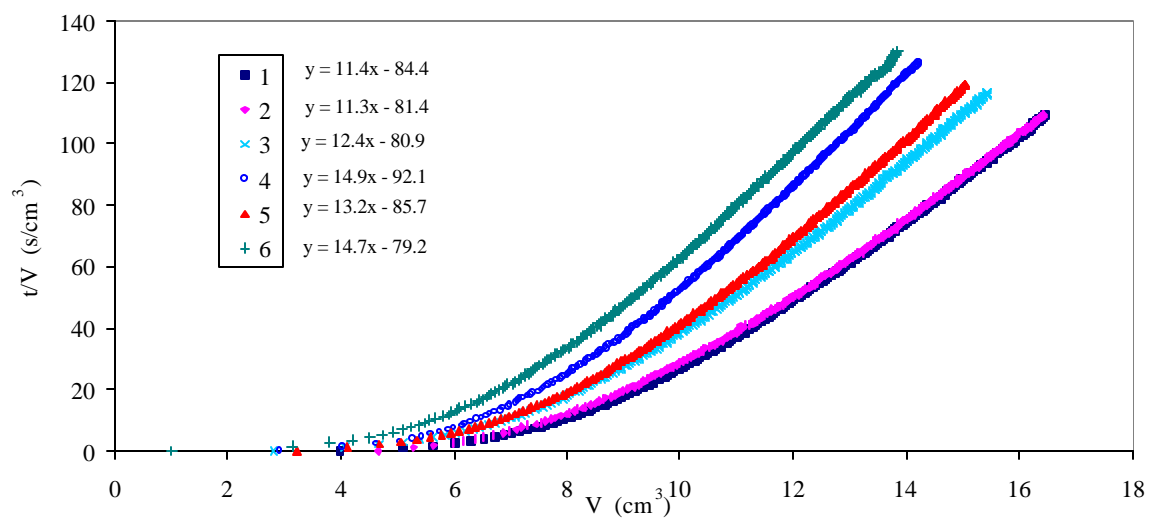
Así mismo, en la Figura 12.23 se presenta la representación de dichos datos de filtración pero incluyendo los valores de corrección  $t_0$  y  $V_0$ , graficando  $t'/V'$  vs  $V'$ , de tal manera de representar únicamente la zona darcyana (zona recta), donde el cero constituye el punto final de la zona incipiente ( $V_0, t_0/V_0$ ). Como se puede observar las pendientes



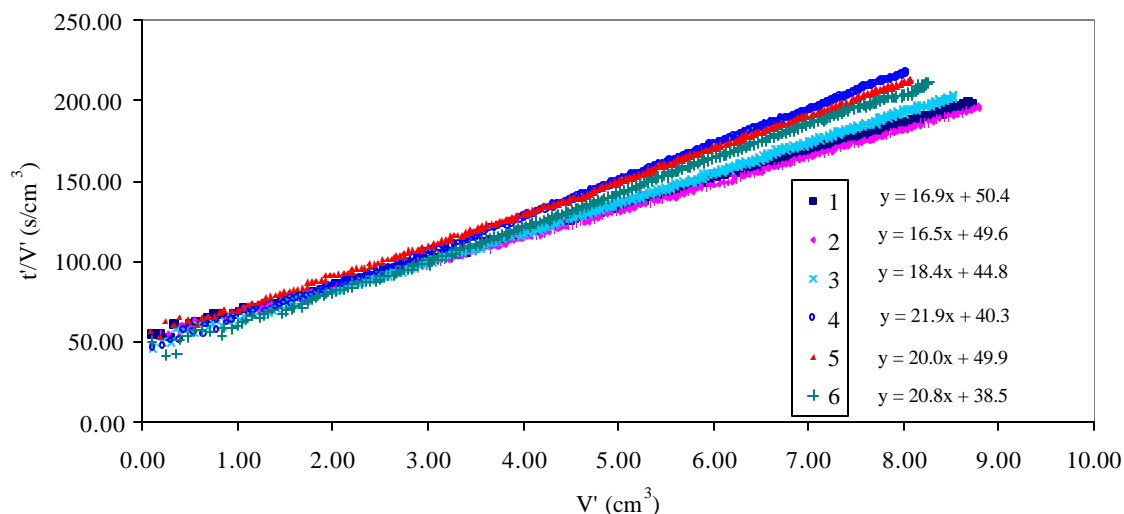
obtenidas ( $a'$ ) no representan tanta variabilidad (11%), en comparación con las obtenidas del gráfico  $t/V$  vs  $V$  (Figura 12.22) y en comparación a la diferencia de volumen final de filtrado obtenido para cada una de las filtraciones (Figura 12.21).



**Figura 12.21** Curvas de filtración obtenidas para la base 4



**Figura 12.22** Curvas de filtración para la base 4, transformadas según ecuación 4.27



**Figura 12.23** Curvas de filtración para la base 4, transformadas según  $t_0$ ,  $V_0$ .

En la Tabla 12.1, se pueden apreciar para las bases y las mezclas constituidas con las fracciones estrechas, los tres métodos mostrados anteriormente de representar la filtración, cada cual con sus respectivos coeficientes de variabilidad, como se puede observar los coeficientes obtenidos para la pendiente  $a'$  (gráf.  $t'/V'$  vs  $V'$ ) son menores a los obtenidos para la pendiente  $a$  (gráfica  $t/V$  vs  $V$ ) y también para los datos de volumen de filtrado a los treinta minutos, lo cual muestra que el tercer método, en el cual se representa la etapa darcyana, es el más apropiado para la representación de los datos de filtración de un lodo.

**Tabla 12.1** Coeficientes de variabilidad para las tres formas de representar la filtración

	Volumen de filtrado a 30 min. $V_L$ ( $\text{cm}^3$ )	CV (%)	Pendiente de la curva $t/V$ vs $V$ . $a$ ( $\text{s}/\text{cm}^6$ )	CV (%)	Pendiente de la curva $t'/V'$ vs $V'$ . $a'$ ( $\text{s}/\text{cm}^6$ )	CV (%)
Base1	11,724	3,7	15,751	3,3	17,478	3,0
Base2	11,254	8,6	17,988	7,8	20,937	4,5
Base3	11,491	4,0	16,247	3,6	18,314	1,5
Base4	14,598	13,5	13,889	20,1	19,354	11,0
Mezcla1	11,607	3,4	17,808	3,2	21,428	2,4
Mezcla4	56,316	19,5	3,841	23,9	22,070	9,7
Mezcla5	57,078	10,9	3,462	17,7	20,620	3,5
Mezcla6	36,071	18,6	6,518	16,1	25,854	5,2
Mezcla7	25,960	24,4	8,134	22,3	21,503	8,3
Mezcla8	40,402	38,1	3,517	43,7	11,522	32,8

## **12.6 Comparación del rango de magnitud de la permeabilidad con el obtenido mediante la ecuación de Carman-Kozeny**

Otro hecho importante que se debe tomar en cuenta es el orden de magnitud que presentan los valores de permeabilidad obtenidos, los cuales se encuentran en el orden de  $0,2 \mu\text{d}$  ( $2 \times 10^{-7} \mu\text{m}^2$ ) para el caso de la permeabilidad darcyana. Dichos valores se pueden comparar con los obtenidos mediante la ecuación 12.1, correspondiente a la ecuación de Carman-Kozeny corregida<sup>(27)</sup>, sustituyendo los valores adecuados para el caso de carbonato de calcio en agua:

$$K \cdot 180 \cdot \varphi(\varepsilon) = x_{sv}^2 = \left( \frac{6}{\alpha_{sv}} \right)^2 \cdot D_{3,2}^2 \quad (12.1)$$

donde

$$\varphi(\varepsilon) = \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3}$$

Suponiendo que las partículas son esféricas el coeficiente de forma  $\alpha_{sv}$  toma el valor de 6, estimando un  $D_{3,2}$  de aproximadamente  $15 \mu\text{m}$  y una porosidad de 0,5, resultan valores de permeabilidad por el orden de  $0,6 \mu\text{m}^2$ , es decir, alrededor de  $10^6$  veces mayor al obtenido para carbonato de calcio en solución con goma Xhantana - agua. Este hecho hace inferir que el polímero de la goma Xhantana utilizado como viscosificante en la preparación del lodo, está interfiriendo con las características mostradas por los revoques como son la permeabilidad y porosidad, por lo cual se puede deducir que parte de este polímero no se obtiene como filtrado, como debería de ser, sino que se queda en la torta formando parte de ella, ocupando espacios vacíos o poros que deberían formar parte de la porosidad de la torta, disminuyendo por consiguiente su permeabilidad y porosidad.

### ***13 Conclusiones***

---

- 13.1 Se obtienen dos zonas perfectamente distinguidas del proceso de formación del revoque, la etapa inicial o etapa incipiente y la etapa final o etapa darcyana, cada una de diferentes características, con distintos valores de permeabilidad y porosidad, ofreciendo la etapa final (etapa darcyana) un porcentaje de alrededor del 90% de la resistencia global, a pesar de representar solo un 70% aproximadamente de la masa depositada.
- 13.2 Las características de la zona darcyana están menos afectadas por la variabilidad que otras medidas (movilidad, permeabilidad y porosidad global, volumen de filtrado a los treinta minutos).
- 13.3 Las permeabilidades de la zona darcyana, la movilidad y el producto solidosidad permeabilidad darcyana se mantienen relativamente constantes a medida que cambia el tamaño  $D_{3,2}$ .
- 13.4 El uso del producto solidosidad permeabilidad darcyana se encuentra menos influenciado por las mediciones de la altura del revoque que para los otros parámetros (permeabilidad, movilidad, porosidad).
- 13.5 La granulometría ejerce poca influencia en los valores de permeabilidad obtenidos, contrario a lo que propone Carman-Kozeny, probablemente debido a que la goma xhantana puede estar ocupando espacios vacíos dentro del volumen del revoque, impidiendo el flujo del filtrado a través del mismo.

- 13.6 La mejor manera de representar los datos de filtración es utilizando el gráfico  $t'/V'$  vs  $V'$ , puesto que presenta la menor variabilidad en comparación con la representación de  $V$  vs  $t$  y de  $t/V$  vs  $V$ .
- 13.7 El tiempo incipiente promedio obtenido para las mezclas diseñadas a partir de las fracciones estrechas es diez veces mayor al obtenido mediante la filtración de las bases.
- 13.8 En la etapa incipiente presentada por los revoques formulados a partir de las mezclas, se encontró gran variabilidad en las características presentadas, especialmente en la permeabilidad y el volumen de filtrado, en comparación con las obtenidas a partir de las bases.
- 13.9 Las porosidades de los revoques formados se mantienen relativamente constantes a través de las diferentes filtraciones para un mismo lodo, y todas en general se encuentran aproximadamente en el rango de 0,45 a 0,5.
- 13.10 Las permeabilidades globales obtenidas de los revoques formados no presentan una tendencia clara según aumente el tamaño  $D_{3,2}$ .
- 13.11 Las porosidades y permeabilidades globales calculadas a partir de las mediciones del espesor del revoque, representan valores con mucha incertidumbre.
- 13.12 La etapa inicial determina el progreso de la filtración, influye directamente en el volumen de filtrado y en las características presentadas por el revoque total.

- 13.13 Los revoques formados con las mezclas reconstituidas de las bases resultaron en general, más gruesos, irregulares y más permeables que los obtenidos mediante la filtración de las bases.
- 13.14 Las mediciones del espesor del revoque generaron coeficientes de variabilidad de hasta un 40 %.

## ***14 Recomendaciones***

---

- 14.1 Aplicar métodos de clasificación en los que se pueda obtener partículas menores a  $1.3\mu\text{m}$  de manera reproducible, ya que estas representan la fracción sellante en la formación del revoque.
- 14.2 Controlar mejor la temperatura durante la filtración, así como la cantidad de lodo empleada, de tal manera de disminuir la variabilidad que se pueda presentar en el volumen de filtrado.
- 14.3 Estudiar el comportamiento que presenta la goma Xhantana durante el periodo de formación de la torta, mediante el análisis del volumen de filtrado obtenido y sus características, de tal manera de poder cuantificar su influencia en las características del revoque.
- 14.4 Medir de manera reproducible la altura del revoque, para poder obtener valores realmente representativos y disminuir la incertidumbre generada en los cálculos de porosidad.
- 14.5 Realizar pruebas de filtración sobre núcleos porosos, de tal manera de generar una zona incipiente similar a la que ocurriría en la formación y poder estudiar su comportamiento, con el fin de buscar minimizar los efectos que pueda ocasionar esta etapa a la formación.
- 14.6 Tratar de desarrollar una técnica mediante la cual se pueda estimar la porosidad de la etapa darcyana del revoque.

## ***15 Bibliografía***

---

- 1 MI Drilling Fluids Co. Drilling Fluid Engineering Manual. Magcobar/IMCO, Houston, 1991.
- 2 SORRENTINO, José. Estudio de la formación de revoques de fluidos de perforación con sólidos de distintas granulometrías. Laboratorio de Separaciones Mecánicas, Universidad Central de Venezuela. Caracas, 1998.
- 3 GRAY, George R. Composition and properties of drilling and completion fluids. Gulf Publishing Company. Houston, 1998.
- 4 SALAS, Guillermo José. Petróleo. Ediciones Petroleras Fovines N° 1, Quinta Edición. 1980.
- 5 MAGUAL, Alejandro y TORRES, Johan. Formación de Revoques con Esferas Lisas de Material Sintético. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. 1998.
- 6 SEHEULT, J. Recent Advances in Biopolymer Technology Improbé Fluid Functionally in Drilling, Workover, and Completion Operations.
- 7 BIRD, Byron. Fenómenos de Transporte. Editorial Reverté. Nueva York, 1982.
- 8 BAROID. Manual of Drilling Fluids Technology. Volumen I, Sección III, 1974.
- 9 AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Recommended Practice Standard Procedure for Field Testing Oil – Based Drilling Fluids (RP 13B – 2). Segunda Edición. Washigton DC, 1991.



- 10 ISMAIL, A.R., PEDEN J. Y ARSSHAD A. The Effect of Solids Concentration and Formation Characteristics on Formation Damage and Permeability Recovery. Society of petroleum Engineers /SPE 28762. Regional Growth, Meeting The Challenge, Asia Pacific oil & Gas Conference, 1994.
- 11 SMITH, P.S. Drilling Fluid Desing to Prevent Formation Damage in High Permeability Fartz Arenite Sandstones. Society of Petroleum Engineers. Sp 36430.6 – 9. USA, Octubre 1996.
- 12 FRESHWATER & SCARLET. The effect of particle-size distribution on the permeability of filter cakes. Trans Instn Chem Engrs. Vol 43, 1965.
- 13 McCABE, SMITH y PETERS. Operaciones unitarias en Ingeniería Química. Editorial McGraw-Hill. Madrid - España, 1985.
- 14 RUSHTON, WARD y HOLDICH. Solid-Liquid Filtration and Separation Technology. Editorial VCH, primera Edición. Alemania, 1996.
- 15 MARANO y RIVAS. Efecto del tipo de determinación de la distribución de tamaños de partículas en la relación entre dispersión y permeabilidad. Trabajo especial de Grado. UCV. Caracas, 1999.
- 16 SVAROSKY, Ladislav. Solid-Liquid Separation. Scholl of Powder Technology. University of Bradford, 1990.
- 17 RHODES, Martin. Introduction to Particle Technology. Editorial John Wiley & Sons Ltd. Inglaterra, 1998.
- 18 GLENN, E. y SLUSSER, M. Factors affecting well Productivity (I). Drilling Fluid Filtration. Petroleum Transactions, Aime. 1957.

- 19 GLENN, E. y SLUSSER, M. Factors affecting well Productivity (II). Drilling Fluid Particle Invasion into Porous Media. Petroleum Transactions, Aime. 1957.
- 20 DE SOUSA, J. y ZAMBRANO, G. Formación de revoques con Carbonato de Calcio. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Caracas, 1998.
- 21 DEL HIERRO, Guzmán y FABIANI, Ana. Efecto del tamaño de las partículas en las características del revoque. Trabajo Especial de Grado. UCV. Caracas, 1999.
- 22 GARCÍA, Janneth y GIMÓN, Raquel. Efecto del contenido de partículas finas en las características del revoque. Trabajo Especial de Grado. UCV. Caracas, 1999.
- 23 PESSOLANO, Gabriel. Caracterización de la etapa inicial de formación del revoque. Trabajo Especial de Grado. UCV. Caracas, 2000.
- 24 LEZAMA, PESSOLANO, SORRENTINO y VALENTINO. Introducción del concepto de la doble permeabilidad en la caracterización del revoque. III Jornadas de Investigación Básica Orientada. Caracas, 2000.
- 25 SORRENTINO, José *et al.* American Filtration Society Meeting. Tampa, Florida, mayo 2001. Aceptado para presentación.
- 26 SORRENTINO, José. Influence of particle size distribution on cake permeability. Abstract. Laboratorio de Separaciones Mecánicas. UCV. Abril-2000.

## APÉNDICES

---

### APÉNDICE A1. CÁLCULOS TIPOS

Los cálculos tipos que se presentan a continuación están referidos a los datos obtenidos para las pruebas realizadas a la base 1: carbonato Intecarb CM1015.

#### 1. Construcción de la gráfica volumen de filtrado contra tiempo.

Los datos obtenidos de la filtración corresponden a la masa de filtrado a cada instante, tomando como densidad del filtrado la densidad del agua ( $1 \text{ g/cm}^3$ ), se transforman directamente en el volumen de filtrado en  $\text{cm}^3$ . En la Figura A.1.1 se puede observar las curvas de filtración obtenidas.

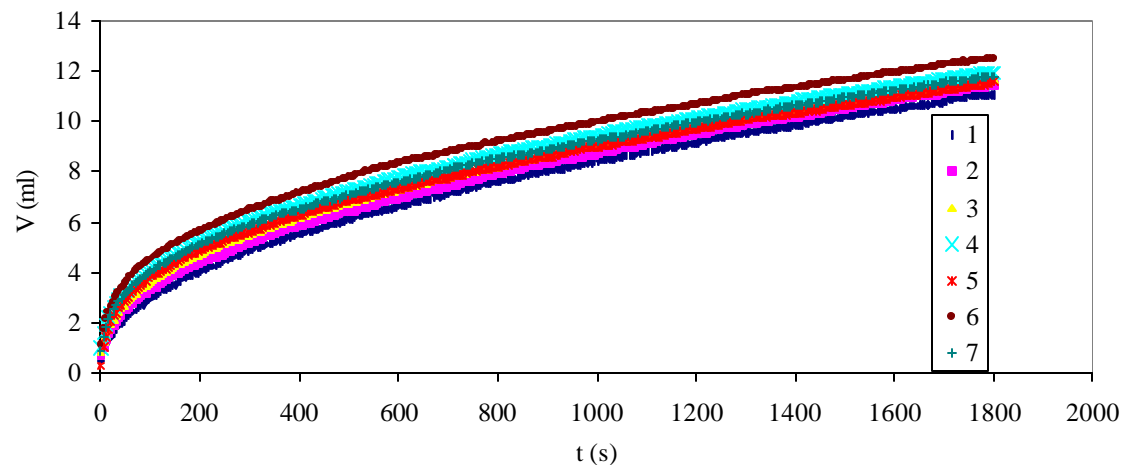
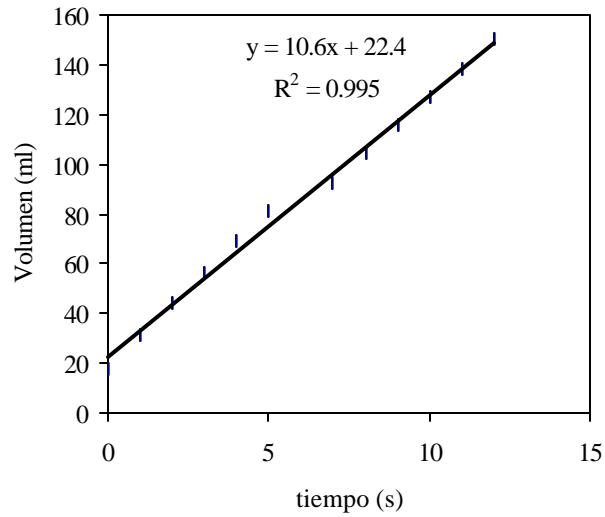


Figura A.1.1 Gráfica V vs t.

#### 2. Determinación de la resistencia del medio filtrante.

##### 2.1 Construcción de la gráfica V vs t.

Este paso se lleva a cabo de manera similar al anterior. En la Figura A.1.2 se muestra la curva obtenida.



**Figura A.1.2** Permeación del medio filtrante

## 2.2 Cálculo de la resistencia del medio filtrante.

$$R_m = \frac{A\Delta p_m}{\mu_a m_n}$$

Ejemplo:

$$R_m = \frac{0.00229\text{m}^2 * 100\text{psi} * 1.013 * 10^5 \text{Pa}}{0.00085\text{Pa} * \text{s} * 10.6 \frac{\text{s}}{\text{cm}^3} * \frac{10^6 \text{cm}^3}{\text{lm}^3}}$$

$$R_m = 1.53 * 10^{11} \text{m}^{-1}$$

Este cálculo se realiza para cada papel de filtro a utilizar.

## 3. Determinación de la altura del revoque

$$h_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_{c,i}$$

El subíndice  $i$  denota las repeticiones de las mediciones, y  $n$  el número de mediciones.

Ejemplo:

$$h_c = \frac{10^{-3}}{8} * (0.451 + 0.644 + 0.455 + 0.423 + 0.523 + 0.607 + 0.638 + 0.546)$$

$$h_c = 3.73 * 10^{-4} \text{ m}$$

#### 4. Determinación de la porosidad global del revoque

$$\varepsilon = 1 - \frac{M_{R,i}}{\rho_s Ah_{c,i}}$$

Ejemplo:

$$\varepsilon = 1 - \frac{0.00126 \text{ Kg}}{2711 \text{ Kg/m}^3 * 0.00229 \text{ m}^2 * 3.73 * 10^{-4} \text{ m}}$$

$$\varepsilon = 0.457$$

#### 5. Determinación de los parámetros adimensionales

##### 5.1 Relación de densidades $\lambda$ .

$$\lambda = \frac{\rho_L}{\rho_s}$$

Ejemplo:

$$\lambda = \frac{1000 \text{ Kg/m}^3}{2711 \text{ Kg/m}^3}$$

$$\lambda = 0.369$$

5.2 Relación entre la masa de sólidos en la suspensión original y la masa total de líquido en la suspensión.

$$y' = \frac{M_{SS}}{M_{LS}}$$

Ejemplo:

$$y' = \frac{0.032 \text{ Kg}}{0.338 \text{ Kg}}$$

$$y' = 0.0947$$

5.3 Parámetro adimensional  $\kappa$ .

$$\kappa = \frac{y'\lambda}{1 - \varepsilon(1 - y'\lambda)}$$

Ejemplo:

$$\kappa = \frac{0.0947 * 0.369}{1 - 0.457(1 - 0.0947 * 0.369)}$$

$$\kappa = 0.0625$$

**6. Determinación de la viscosidad efectiva de la goma Xhantana.**

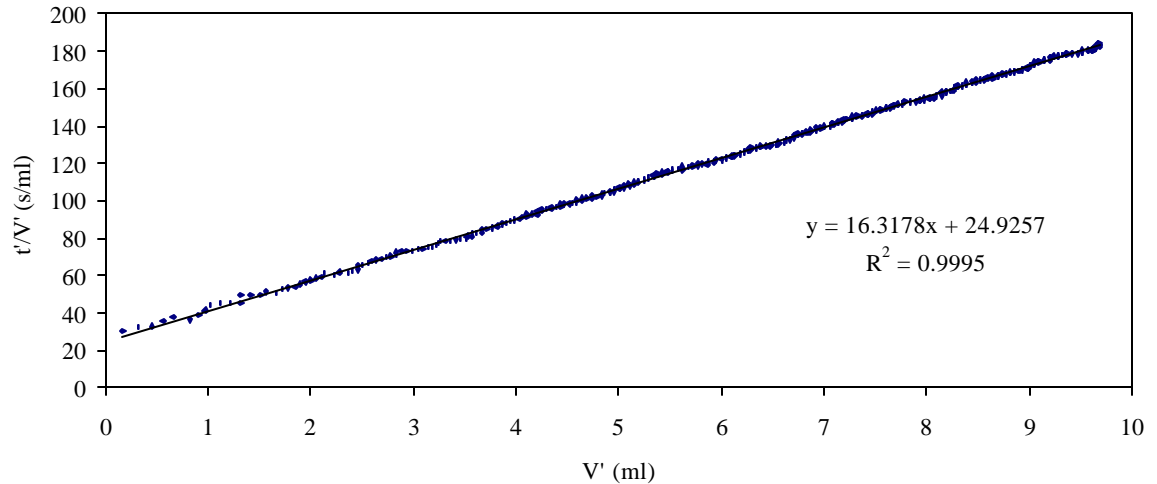
6.1 Construcción del gráfico  $t'/V'$  vs  $V'$

$$\frac{t'}{V'} = \frac{t_i - t_0}{V_i - V_0}$$

Ejemplo:

$$\frac{t'}{V'} = \frac{65 - 20}{2.421 - 1.41} \frac{\text{s}}{\text{cm}^3}$$

$$\frac{t'}{V'} = 44.29 \text{ s/cm}^3$$



**Figura A.1.3** Gráfico  $t'/V'$  vs  $V'$

### 6.2 Cálculo del caudal de filtrado a los 30 minutos<sup>(26)</sup>.

$$q_g = \frac{1}{A} \frac{dV}{dt} \Big|_{V=V_f} = \frac{1}{A} \cdot \frac{1}{2a'V'+b'}$$

Ejemplo:

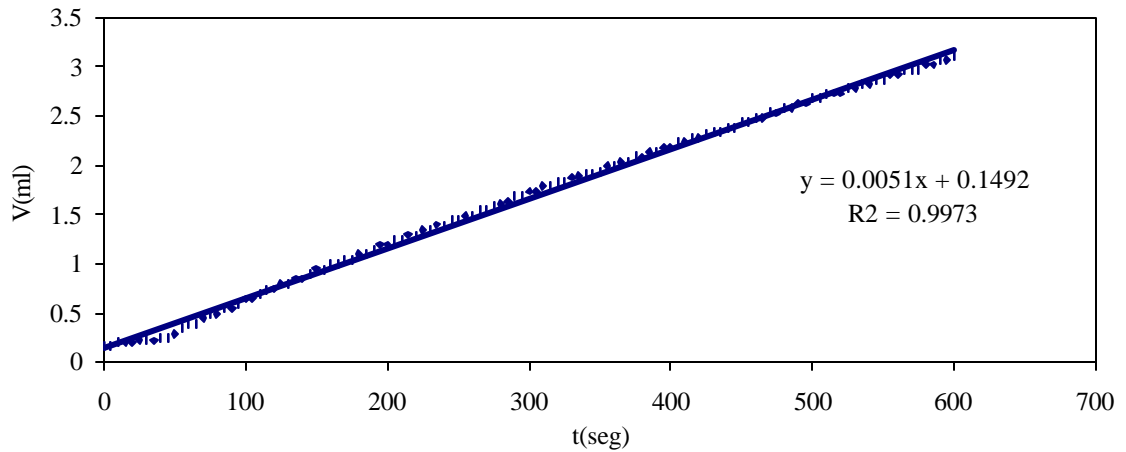
$$q_g = \frac{1}{0.00229 \text{ m}^2} * \frac{1}{\left( 2 * 16.3178 \frac{\text{s}}{\text{cm}^6} * 8.72 \text{ cm}^3 + 24.9257 \frac{\text{s}}{\text{cm}^3} \right) * \frac{10^6 \text{ cm}^3}{1 \text{ m}^3}}$$

$$q_g = 1.26 * 10^{-6} \text{ m/s}$$

### 6.3 Cálculo del caudal de agua durante la permeación del revoque

#### 6.3.1 Construcción de la gráfica V vs t para el proceso de permeación del revoque

Se lleva a cabo de manera similar al gráfico de permeación del medio limpio. En la Figura A.4 se muestra el gráfico de permeación del revoque.



**Figura A.1.4** Gráfico V vs t para el proceso de permeación del revoque

### 6.3.2 Caudal de agua durante la permeación del revoque<sup>(26)</sup>

$$q_a = \frac{m_p}{A}$$

Ejemplo:

$$q_a = \frac{0.0051 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}} * \frac{1\text{m}^3}{10^6 \text{cm}^3}}{0.00229\text{m}^2}$$

$$q_a = 2.18 * 10^{-6} \text{ m / s}$$

### 6.4 Cálculo de la viscosidad efectiva de la goma Xhantana.<sup>(26)</sup>

$$\mu_g = \mu_a \cdot \frac{q_a}{q_g}$$

Ejemplo:

$$\mu_g = 0.00085\text{Pa} * \text{s} \frac{2.18 * 10^{-6} \text{ m / s}}{1.26 * 10^{-6} \text{ m / s}}$$



$$\mu_g = 1.15 * 10^{-3} \text{ Pa} * \text{s}$$

Este cálculo se llevó a cabo para todas las filtraciones obtenidas de las bases y la mezcla1, obteniendo valores relativamente constantes, con los cuales se calculó una viscosidad promedio, la cual se utilizará para los cálculos consiguientes como viscosidad efectiva de la goma Xhantana. El valor obtenido para la viscosidad es  $1.63 * 10^{-3} \text{ Pa} * \text{s}$ .

### 7. Determinación de la movilidad de la etapa darcyana del revoque.

$$\frac{K_D}{\mu_g} = \frac{\kappa}{a^2 * A^2 * \Delta p}$$

Ejemplo:

$$\frac{K_D}{\mu_g} = \frac{0.0625}{0.0051 \frac{\text{s}}{\text{cm}^6} \frac{10^{12} \text{cm}^6}{1\text{m}^6} * 2 * (0.00229\text{m}^2)^2 * 500\text{psi} \frac{1.013 * 10^5 \text{Pa}}{14.7\text{psi}}}$$

$$\frac{K_D}{\mu_g} = 1.06 * 10^{-16} \frac{\text{m}^2 \frac{1.013 * 10^{18} \mu\text{d}}{1\text{m}^2}}{\text{Pa} * \text{s} \frac{1000\text{cp}}{1\text{Pa} * \text{s}}} = 0.107 \mu\text{d}/\text{cp}$$

### 8. Determinación de la permeabilidad de la etapa darcyana.

$$K_D = \frac{K_D}{\mu_g} \mu_g$$

Ejemplo:

$$K_D = 1.06 * 10^{-16} \frac{\text{m}^2}{\text{Pa} * \text{s}} * 0.00163\text{Pa} * \text{s}$$

$$K_D = 1.73 * 10^{-19} \text{ m}^2 = 0.175 \mu\text{d}$$

### 9. Determinación de la permeabilidad global del revoque.

$$K = h_c \frac{1}{\left( \frac{A \Delta P}{m \mu_a} - R_m \right)}$$

Ejemplo:

$$K = 3.73 * 10^{-4} \text{ m} \frac{1}{\left( \frac{0.00229 \text{ m}^2 * 500 \text{ psi} * \frac{1.013 * 10^5 \text{ Pa}}{14.7 \text{ psi}}}{0.0051 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}} * \frac{1 \text{ m}^3}{10^6 \text{ cm}^3} * 0.0085 \text{ Pa} * \text{s}} - 10^{13} \text{ m}^{-1} \right)}$$

$$K = 2.02 * 10^{-19} \text{ m}^2 = 0.205 \mu\text{d}$$

### 10. Determinación de las resistencias de las dos etapas de la formación del revoque. <sup>(26)</sup>

#### 10.1 Cálculo de la resistencia global

$$R_{CG} = \frac{\Delta p \cdot A}{\mu_g} \cdot (2a' V' + b') - R_M$$

Ejemplo:

$$R_{CG} = \frac{500 \text{ psi} \frac{1.013 * 10^5 \text{ Pa}}{14.7 \text{ psi}} * 0.00229 \text{ m}^2}{0.00163 \text{ Pa} * \text{s}} \left( 2 * 16.3 \frac{\text{s}}{\text{cm}^6} * 9.68 \text{ cm}^3 + 24.9 \frac{\text{s}}{\text{cm}^3} \right) \frac{10^3 \text{ cm}^3}{1 \text{ m}^3} - 10^{13} \text{ m}^{-1}$$

$$R_{CG} = 1.85 * 10^{15} \text{ m}^{-1}$$

#### 10.2 Cálculo de la resistencia incipiente

$$R_{CI} = \frac{\Delta p \cdot A}{\mu_g} \cdot b' - R_M$$

Ejemplo:

$$R_{CI} = \frac{500 \text{psi} * \frac{1.013 * 10^5 \text{Pa}}{14.7 \text{psi}} * 0.00229 \text{m}^2}{0.00163 \text{Pa} * \text{s}} * 24.9 \frac{\text{s}}{\text{cm}^3} - 10^{13} \text{m}^{-1}$$

$$R_{CI} = 3.37 * 10^{14} \text{m}^{-1}$$

### 10.3 Cálculo de la resistencia darcyana

$$R_{CD} = R_{CG} - R_{CI}$$

Ejemplo:

$$R_{CD} = 2.37 * 10^{15} \text{m}^{-1} - 3.37 * 10^{14} \text{m}^{-1}$$

$$R_{CD} = 2.03 * 10^{15} \text{m}^{-1}$$

## 11. Contribución porcentual de cada zona a la resistencia global<sup>(26)</sup>

### 11.1 Contribución porcentual de la zona darcyana a la resistencia global

$$\% R_{CD} = \frac{R_{CD}}{R_{CG}} * 100$$

Ejemplo:

$$\% R_{CD} = \frac{2.03 * 10^{15} \text{m}^{-1}}{2.37 * 10^{15} \text{m}^{-1}}$$

$$\% R_{CD} = 85.8\%$$

## 11.2 Contribución porcentual de la zona incipiente a la resistencia global

$$\% R_{CI} = \frac{R_{CI}}{R_{CG}} * 100$$

Ejemplo:

$$\% R_{CI} = \frac{3.37 * 10^{14} \text{ m}^{-1}}{2.37 * 10^{15} \text{ m}^{-1}}$$

$$\% R_{CI} = 14.2\%$$

## 12. Contribución porcentual de cada zona a la cantidad de revoque<sup>(26)</sup>

### 12.1 Contribución porcentual de la zona darcyana a la cantidad de revoque

$$\% m_{CD} = \frac{m_{CD}}{m_{CG}} * 100 \approx \frac{V'}{V} * 100$$

Ejemplo:

$$\% m_{CD} = \frac{9.68 \text{ cm}^3}{11.083 \text{ cm}^3} * 100$$

$$\% m_{CD} = 87.3\%$$

### 12.2 Contribución porcentual de la zona incipiente a la cantidad de revoque

$$\% m_{CI} = \frac{m_{CI}}{m_{CG}} * 100 \approx \frac{V_0}{V} * 100$$

Ejemplo:

$$\% m_{CI} = \frac{1.41 \text{ cm}^3}{11.083 \text{ cm}^3} * 100$$

$$\% m_{CI} = 12.7\%$$

### 13. Cálculo del producto permeabilidad-solidosidad<sup>(26)</sup>

#### 13.1 Cálculo de la concentración de sólidos en la suspensión original

$$\phi_s = \frac{V_{SS}}{V_s} = \frac{M_{SS} / \rho_s}{M_{SS} / \rho_s + M_{LS} / \rho_L}$$

Ejemplo:

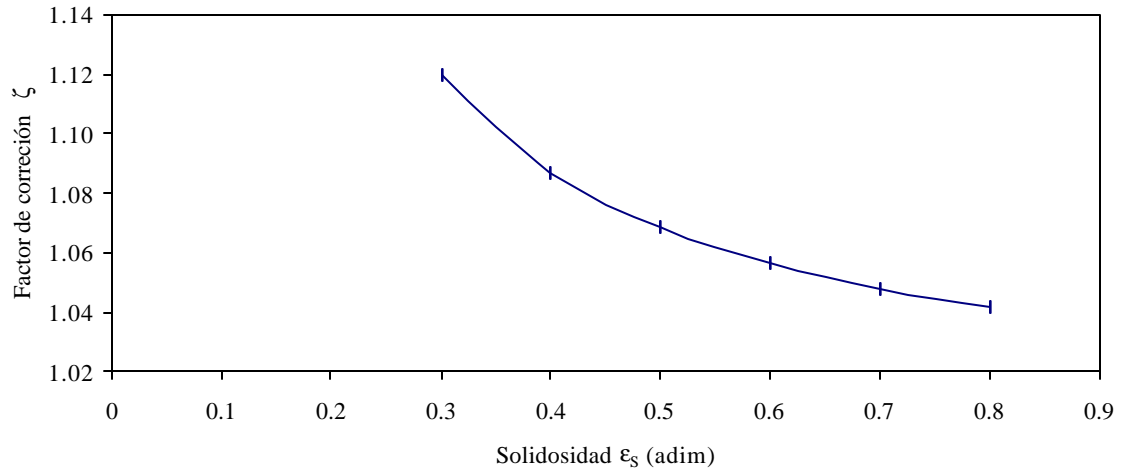
$$\phi_s = \frac{0.03\text{Kg} / 2711\text{Kg} / \text{m}^3}{0.03\text{Kg} / 2711\text{Kg} / \text{m}^3 + 0.338\text{Kg} / 1000\text{Kg} / \text{m}^3}$$

$$\phi_s = 0.032$$

#### 13.2 Cálculo del factor de corrección $\zeta$

$$\zeta = \left[ \frac{1}{1 - \phi_s / \epsilon_s} \right]$$

En la Figura A.5 se muestra la variación del factor de corrección  $\zeta$  con respecto a la solidosidad para una concentración de sólidos  $\phi_s$  de 0.032.



**Figura A.1.5** Variación del factor de corrección  $\zeta$  con la solidosidad ( $\epsilon_s$ )

Si el valor de la solidosidad no se sabe, se puede suponer igual a 0.5, obteniendo de la Figura A.5 el factor de corrección  $\zeta$  correspondiente igual a 1.07 aproximadamente. El máximo error que se puede cometer al suponer la solidosidad 0.5, sucede cuando este parámetro equivale a 0.3, donde se comete un error del 4.8%, como este error es pequeño, suponemos un factor de corrección  $\zeta$  igual a 1.07.

### 13.3 Cálculo de la relación masa de torta seca - volumen de filtrado ( $\omega$ )

$$\omega = \rho_s \phi_s \zeta$$

Ejemplo:

$$\omega = 2711 \text{Kg} / \text{m}^3 * 0.032 * 1.07$$

$$\omega = 91.96 \text{Kg} / \text{m}^3$$

### 13.4 Cálculo de la resistencia específica de la zona darcyana

$$\alpha_{CD} = \frac{a'2A^2\Delta p}{\mu_g \omega}$$

Ejemplo:

$$\alpha_{CD} = \frac{16.318 \frac{s}{cm^6} * \frac{10^{12} cm^6}{1m^6} * 2 * (0.00229m^2)^2 * 500psi * \frac{1.013 * 10^5 Pa}{14.7psi}}{0.00163Pa * s * 91.96 Kg/m^3}$$

$$\alpha_{CD} = 3.93 * 10^{15} \frac{m^{-1}}{Kg/m^2}$$

### 13.5 Cálculo de la masa de torta seca de la etapa darcyana por unidad de área

$$m_{CD} = \frac{\omega V'}{A}$$

Ejemplo:

$$m_{CD} = \frac{91.96Kg/m^3 * 9.68cm^3 * \frac{1m^3}{10^6 cm^3}}{0.00229m^2}$$

$$m_{CD} = 0.389Kg/m^2$$

### 13.6 Cálculo de la masa de torta seca por unidad de área

$$m_{CG} = \frac{M_{CG}}{A}$$

Ejemplo:

$$m_{CG} = \frac{0.00126Kg}{0.00229m^2}$$

$$m_{CG} = 0.548Kg/m^2$$

### 13.7 Cálculo de la resistencia específica de la zona incipiente

$$\alpha_{CI} = \frac{R_{CI}}{m_{CG} - m_{CI}}$$

Ejemplo:

$$\alpha_{CI} = \frac{1.26 * 10^{14} \text{ m}^{-1}}{(0.548 - 0.389) \text{ Kg} / \text{ m}^2}$$

$$\alpha_{CI} = 7.88 * 10^{14} \text{ m}^{-1} / \text{ Kg}$$

### 13.8 Cálculo de la resistencia específica global

$$\alpha_{CG} = \frac{R_{CG}}{m_{CG}}$$

Ejemplo:

$$\alpha_{CG} = \frac{1.85 * 10^{15} \text{ m}^{-1}}{0.548 \text{ Kg} / \text{ m}^2}$$

$$\alpha_{CG} = 3.36 * 10^{15} \text{ m}^{-1} / \text{ Kg}$$

### 13.9 Cálculo del producto permeabilidad-solidosidad global

$$K_g * \epsilon_s = \frac{1}{\alpha_{CG} * \rho_s}$$

Ejemplo:

$$K_g * \epsilon_s = \frac{1}{3.36 * 10^{15} \frac{\text{m}^{-1}}{\text{Kg}} * 2711 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * \frac{1.013 * 10^{18} \mu\text{d}}{\text{lm}^2}}$$

$$K_g * \epsilon_s = 0.111 \mu\text{d}$$

### 13.10 Cálculo del producto permeabilidad-solidosidad de la zona incipiente

$$K_I * \epsilon_s = \frac{1}{\alpha_{CI} * \rho_s}$$



Ejemplo:

$$K_I * \epsilon_s = \frac{1}{7.88 * 10^{14} \frac{m^{-1}}{Kg} * 2711 \frac{Kg}{m^3} * \frac{1.013 * 10^{18} \mu d}{1m^2}}$$

$$K_I * \epsilon_s = 0.475 \mu d$$

### 13.11 Cálculo del producto permeabilidad-solidosidad de la zona darcyana

$$K_D * \epsilon_s = \frac{1}{\alpha_{CD} * \rho_s}$$

Ejemplo:

$$K_D * \epsilon_s = \frac{1}{3.94 * 10^{15} \frac{m^{-1}}{Kg} * 2711 \frac{Kg}{m^3} * \frac{1.013 * 10^{18} \mu d}{1m^2}}$$

$$K_D * \epsilon_s = 0.095 \mu d$$

## 14. Determinación del coeficiente de variabilidad

### 14.1 Cálculo de la desviación estándar

$$\sigma = \sqrt{\frac{n \sum x^2 - (\sum x)^2}{n(n-1)}}$$

Ejemplo:

Desviación estándar de la altura del revoque:

$$\sigma = \sqrt{\frac{7(0.451^2 + \dots + 0.546^2) - (0.451 + \dots + 0.546)^2}{7 * (7-1)}}$$

$$\sigma = 0.088 \text{mm}$$

### 14.2 Cálculo del promedio

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

Ejemplo:

$$\bar{x} = \frac{(0.451 + 0.644 + 0.455 + 0.423 + 0.523 + 0.607 + 0.638 + 0.546)}{7}$$

$$\bar{x} = 0.536 \text{ mm}$$

### 14.3 Cálculo del coeficiente de variabilidad

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} * 100$$

Ejemplo:

$$CV = \frac{0.088 \text{ mm}}{0.536 \text{ mm}} * 100$$

$$CV = 16.4\%$$



**Tabla A.2.1** Distribución de tamaños de partículas para las mezclas (continuación)

Tamaño de partícula x ( $\mu\text{m}$ )	Frecuencia acumulada (%)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
0.2518	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.2825	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.317	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.3557	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.3991	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.4477	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.5024	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.5637	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.6325	0.07	0.06	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.7096	0.18	0.18	0.14	0.06	0.03	0.05	0.04	0.00
0.7962	0.36	0.38	0.31	0.19	0.10	0.15	0.12	0.00
0.8934	0.56	0.62	0.50	0.35	0.22	0.29	0.23	0.00
1.0024	0.79	0.89	0.72	0.54	0.37	0.45	0.35	0.08
1.1247	1.02	1.17	0.96	0.74	0.56	0.63	0.48	0.19
1.2619	1.27	1.47	1.22	0.97	0.79	0.83	0.63	0.34
1.4159	1.52	1.77	1.49	1.23	1.08	1.07	0.80	0.53
1.5887	1.79	2.09	1.79	1.51	1.44	1.33	0.98	0.76
1.7825	2.09	2.42	2.11	1.84	1.88	1.62	1.18	1.03
2	2.42	2.77	2.46	2.19	2.39	1.95	1.40	1.33
2.244	2.79	3.14	2.84	2.57	2.96	2.30	1.65	1.64
2.5179	3.20	3.54	3.24	2.98	3.57	2.68	1.91	1.96
2.8251	3.66	4.00	3.67	3.40	4.20	3.07	2.20	2.27
3.1698	4.17	4.53	4.14	3.84	4.85	3.50	2.51	2.56
3.5566	4.74	5.17	4.66	4.30	5.49	3.95	2.84	2.84
3.9905	5.41	5.97	5.27	4.80	6.13	4.45	3.21	3.09

**Tabla A.2.1** Distribución de tamaños de partículas para las mezclas (continuación)

Tamaño de partícula x ( $\mu\text{m}$ )	Frecuencia acumulada (%)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
4.4774	6.18	6.98	6.00	5.35	6.77	5.00	3.62	3.32
5.0238	7.08	8.23	6.88	5.99	7.45	5.64	4.06	3.56
5.6368	8.15	9.80	7.96	6.74	8.21	6.39	4.54	3.81
6.3246	9.42	11.72	9.29	7.66	9.09	7.28	5.07	4.09
7.0963	10.94	14.04	10.92	8.79	10.17	8.34	5.64	4.43
7.9621	12.74	16.78	12.90	10.18	11.52	9.59	6.26	4.86
8.9337	14.87	19.98	15.28	11.89	13.22	11.08	6.92	5.39
10.0237	17.36	23.62	18.07	13.96	15.32	12.81	7.62	6.04
11.2468	20.22	27.70	21.31	16.43	17.88	14.80	8.38	6.81
12.6191	23.48	32.16	24.99	19.32	20.92	17.05	9.22	7.69
14.1589	27.14	36.96	29.10	22.65	24.44	19.55	10.16	8.66
15.8866	31.17	42.02	33.57	26.39	28.41	22.28	11.25	9.70
17.825	35.56	47.23	38.36	30.51	32.77	25.21	12.56	10.78
20	40.24	52.52	43.39	34.96	37.43	28.32	14.17	11.86
22.4404	45.18	57.76	48.56	39.68	42.30	31.57	16.17	12.91
25.1785	50.29	62.86	53.78	44.58	47.27	34.94	18.67	13.93
28.2508	55.51	67.73	58.95	49.61	52.24	38.44	21.73	14.91
31.6979	60.75	72.29	64.00	54.69	57.13	42.07	25.45	15.92
35.5656	65.93	76.51	68.86	59.76	61.87	45.85	29.84	17.04
39.9052	70.96	80.35	73.47	64.75	66.41	49.80	34.90	18.39
44.7744	75.75	83.80	77.78	69.61	70.71	53.95	40.57	20.13
50.2377	80.23	86.87	81.76	74.26	74.75	58.29	46.72	22.47
56.3677	84.32	89.56	85.37	78.65	78.52	62.82	53.20	25.61
63.2456	87.97	91.89	88.59	82.72	82.01	67.48	59.82	29.70
70.9627	91.12	93.88	91.39	86.40	85.21	72.21	66.37	34.87





### APÉNDICE A.3 CURVAS DE FILTRACIÓN

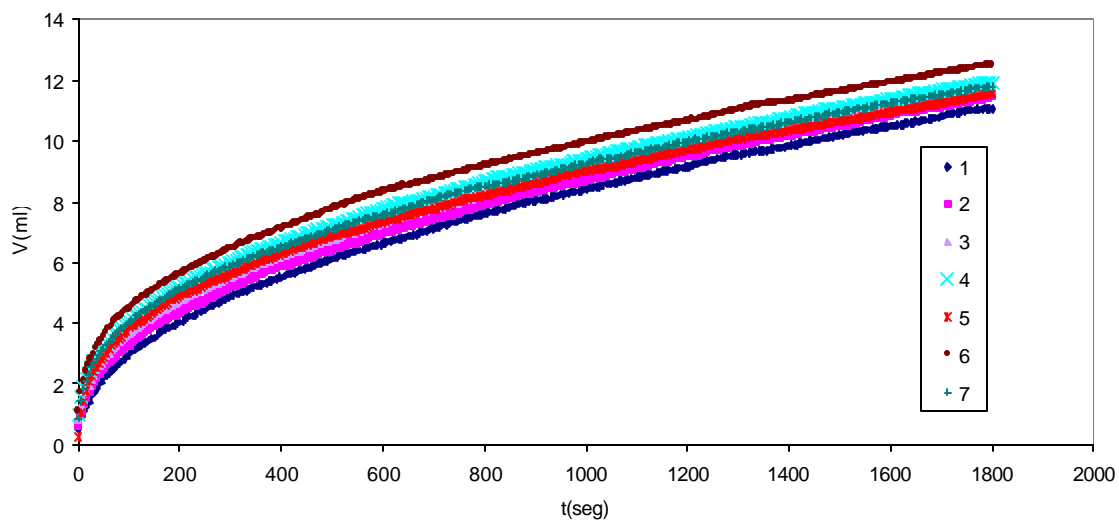


Figura A.3.1 Curvas de filtración para la Base 1.

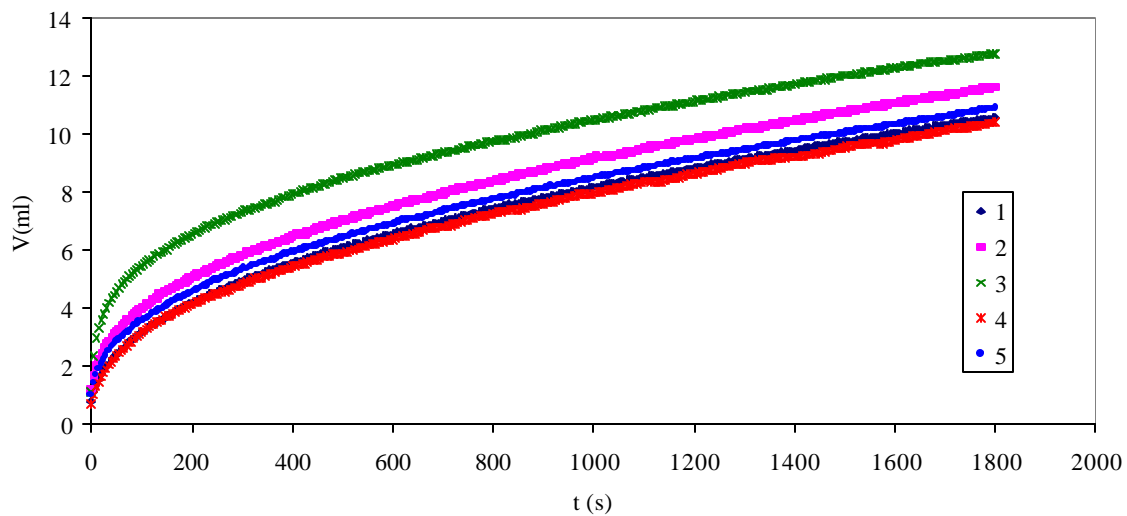


Figura A.3.2 Curvas de filtración para la Base 2.



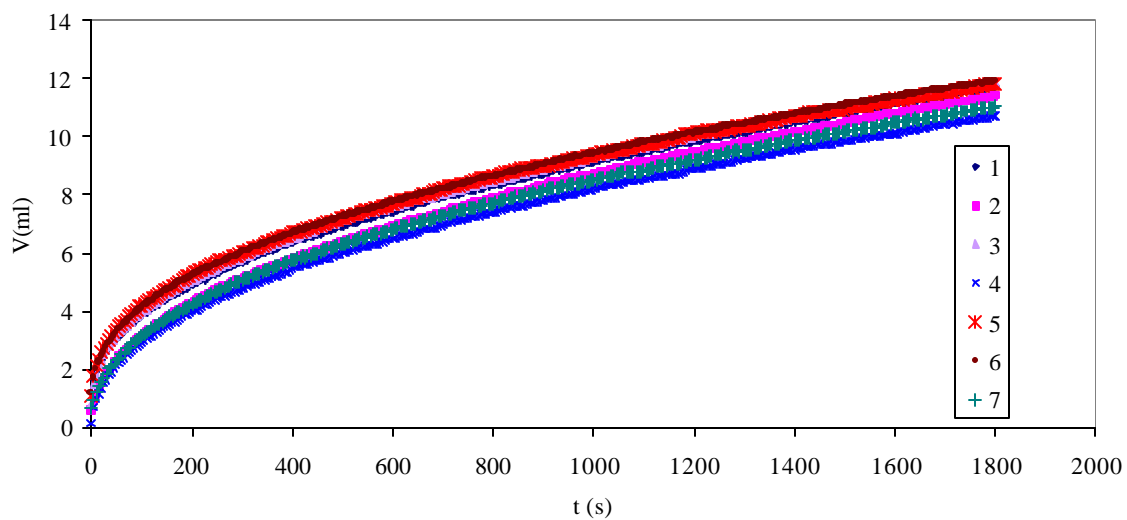


Figura A.3.3 Curvas de filtración para la base3.

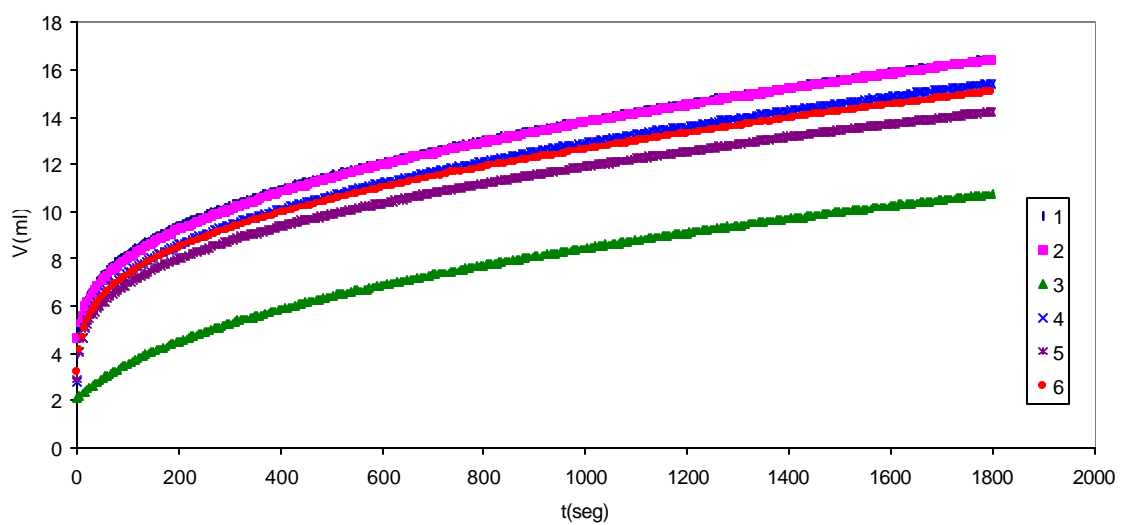
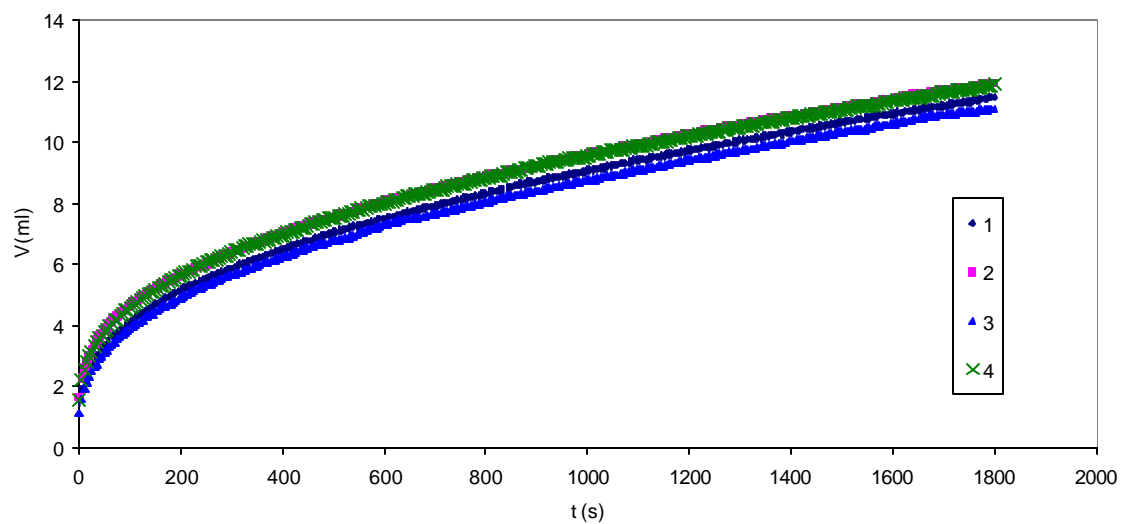
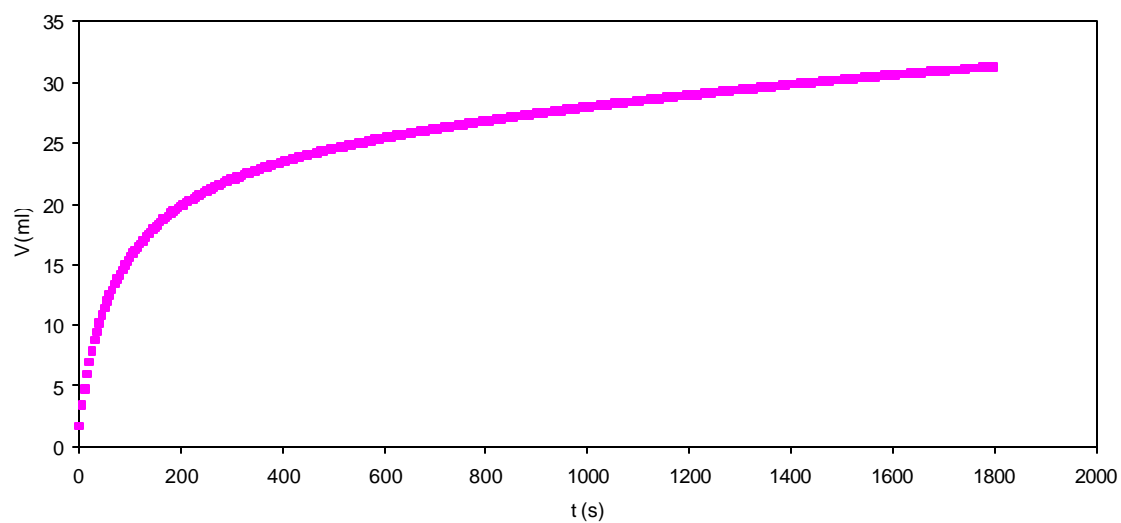


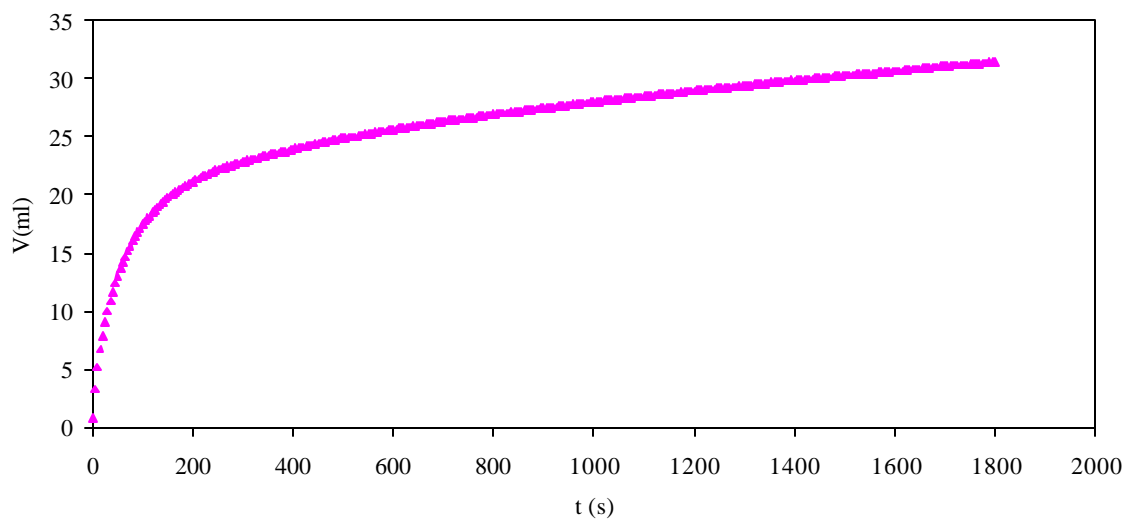
Figura A.3.4 Curvas de filtración para la base4



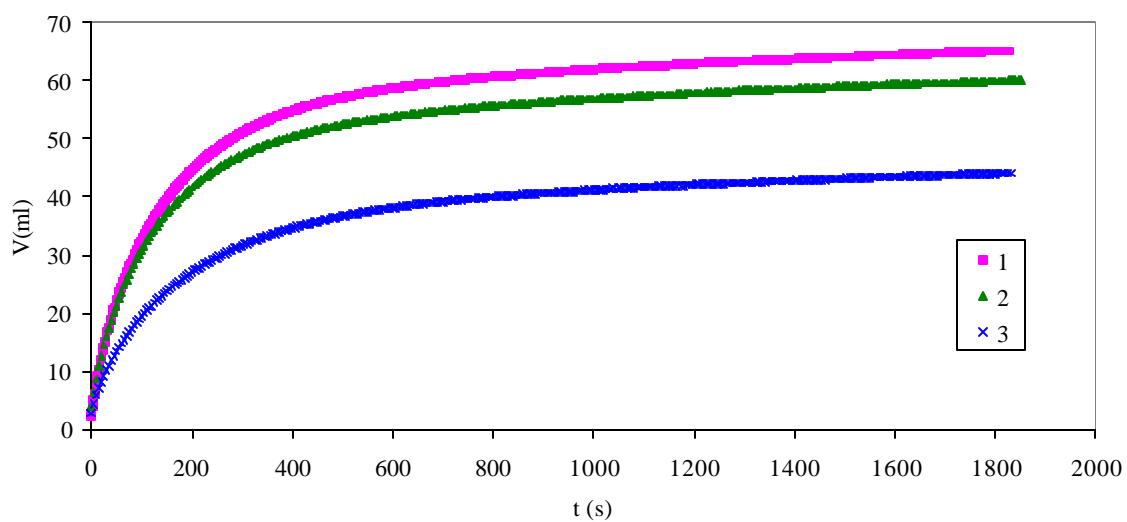
**Figura A.3.5** Curvas de filtración para la mezcla 1.



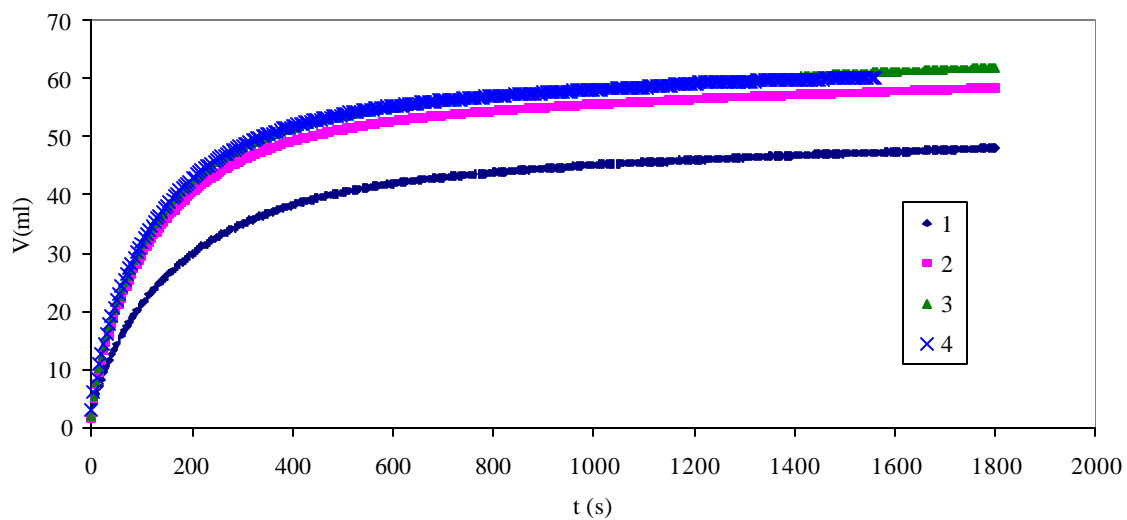
**Figura A.3.6** Curva de filtración para la mezcla 2.



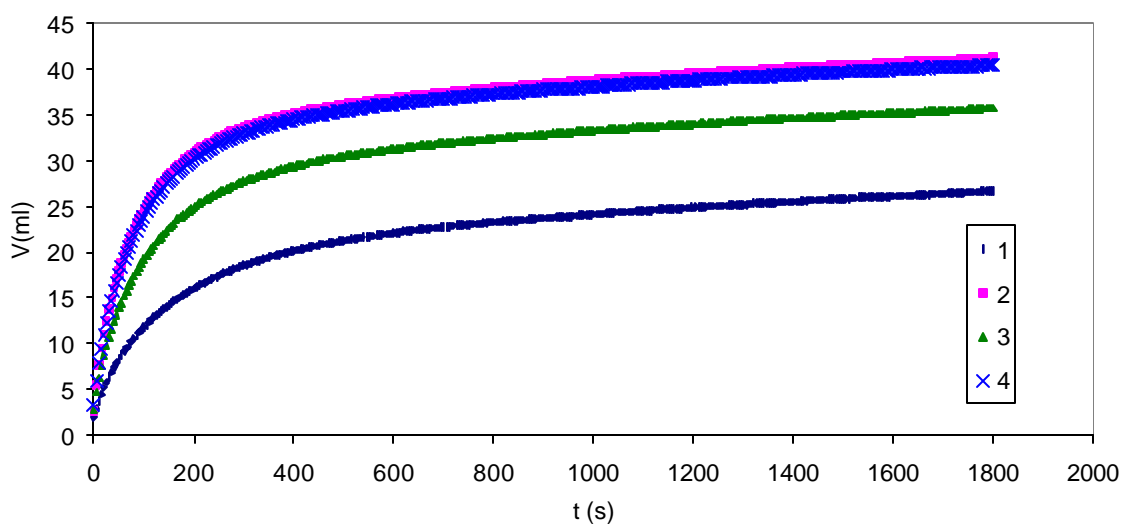
**Figura A.3.7** Curva de filtración para la mezcla 3.



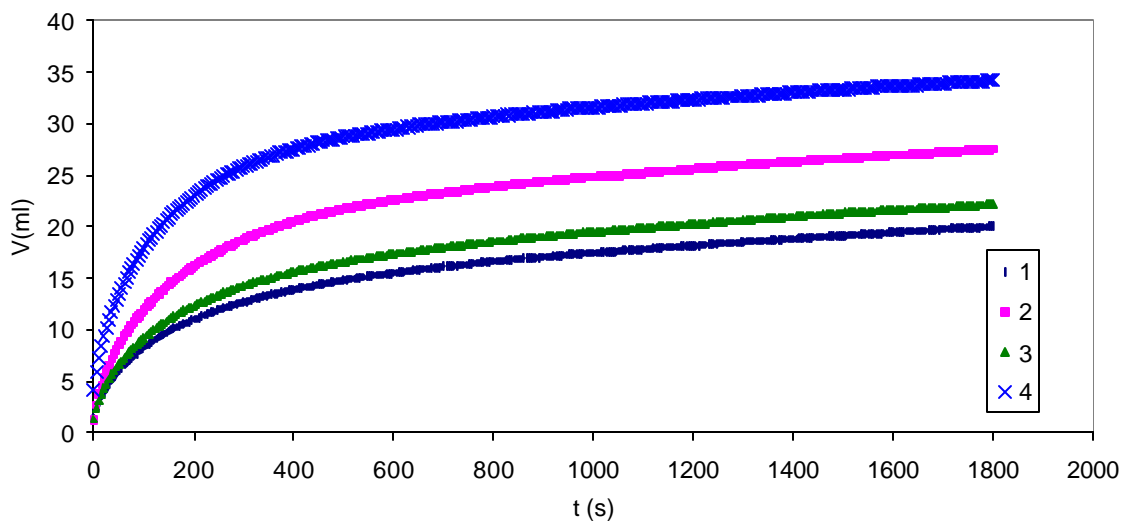
**Figura A.3.8** Curvas de filtración para la mezcla 4.



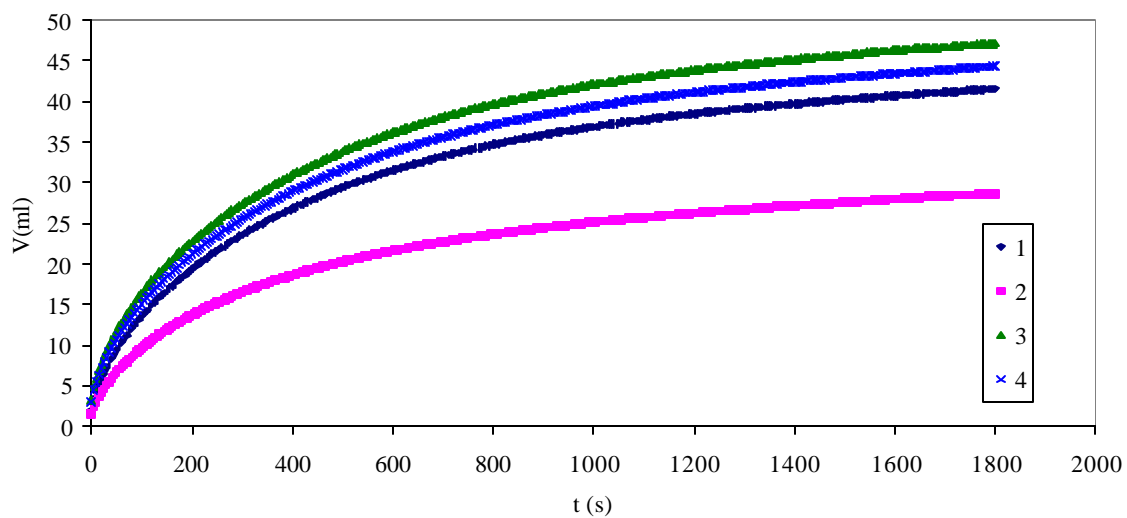
**Figura A.3.9** Curvas de filtración de la mezcla 5.



**Figura A.3.10** Curvas de filtración para la mezcla 6.



**Figura A.3.11** Curvas de filtración para la mezcla 7.



**Figura A.3.12** Curvas de filtración para la mezcla 8.

#### APÉNDICE A.4. ALTURAS DE LOS REVOQUES

**Tabla A.4.1** Altura de los revoques obtenidos con las bases.

Descripción	Prueba	Altura del revoque (mm)								Promedio	CV(%)
Base 1	1	0,288	0,481	0,292	0,260	0,360	0,444	0,475	0,383	0,373	16,4
	2	0,261	0,399	0,262	0,422	0,477	0,532	0,522	0,239	0,389	21,8
	3	0,534	0,556	0,452	0,221	0,212	0,251	0,589	0,239	0,382	30,8
	4	0,541	0,236	0,575	0,381	0,216	0,476	0,262	0,253	0,367	27,2
	5	0,410	0,407	0,400	0,496	0,387	0,407	0,412	0,259	0,397	11,6
	6	0,505	0,453	0,449	0,461	0,527	0,459	0,451	0,471	0,472	4,5
Base 2	1	0,396	0,416	0,408	0,384	0,424	0,402	0,451	0,405	0,411	3,5
	2	0,512	0,249	0,259	0,464	0,355	0,479	0,322	0,501	0,393	19,5
	3	0,286	0,419	0,391	0,296	0,411	0,354	0,604	0,431	0,399	17,7
	4	0,244	0,462	0,330	0,459	0,505	0,268	0,486	0,481	0,404	18,6
	5	0,258	0,369	0,428	0,472	0,448	0,471	0,279	0,485	0,401	16,1
Base 3	1	0,330	0,434	0,549	0,406	0,411	0,391	0,573	0,462	0,445	13,4
	2	0,276	0,499	0,525	0,537	0,320	0,256	0,288	0,579	0,41	24,3
	3	0,527	0,521	0,454	0,354	0,330	0,370	0,522	0,317	0,424	15,4
	4	0,223	0,247	0,216	0,560	0,571	0,217	0,612	0,220	0,358	36,2
	5	0,623	0,722	0,306	0,287	0,278	0,668	0,265	0,267	0,427	34,3
	6	0,516	0,443	0,529	0,510	0,524	0,523	0,517	0,531	0,511	4,2
	7	0,402	0,421	0,349	0,418	0,426	0,411	0,359	0,467	0,407	6,6
Base 4	1	0,541	0,424	0,325	0,606	0,268	0,415	0,514	0,276	0,421	21,5
	2	0,643	0,658	0,606	0,678	0,609	0,582	0,618	0,601	0,624	4,1
	3	0,262	0,352	0,354	0,693	0,292	0,339	0,264	0,960	0,440	42
	4	0,411	0,658	0,805	0,458	0,788	0,757	0,277	0,253	0,551	32,2
	5	0,674	0,422	0,324	0,304	0,659	0,639	0,290	0,437	0,469	26,3
	6	0,462	0,800	0,717	0,741	0,500	0,394	0,304	0,801	0,589	26,4

**Tabla A.4.2** Altura de los revoques obtenidos con las mezclas.

Descripción	Prueba	Altura el revoque (mm)								Promedio	CV(%)
Mezcla 1	1	0,592	0,567	0,601	0,192	0,703	0,182	0,205	0,194	0,405	40,6
	2	0,716	0,701	0,202	0,201	0,186	0,382	0,639	0,231	0,407	41,7
	3	0,446	0,457	0,470	0,437	0,431	0,411	0,440	0,422	0,439	3,2
	4	0,491	0,244	0,602	0,566	0,556	0,237	0,630	0,234	0,445	28,7
Mezcla 2	1	1,134	0,926	0,990	1,036	0,953	0,915	0,917	1,081	0,994	7,1
Mezcla 3	1	0,859	0,854	0,817	1,186	1,164	0,936	0,781	1,925	1,066	30,9
Mezcla 4	1	2,002	1,928	1,778	2,173	2,088	2,069	1,484	1,938	1,933	10,4
	2	1,332	1,259	1,251	1,467	1,281	1,369	1,298	1,312	1,321	4,7
	3	1,662	1,790	1,839	1,870	1,882	1,937	1,657	1,861	1,812	5,2
Mezcla 5	1	1,115	1,000	1,491	1,765	1,746	1,381	1,266	1,585	1,42	17,8
	2	1,866	1,803	1,679	1,879	1,442	1,875	1,817	1,867	1,779	7,8
	3	1,709	1,782	1,744	1,676	1,671	1,697	1,756	1,855	1,736	3,3
	4	1,698	1,121	1,853	2,030	1,752	1,833	1,112	1,971	1,670	19,5
Mezcla 6	1	0,923	0,916	0,805	0,694	0,761	0,894	0,917	0,843	0,844	8,4
	2	1,331	1,495	1,395	1,286	1,431	1,061	0,889	1,207	1,262	14,3
	3	0,633	1,256	1,205	1,297	1,233	1,142	0,657	1,193	1,077	21,7
	4	1,060	1,300	1,288	1,184	1,176	1,366	1,250	1,153	1,223	7
Mezcla 7	1	0,366	0,803	0,785	0,765	0,606	0,541	0,561	0,806	0,654	19,6
	2	0,997	0,450	1,002	0,436	0,457	1,017	0,917	1,019	0,787	29,5
	3	0,780	0,556	0,506	0,657	0,691	1,006	0,633	1,057	0,736	22,4
	4	1,454	1,438	0,486	0,517	0,488	1,356	1,319	1,431	1,061	38,3
Mezcla 8	1	0,645	0,798	0,679	1,250	1,455	1,561	1,603	1,523	1,189	30,7
	2	0,941	0,919	0,924	0,943	0,931	0,924	0,932	0,922	0,930	0,8
	3	1,909	1,274	1,379	2,065	1,896	0,850	0,817	1,442	1,454	29,4
	4	1,022	1,642	1,740	0,926	1,038	1,269	1,489	0,918	1,255	23,3

**APÉNDICE A.5 MASAS OBTENIDAS PARA LOS REVOQUES**

**Tabla A.5.1** Masas de los revoques obtenidos

Descripción	Masa del revoque (g)						
	Base 1	1,256	1,316	1,285	1,196	1,316	1,448
Base 2	1,330	1,330	1,300	1,280	1,335	1,330	--
Base 3	1,436	1,346	1,317	1,194	1,371	1,679	1,309
Base 4	1,330	1,976	1,402	1,701	1,521	1,881	1,647
Mezcla 1	1,285	1,361	1,383	1,447	--	--	--
Mezcla 2	3,148	--	--	--	--	--	--
Mezcla 3	3,189	--	--	--	--	--	--
Mezcla 4	6,212	4,311	5,872	--	--	--	--
Mezcla 5	4,696	5,608	5,847	5,349	--	--	--
Mezcla 6	2,816	4,108	3,605	4,123	--	--	--
Mezcla 7	2,220	2,710	2,390	3,507	--	--	--
Mezcla 8	4,061	2,866	4,79	4,349	--	--	--



**APÉNDICE A.6 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA POROSIDAD**

$$\varepsilon = 1 - \frac{M_R}{\rho_s A h_C}$$

**Tabla A.6.1** Sensibilidad de las porosidad a la altura y masa del revoque

Altura $h_c$ (mm)	Masa $M_R$ (g)					
	1	2	3	4	5	6
0,3	0,463	--	--	--	--	--
0,4	0,597	0,195	--	--	--	--
0,5	0,678	0,356	0,034	--	--	--
0,6	0,732	0,463	0,195	--	--	--
0,7	0,770	0,540	0,310	0,080	--	--
0,8	0,799	0,597	0,396	0,195	--	--
0,9	0,821	0,642	0,463	0,284	0,105	--
1	0,839	0,678	0,517	0,356	0,195	0,034
1,1	0,854	0,707	0,561	0,414	0,268	0,121
1,2	0,866	0,732	0,597	0,463	0,329	0,195
1,3	0,876	0,752	0,628	0,504	0,381	0,257
1,4	0,885	0,770	0,655	0,540	0,425	0,310
1,5	0,893	0,785	0,678	0,571	0,463	0,356
1,6	0,899	0,799	0,698	0,597	0,497	0,396
1,7	0,905	0,811	0,716	0,621	0,526	0,432
1,8	0,911	0,821	0,732	0,642	0,553	0,463
1,9	0,915	0,830	0,746	0,661	0,576	0,491
2	0,919	0,839	0,758	0,678	0,597	0,517