

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**CARACTERIZACION DE REVOQUES FORMADOS  
UTILIZANDO INTECARB (GRADOS 1015 Y 3035)  
CON ADICIÓN DE FINOS Y GRUESOS**

**Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de  
Venezuela para optar al Título  
de Ingeniero Químico  
Por los Brs. Fernández P. Odilo J.,  
Nuñez B. Alvaro O.**

**Caracas, Noviembre 2001.**

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**CARACTERIZACION DE REVOQUES FORMADOS  
UTILIZANDO INTECARB (GRADOS 1015 Y 3035)  
CON ADICIÓN DE FINOS Y GRUESOS**

**TUTORES ACADÈMICOS: Prof. Mary Luz Alonso.  
Prof. José Sorrentino**

**Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de  
Venezuela para optar al Título  
de Ingeniero Químico  
Por los Brs. Fernández P. Odilo J.,  
Nuñez B. Alvaro O.**

**Caracas, Noviembre 2001**

Caracas, Noviembre de 2001

Los abajo firmantes miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Química, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los Bachilleres Odilo J. Fernández P. y Alvaro O. Nuñez B., titulado:

**“Caracterización de Revoques formados utilizando Intecarb  
(grados 10-15 y 30-35) con adición de finos y gruesos”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al título de Ingeniero Químico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por los autores, lo declaran APROBADO.

Prof. Anubis Pérez  
Jurado

Prof. Salvatore Valentino  
Jurado

Prof. Mary Luz Alonso  
Tutor

Prof. José Sorrentino  
Tutor

## DEDICATORIA

*A Gloria,  
A mis hijos Mariana y Alberto,  
A mis Padres y Suegros,  
A mis Hermanos Julio César y Fran,  
A Dios....*

*Odilo*

*A Laura por su sacrificio y amor incondicional  
A mi bebé Andreína por simplemente existir  
A mi Vieja por ser un ejemplo  
A mis hermanos Felipe y Rodrigo  
Los quiero.*

*Alvaro*

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a mis seres más queridos, a *mi esposa Gloria* quién ha sido mi punto de apoyo desde siempre, y quién se ha sacrificado para darme la oportunidad de culminar este sueño tan importante para mí; *a mis hijos, Mariana Carolina y Alberto José*, a quienes amo tanto y han tenido que crecer junto a un padre ausente por buscar una meta, y quien desea que esto sea un ejemplo para ellos; *a mis suegros, Gloria y Paco*, quienes me han ayudado tanto desde siempre, y sobre todo en estos años al ayudarme a criar a mis hijos, gracias de verdad; *a mis padres, Carmen y Odilo*, quienes me dieron la vida y me enseñaron que siempre hay que luchar hasta el final por los sueños que tenemos; *a mi hermano Julio Cesar* porque representa la persona de la cual me siento tan orgulloso, por su espíritu de lucha, y por haberse encargado de la responsabilidad de cuidar de nuestros padres siendo tan joven; *a Fran (mi hermano)* por su apoyo y su cariño, desde siempre.

A mi equipo de trabajo en PROSATCOMM por su esfuerzo en mantener el negocio produciendo.

A *Alvaro*, mi compañero en este proyecto, por su amistad, por su paciencia y dedicación, por su profesionalismo, por su manera de ver la vida y enfrentarla, pues representa un ejemplo a seguir para este viejito, gracias, porque no hubiese podido elegir a otro, si no al mejor.

A mis compañeros de la Universidad: *Hector*, mi colega del IUT, por su colaboración y amistad, *Yumaiti*, por ser un excelente técnico y dejar bien alto a nuestro IUT-RC, y por haber colaborado tanto en nuestra tesis, a *Florimar* por toda su inmensa colaboración y amistad, y a todos aquellos, con los cuales compartí tantos momentos en la UCV, gracias por todo.

A *Dios* por haberme concedido esta oportunidad de culminar un deseo que comenzó hace tanto tiempo, por darme la fuerza y la constancia necesaria para poder lograrlo. Por concederme la familia y amigos que tengo.

A todos Gracias.

*Odilo José*

Tengo que empezar por agradecer al amor más grande que tengo, *Laura*, quien ha estado a mi lado durante todos estos años, dándome apoyo, fuerza, amor, en los momentos más difíciles (... y vaya que los hemos tenido) para lograr una meta que es de ambos, por ser una mujer ejemplar y una madre excepcional, por todo y más, mil gracias amorcito. A mi hija y mayor orgullo *Andreina*, por existir, por hacerme ver el mundo desde otro ángulo, enseñarme a ser papá, por soportar sin saberlo a un padre por momentos ausente, espero poder ser un ejemplo para ti.

A mi Viejita que es un ejemplo de lucha, esfuerzo y sacrificio, porque juntos hemos superado momentos muy difíciles, por ser padre y madre (y lo hiciste espectacular), porque nunca me has dejado caer y sé que nunca lo harás, demostrándome el verdadero amor de madre, te debo todo lo que he sido, soy y seré. A mis hermanos Rodrigo y Felipe, el primero por su ayuda, por ser mi mejor amigo, al segundo, aunque no ha podido estar conmigo en momentos importantes de mi vida, sé que su cariño es tan grande, que está a mi lado a pesar de la distancia. A Mario por ser un gran amigo y por cuidar de mi viejita.

A mis suegros Jesus y Teo por darme un apoyo increíble, difícil de poder pagar, por quererme como a un hijo, por cuidar de mi bebé, por prestarme su ayuda en todo momento y siempre confiaron en mí.

A Odilo por ser un hombre trabajador y luchador, ser más que compañero, amigo, por aconsejarme y soportarme, eres realmente un verdugo men!!!

A mis panitas de siempre José Leonardo, Luis Felipe por compartir conmigo durante estos años y ser verdaderos amigos.

A mis amigos de universidad con quienes compartí muchas alegrías y algunas tristezas y lamento no haberlos conocido antes, Nancyña, Lisbeth, Marianela, Anahis, El Gordísimo Oswaldo, La Bati-Bati Indira, Mariale.

A los panitas del LSM, Florimar por su colaboración invaluable, a Yumaiti por no delatarme, y a tantos otros que estuvieron presentes en estos 6 años de trancazos.

A todos ustedes ¡¡¡GRACIAS TOTALES!!!

*Alvaro*

**Fernández P., Odilo J,**

**Núñez B., Alvaro O.**

**CARACTERIZACIÓN DE REVOQUES FORMADOS UTILIZANDO  
INTECARB (GRADOS 10-15 Y 30-35)  
CON ADICIÓN DE FINOS Y GRUESOS**

**Tutor Académico: Prof. José A. Sorrentino, Prof. Mary Luz Alonso. Tesis.  
Caracas. U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela Ingeniería Química.  
Año 2001, 174 p.**

**Palabras Claves:** Revoque, Distribución del tamaño de partícula, Permeabilidad, Solidosidad, Porosidad, Ley de Darcy.

**Resúmen:** El éxito en la producción de un pozo petrolero depende principalmente de la etapa de perforación, ya que en ella se inyecta, a través de la mecha o barrena, un fluido de perforación o lodo que debe ser capaz de revestir la pared del hoyo con una capa lisa, delgada, flexible e impermeable, denominada revoque, de baja permeabilidad, que selle los poros y otras aberturas de la formación penetrada por el taladro, minimizando los problemas de derrumbe y atascamiento de la tubería o su adhesión a la pared del hoyo y reduciendo la pérdida de filtrado hacia la formación.

En este trabajo se presenta el estudio del efecto que produce la adición de finos y gruesos sobre la formación de revoques, utilizando papel de filtro como medio filtrante, en los lodos de perforación preparados con Carbonato de Calcio Intecarb grados 1015 y 3035 como base, controlando el pH y la temperatura. Evaluando el efecto que pueda tener la distribución del tamaño de partícula utilizado en la preparación de los lodos de perforación sobre las características del revoque, como lo son la Permeabilidad, la Porosidad y la Solidosidad.

Para lograr este objetivo se prepararon lodos de perforación a partir de mezclas de Carbonato de Calcio que contenían diferentes tamaños de partículas, finas y gruesas, analizándose, para cada base, cuatro mezclas con adición de partículas finas y dos mezclas en las cuales se adicionaron partículas gruesas, manteniendo el

valor de la mediana de partículas ( $X_{50}$ ) constante. Las mezclas fueron diseñadas a partir de las fracciones estrechas obtenidas mediante el tamizado húmedo y la clasificación centrífuga utilizando como granulometrías base Carbonato comercial Intecarb grados CM 1015 y 3035. Las fracciones estrechas generadas provienen del tamizado por vía seca que permiten tener bases con un tamaño de partícula menor a 125  $\mu\text{m}$ . A cada una de estas mezclas se les realizaron pruebas de formación de revoques utilizando celdas de filtración de alta presión y alta temperatura (HPHT), manteniendo una diferencia de presión de 500Psi, y una temperatura de 30°C aproximadamente. También se realizaron pruebas de permeación del revoque y del medio usado, manteniendo las mismas condiciones de temperatura y presión.

Los resultados obtenidos indican que el producto Permeabilidad-Solidosidad en la etapa Incipiente no presenta una tendencia clara al variar el tamaño promedio  $D_{3,2}$  debido a la dispersión de los datos, sin embargo para la etapa Darcyana este producto disminuye desde 0.46 $\mu\text{d}$  hasta 0.12  $\mu\text{d}$  al aumentar el tamaño promedio  $D_{3,2}$  entre 7.5 $\mu\text{m}$  y 8.6 $\mu\text{m}$ , para valores mayores de  $D_{3,2}$  se mantiene relativamente constante en un rango de 0.071 $\mu\text{d}$  hasta 0.105 $\mu\text{d}$ .

Los valores del Producto Permeabilidad-Solidosidad Global presentan una tendencia igual a la observada en la etapa Darcyana, en este caso con la contribución de la etapa Incipiente, disminuyendo desde 0.659 $\mu\text{d}$  hasta 0.181 $\mu\text{d}$  para un rango de  $D_{3,2}$  entre 7.5 $\mu\text{m}$  y 8.6 $\mu\text{m}$ , y manteniéndose relativamente constante a partir de  $D_{3,2}$  mayores, con valores entre 0.087 $\mu\text{d}$  y 0.157  $\mu\text{d}$ . Por lo tanto la granulometría no ejerce ningún efecto sobre las características del revoque para mezclas con  $D_{3,2}$  mayores a 8.6 $\mu\text{m}$ .

También se observó que la etapa Incipiente aporta en promedio cerca del 30% de la cantidad de revoque formado durante la filtración, el cual representa un 2% a la resistencia total al paso de flujo ofrecida por el revoque. En la etapa Darcyana se observó que contribuye con un 70% de revoque aportando un 98% de resistencia.



## INDICE GENERAL

	<b>Página</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	XI
<b>LISTA DE TABLAS</b>	XIV
<b>LISTA DE SIMBOLOS</b>	XVI
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>2. OBJETIVOS</b>	3
2.1 Objetivo General	3
2.2 Objetivos Específicos	3
<b>3. MARCO TEÓRICO</b>	4
<b>3.1 Consideraciones Generales sobre Perforación Petrolera</b>	4
3.1.1 <i>Lodos de Perforación</i>	6
3.1.2 <i>Composición de los Lodos de Perforación</i>	7
3.1.3 <i>Propiedades de los Lodos de Perforación</i>	10
3.1.4 <i>Formación del Revoque</i>	16
3.1.5 <i>Daños a la Formación</i>	20
<b>3.2 Aspectos Conceptuales de la Filtración</b>	22
3.2.1 <i>Formación de la Torta de Filtración</i>	23
3.2.1.1 Porosidad de la Torta	24
3.2.2 <i>Ley de Darcy</i>	25
3.2.2.1 Permeabilidad de la Torta	25
3.2.3 <i>Ecuación fundamental para la Formación de la Torta</i>	29
3.2.4 <i>Espesor de la Torta o Revoque</i>	44
3.2.5 <i>Relación entre la Temperatura o Volumen</i>	45
3.2.6 <i>Relación entre Volumen de Filtrado y la Presión</i>	46
<b>3.3 Aspectos Conceptuales de la Granulometría</b>	48
3.3.1 <i>Definición de Tamaño de Partícula</i>	48
3.3.2 <i>Medición del Tamaño de Partícula</i>	49
3.2.2.1 Técnicas de Medición de Tamaño de Partículas	50
3.2.2.2 Métodos de Análisis de Tamaño de Partículas	50
3.3.3 <i>Distribución de Tamaño de Partículas</i>	52
3.3.4 <i>Representación de la Distribución de Tamaño de Partículas</i>	54
3.3.5 <i>Parámetros de Caracterización de una DTP</i>	57
3.3.5.1 Medidas de Tendencia Central	57
3.3.5.1.1 <i>Moda</i>	58
3.3.5.1.2 <i>Mediana</i>	58
3.3.5.1.3 <i>Media</i>	58
3.3.5.2 Medidas de la Variabilidad de una Distribución	61

<b>4. ANTECEDENTES</b>	66
<b>5. EQUIPO EXPERIMENTAL</b>	71
5.1 Agitadores	71
5.2 Analizador de Tamaño de Partículas MASTERSIZER 2000	72
5.3 Balance con Desecador Infrarrojo	73
5.4 Clasificador Centrífugo	74
5.5 Divisor de Muestras Tipo PT-1000	75
5.6 Equipo de Filtración Estática: Celda HPHT	76
5.7 Medidor de pH	79
5.8 Tamizador Vibrante (vía seca)	80
5.9 Tamizador Vibrante (vía húmeda)	81
5.10 Tornillo Micrométrico	82
<b>6. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL</b>	83
6.1 Tamizador Vía Seca	83
6.2 Tamizador Vía Húmeda	84
6.3 Clasificador Centrífugo	85
6.4 Uso del Divisor de Muestras PT-1000	89
6.5 Uso del Desecador Infrarrojo	89
6.6 Uso del Tornillo Micrométrico	90
6.7 Preparación del Fluido de Perforación	91
6.8 Resistencia del Medio Limpio	93
6.9 Filtración del Fluido de Perforación	95
6.10 Permeación del Revoque Formado	96
6.1 Resistencia del Medio Filtrante Sucio	97
6.12 Medición de las Propiedades de la Torta	98
6.13 Medición de la Distribución de Tamaño de Partícula	98
<b>7. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL</b>	100
<b>8. PLAN DE EXPERIENCIAS</b>	101
<b>9. DISEÑO DE MEZCLAS</b>	105
<b>10. ANÁLISIS DE DATOS</b>	113
10.1 Granulometría	113
10.2 Resistencia del Medio Filtrante	113
10.3 Volumen de Filtrado	114
10.4 Masa del Revoque	117
<b>11. DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b>	119
11.1 Identificación de las Zonas Incipiente y Darcyana	119
11.2 Permeabilidad-Solidosidad en la etapa Incipiente	122
11.2.1 <i>Permeabilidad-Solidosidad en la etapa Incipiente para Mezclas del grupo I</i>	123

11.2.2	<i>Permeabilidad-Solidosidad en la etapa Incipiente para Mezclas del grupo 2</i>	125
11.3	Permeabilidad-Solidosidad en la etapa Darcyana	126
11.3.1	<i>Permeabilidad-Solidosidad en la etapa Darcyana para Mezclas del grupo 1</i>	126
11.3.2	<i>Permeabilidad-Solidosidad en la etapa Darcyana para Mezclas del grupo 2</i>	128
11.4	Permeabilidad-Solidosidad Global	129
11.4.1	<i>Permeabilidad-Solidosidad Global para Mezclas del grupo 1</i>	130
11.4.2	<i>Permeabilidad-Solidosidad Global para Mezclas del grupo 2</i>	132
11.5	Contribución de la Zona Darcyana a la Resistencia Global y a la Cantidad de revoque Formado	133
11.5.1	<i>Etapa Darcyana</i>	134
11.5.2	<i>Etapa Incipiente</i>	136
12.	<b>CONCLUSIONES</b>	139
13.	<b>RECOMENDACIONES</b>	141
14.	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	142
15.	<b>APÉNDICE</b>	145

## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA</b>		<b>Página</b>
<b>3.1</b>	Equipo de Perforación Petrolera	5
<b>3.2</b>	Recorrido del Lodo de Perforación	6
<b>3.3</b>	Goma Xhantana	10
<b>3.4</b>	Tipos de Fluidos	14
<b>3.5</b>	Reograma del Lodo de Perforación	15
<b>3.6</b>	Filtración del Lodo a través de la Formación	17
<b>3.7</b>	Pegado Diferencial	21
<b>3.8</b>	Esquema general de un sistema de Filtrado con formación de torta	31
<b>3.9</b>	Gráfico $t/V_L$ en función de $V_L$ de un lodo de Perforación	34
<b>3.10</b>	Gráfico $V_L$ en función de $t$ con corrimiento de ejes	36
<b>3.11</b>	Determinación de $t_0$ y $V_{L0}$	37
<b>3.12</b>	Gráfico para el proceso de Permeación del Revoque con Agua	41
<b>3.13</b>	Efecto de la Concentración de Sólidos en la Permeabilidad, Volumen de filtrado y Volumen de Torta	45
<b>3.14</b>	Efecto de la presión sobre el volumen de filtrado	47
<b>3.15</b>	Densidad de Distribución Típica	54
<b>3.16</b>	Densidad Acumulada Típica	55
<b>3.17</b>	Forma de las Diferentes Distribuciones	57
<b>3.18</b>	Medidas de Tendencia Central	60
<b>3.19</b>	Curvas Representativas de diferentes tipos de Sesgo	64
<b>5.1</b>	Agitadores	71
<b>5.2</b>	Analizador de tamaño de Partícula MASTERSIZER 2000	72
<b>5.3</b>	Balanza con Desecador Infrarrojo	73
<b>5.4</b>	Clasificador Centrífugo	74
<b>5.5</b>	Divisor de Muestras PT-1000	75
<b>5.6</b>	Equipo de Filtración Estática.	77
<b>5.7</b>	Celda de Filtración HPHT	78
<b>5.8</b>	Medidor de pH	79
<b>5.9</b>	Tamizador Vibrante (vía seca)	80

<b>5.10</b>	Tamizador Vibrante (vía húmeda)	82
<b>6.1</b>	Clasificación ascendente del Aero-clasificador	88
<b>9.1</b>	DTP acumulada de la Base 1 y la Base 2	106
<b>9.2</b>	<b>Fraciones Estrechas</b>	
	<b>A)</b> Generadas de la Base 1	107
	<b>B)</b> Generadas de la Base 2	107
<b>9.3</b>	<b>Mezclas del Grupo 1</b>	
	<b>A)</b> Variación en los finos	109
	<b>B)</b> Variación en los gruesos	109
<b>9.4</b>	<b>Mezclas del Grupo 2</b>	
	<b>A)</b> Variación en los finos	110
	<b>B)</b> Variación en los gruesos	111
<b>11.1</b>	Producto Permeabilidad-Solidosidad en la etapa Incipiente Mezclas del grupo 1	123
<b>11.2</b>	Producto Permeabilidad-Solidosidad en la etapa Incipiente Mezclas del grupo 2	125
<b>11.3</b>	Producto Permeabilidad-Solidosidad en la etapa Darcyana Mezclas del grupo 1	126
<b>11.4</b>	Producto Permeabilidad-Solidosidad en la etapa Darcyana Mezclas del grupo 2	128
<b>11.5</b>	Producto Permeabilidad-Solidosidad en la etapa Darcyana Mezclas del grupo 1 y Grupo 2	129
<b>11.6</b>	Producto Permeabilidad-Solidosidad Global Mezclas del grupo 1	130
<b>11.7</b>	Producto Permeabilidad-Solidosidad Global Mezclas del grupo 2	132
<b>11.8</b>	Producto Permeabilidad-Solidosidad Global Mezclas grupo 1 y grupo 2	133
<b>11.9</b>	Contribución a la Resistencia Global y la cantidad de revoque en la etapa Darcyana	
	<b>A)</b> Mezclas del grupo 1	134
	<b>B)</b> Mezclas del grupo 2	135
<b>11.10</b>	Contribución a la Resistencia Global y la cantidad de revoque en la etapa Incipiente	
	<b>A)</b> Mezclas del grupo 1	136
	<b>B)</b> Mezclas del grupo 2	137

<b>A.1.1</b>	Volumen de filtrado en función del tiempo	145
<b>A.1.2</b>	Permeación del Medio filtrante Sucio	146
<b>A.1.3</b>	Curva de Inspección de las dos zonas de la curva de filtrado	148
<b>A.1.4</b>	Gráfico $t^2/V_L$ en función de $V_L$	149
<b>A.1.5</b>	Gráfico $V$ en función de $t$ para la permeación del Revoque	151
<b>A.3.1</b>	Curva de filtración de la Base 1	164
<b>A.3.2</b>	Curva de filtración de la mezcla 1.2	164
<b>A.3.3</b>	Curva de filtración de la mezcla 1.3	165
<b>A.3.4</b>	Curva de filtración de la mezcla 1.4	165
<b>A.3.5</b>	Curva de filtración de la mezcla 1.5	166
<b>A.3.6</b>	Curva de filtración de la mezcla 1.6	166
<b>A.3.7</b>	Curva de filtración de la Base 2	167
<b>A.3.8</b>	Curva de filtración de la mezcla 2.1	167
<b>A.3.9</b>	Curva de filtración de la mezcla 2.2	168
<b>A.3.10</b>	Curva de filtración de la mezcla 2.3	168
<b>A.3.11</b>	Curva de filtración de la mezcla 2.4	169
<b>A.3.12</b>	Curva de filtración de la mezcla 2.5	169
<b>A.3.13</b>	Curva de filtración de la mezcla 2.6	170

## LISTA DE TABLAS

<b>TABLAS</b>		<b>Página</b>
<b>3.1</b>	Listado de Diámetros de esfera equivalentes	53
<b>3.2</b>	Tipos de Distribuciones de Tamaño	56
<b>3.3</b>	Tipos de Medias	59
<b>3.4</b>	Parámetros de Dispersión	62
<b>3.5</b>	Parámetros de Asimetría	65
<b>8.1</b>	Condiciones de Trabajo y Duración de cada prueba	103
<b>9.1</b>	Fracciones Estrechas Utilizadas para el diseño de Mezclas	106
<b>9.2</b>	Masa de Mezclas pertenecientes al Grupo 1, Intecarb CM 1015	112
<b>9.3</b>	Masa de Mezclas pertenecientes al Grupo 2, Intecarb CM 3035	112
<b>10.1</b>	Resistencia del Medio Filtrante	114
<b>10.2</b>	Volúmenes de Filtrado para las Bases	115
<b>10.3</b>	Volúmenes de Filtrado para las Mezclas del Grupo 1	116
<b>10.4</b>	Volúmenes de Filtrado para las Mezclas del Grupo 2	117
<b>10.5</b>	Masa de Revoques de las Mezclas del Grupo 1	117
<b>10.6</b>	Masa de Revoques de las Mezclas del Grupo 2	118

<b>11.1</b>	Valores de Tiempo Incipiente para Mezclas del grupo 1	120
<b>11.2</b>	Valores de Volumen Incipiente para Mezclas del grupo 1	120
<b>11.3</b>	Valores de Tiempo Incipiente para Mezclas del Grupo 2	121
<b>11.4</b>	Valores de Volumen Incipiente para Mezclas del Grupo 2	121
<b>A.2.1</b>	DTP para Mezclas del Grupo 1	159
<b>A.2.2</b>	DTP para Mezclas del Grupo 2	162
<b>A.4.1</b>	Producto Permeabilidad-Solidosidad para Mezclas del Grupo 1	171
<b>A.4.2</b>	Producto Permeabilidad-Solidosidad para Mezclas del Grupo 2	172
<b>A.5.1</b>	Contribución a la Resistencia Global y a la Cantidad de Revoque para mezclas del Grupo 1	173
<b>A.5.2</b>	Contribución a la Resistencia Global y a la Cantidad de Revoque para mezclas del Grupo 2	174



## LISTA DE SIMBOLOS

### SIMBOLO

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 $V'$ ( $\theta/L^6$ )
CV	Coefficiente de variabilidad (%)
$D_{3,2}$	Tamaño promedio (L)
$dv/dy$	Velocidad de deformación ( $\theta^{-1}$ )
hc	Altura de la torta (L)
K	Permeabilidad ( $L^2$ )
m	Parámetro de la ecuación de potencias ( $M/L\theta$ ), ecuación 3.3
$K_D$	Permeabilidad darcyana ( $L^2$ )
$K_I$	Permeabilidad incipiente ( $L^2$ )
$K_G$	Permeabilidad global ( $L^2$ )
M	Masa del filtrado (M)
$M_{LS}$	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 ( $M/L^2$ )
$m_C$	Masa de revoque por unidad de área ( $M/L^2$ )
$m_S$	Masa de sólidos secos en la torta por unidad de área ( $M/L^2$ )
$M_C$	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 3.3 (Adim)
$\Delta p$	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 ( $L^3/\theta$ )
$q$	Velocidad de flujo instantánea ( $L/\theta$ )
$q_a$	Caudal de agua ( $L^3/\theta$ )
$q_g$	Caudal de goma Xhantana ( $L^3/\theta$ )
$r_C$	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 ( $L^{-1}$ )
$t$	Tiempo ( $\theta$ )
$V'$	$V'$ 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 sólidos ( $L^3$ )
$V_C$	Volumen de torta ( $L^3$ )
$x$	$x$ Tamaño de partícula (L)

### **Símbolos griegos**

$\alpha_C$	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)
$\kappa$	Parámetro asociado a la torta y al filtrado (Adim)
$\mu$	Viscosidad (M/L $\theta$ )
$\mu_a$	Viscosidad agua(M/L $\theta$ )
$\mu_g$	Viscosidad goma (M/L $\theta$ )
$\mu_L$	Viscosidad del líquido (M/L $\theta$ )
$\rho$	Densidad del líquido (M/L <sup>3</sup> )
$\rho_s$	Densidad del sólido (M/L <sup>3</sup> )
$\sigma$	Desviación estándar (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 <sup>3</sup> )
$\chi_w$	Factor de Corrección de la ecuación 3.51

## 1. INTRODUCCIÓN

El éxito en la producción de un pozo petrolero depende principalmente de la etapa de perforación, esta es la etapa más importante ya que en ella se deben controlar una serie de factores que afectarán el futuro desempeño de éste. Durante la etapa 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.

Un lodo es una mezcla de sustancias químicas en proporciones estudiadas y de cuya preparación y mantenimiento depende el éxito, la rapidez de perforación y la seguridad del pozo que va a ser explotado.

El objetivo principal del fluido de perforación es ser capaz de revestir la pared del hoyo con una capa lisa, delgada, flexible e impermeable, denominada revoque, de baja permeabilidad, que selle los poros y otras aberturas de la formación penetrada por el taladro. El revoque ayuda a minimizar los problemas de derrumbe y atascamiento de la tubería o su adhesión a la pared del hoyo y reduce la pérdida de filtrado hacia la formación.

Debido a esto las investigaciones en el campo de los fluidos de perforación se han orientado hacia minimizar los efectos adversos que se puedan presentar durante la perforación.

En el Laboratorio de Separaciones Mecánicas de la UCV (LSM-UCV) se han llevado a cabo varios trabajos relacionados con el estudio del efecto que pueda tener la distribución del tamaño de partícula utilizado en la preparación de los lodos de perforación sobre las características del revoque, como lo son la Permeabilidad, la Porosidad y la Solidosidad

García y Gimón, 1999, realizaron un trabajo basado en estudiar las características del revoque, formado sobre papel de filtro, mediante la adición de

partículas finas, ellos no obtuvieron resultados concluyentes en los revoques formados ya que no se hizo un control riguroso del pH y de la temperatura.

Hernández y Hernández,2001, realizaron trabajos basándose principalmente en el estudio de los revoques formados a partir lodos de perforación elaborados con Carbonato de Calcio Intecarb grados 20-25 y 40-45, con adición de partículas finas. Se obtuvieron resultados concluyentes para la permeabilidad, no así para la movilidad y la porosidad.

En este trabajo se presenta el estudio sobre el efecto que presenta la adición de finos y gruesos sobre la formación de revoques, utilizando papel de filtro, en lodos de perforación preparados con Carbonato de Calcio Intecarb grados 10-15 y 30-35 como base, controlando el pH y la temperatura. Los lodos de perforación fueron preparados a partir de mezclas de Carbonato de Calcio que contenían diferentes tamaños de partículas, finas y gruesas, analizándose cuatro mezclas con adición de partículas finas y dos mezclas en las cuales se adicionaron partículas gruesas, manteniendo el valor de la mediana ( $X_{50}$ ) de la distribución de tamaño de partículas de partículas constante.

Se pretende obtener información sobre las variaciones de permeabilidad y porosidad del revoque formado sobre papel de filtro, 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.

Recientemente se ha planteado 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.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo general:**

Determinar las características de revoques formados con lodos cuyo material sellante lo constituyen mezclas de granulometría controlada, preparadas a partir de distintos grados de Carbonato de Calcio comercial (Intecarb), haciendo variaciones de granulometría utilizando carbonatos comerciales de distintos grados (Intecarb 1015 e Intecarb 3035) como pivote.

### **2.2. Objetivos específicos:**

- 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.
- Preparar mezclas de carbonato de calcio de diferentes características, tomando como base los carbonatos Intecarb 10-15 y 30-35, mediante adición controlada de finos y gruesos.
- Preparar fluidos de perforación de manera reproducible, controlando las principales variables de formulación.
- Filtrar los lodos preparados sobre papel de filtro utilizando celdas HPHT (High Pressure-High Temperature) para formar los revoques a analizar.
- Caracterizar los revoques mediante la determinación de su permeabilidad y su porosidad.
- Evaluar la influencia de los cambios de granulometría en la porosidad y en la permeabilidad del revoque, mediante el producto Permeabilidad-Solidosidad.

### **3. MARCO TEÓRICO**

En esta sección se presenta el fundamento teórico necesario para la comprensión del presente estudio y de esta manera desarrollar los objetivos propuestos. Se presentan los aspectos básicos más importantes del tema planteado.

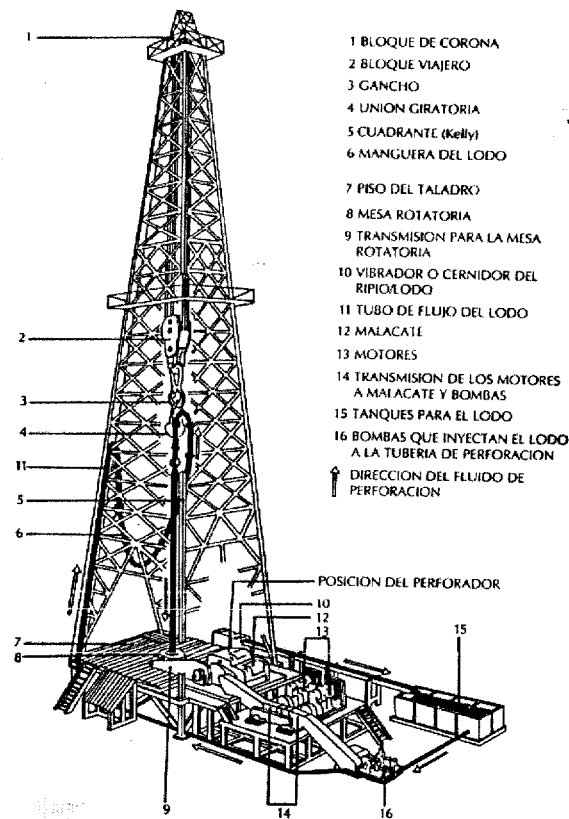
#### **3.1. Consideraciones Generales Sobre Perforación Petrolera.**

El petróleo se encuentra alojado en los espacios porosos de las rocas sedimentarias. En algunos tipos 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.[MI, 1991]

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. El tipo de barrena usado en la perforación depende de las condiciones geológicas donde se perfora; a los trozos de roca de la formación cortados por la barrena se les llama “ripio”.

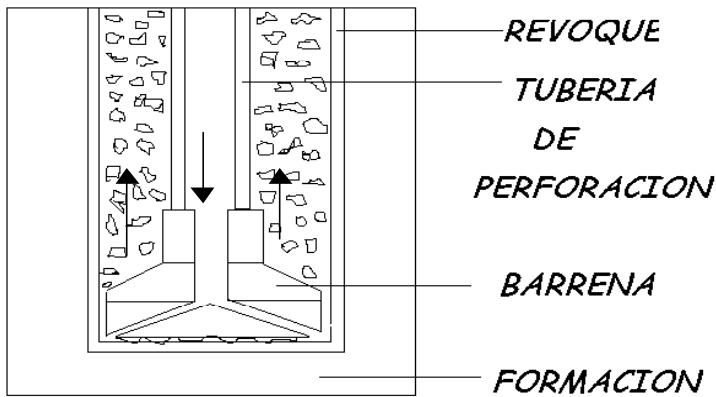
La figura 3.1 muestra las partes principales de un equipo de perforación rotatoria. El equipo rotatorio que perfora la formación está constituido por una mesa rotatoria, un cuadrante (Kelly), la tubería de perforación cuyos tubos individuales son más o menos de nueve metros cada uno, los lastra-barreras (barras), que son tubos pesados y bastante gruesos cuyo objetivo es mantener la tubería recta, y por último, la barrena.





**Figura 3.1:.** Equipo de Perforación Rotatoria.

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 en la formación a través de las paredes del hoyo o revoque 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 3.2. [GRAY,1988. MI, 1991]



**Figura 3.2:** Recorrido del lodo de perforación [MI, 1991]

### 3.1.1. Lodos de Perforación.

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

Entre las funciones más importantes del lodo de perforación se pueden mencionar las siguientes: [GRAY, 1988; MI, 1991]

- *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 el 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.*
- Facilitar la realización de pruebas para la obtención de información acerca de las formaciones perforadas, como son, por ejemplo, los registros electrónicos de las paredes del pozo, por medio de una sonda eléctrica que se hace bajar por dentro del lodo.
- Controlar la Corrosión.
- Mantener en su sitio y estabilizada la pared del hoyo, evitando derrumbes.
- *Transmitir potencia hidráulica a través de la barrena al fondo del pozo.*

El lodo de perforación debe cumplir estas funciones sin ocasionar daños al personal de perforación o contaminar al medio ambiente y, en especial, sin interferir con la productividad normal de la formación.

### **3.1.2. Composición de los lodos de perforación**

Un fluido de perforación consiste en un líquido 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 o gotas 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. [SALAS, 1980; GRAY, 1988].

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 este 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, cuando el lodo se contamina con cemento el pH puede aumentar hasta un valor entre 10 y 11.[GRAY,1988]

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 fase 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 puede haberse agregado como un líquido lubricante o reductor de filtrado.[GRAY, 1988]

*Los sólidos reactivos* (a veces denominado fracción coloidal) de un fluido de perforación consisten en pequeñas partículas sólidas reactivas. Estos sólidos, usualmente 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 de perforación (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 fluidos de perforación. En lodos base agua, el agua retenida por las partículas de arcilla empieza a formar parte de la fase discontinua del lodo, y es responsable de la efectividad de las arcillas como agente viscosificante. [GRAY, 1988]

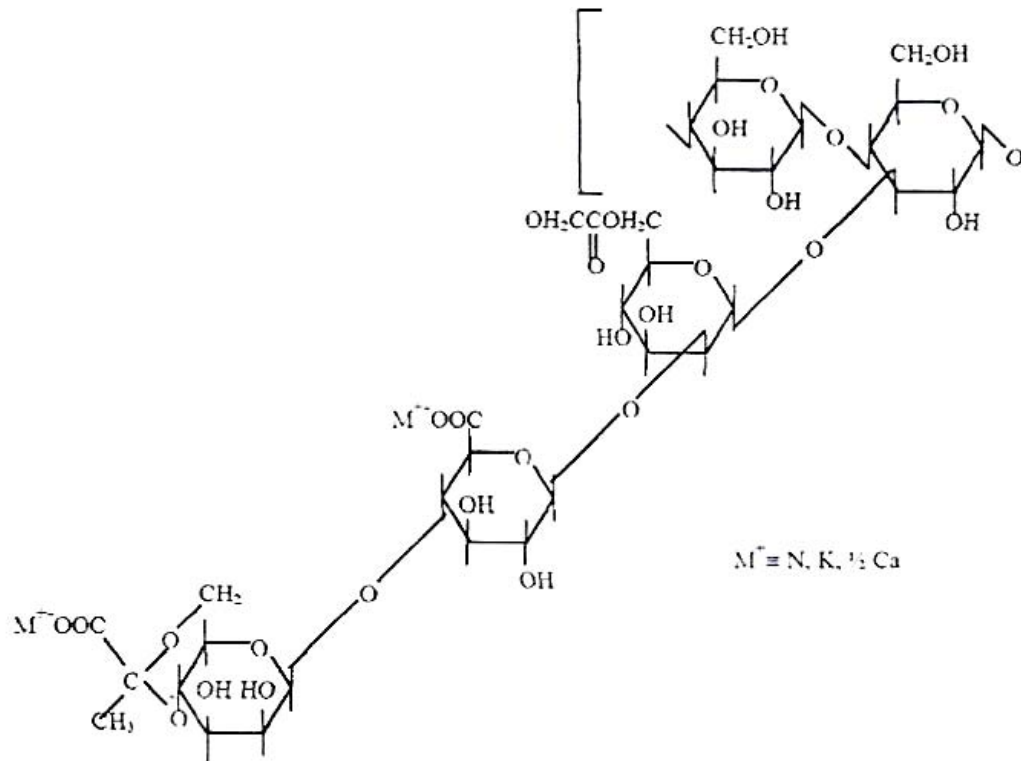
Los otros sólidos en el lodo (barita, piedra caliza, dolomita, arena, sedimentos y otros), son relativamente inertes o no reactivos. La velocidad de penetración y la estabilidad de un lodo tiende a disminuir mientras el porcentaje de sólidos (en volumen) aumenta.

Los *agentes viscosificantes* (arcillas, polímeros y líquidos emulsificados) se agregan para dar viscosidad al lodo lo que aumenta su habilidad para limpiar el lodo. Los dispersantes y defloculantes se pueden agregar para desplazar el sistema lo que ayuda reducir las surgencias, el pistonéo 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. [GRAY, 1988]

Cuando se agrega un polímero en un disolvente la solución se hace muy viscosa. La forma y tamaño de las moléculas del 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 Xhantana (Xhantomas Campestris), generada por microorganismos en carbohidrato. El peso molecular de la goma Xhantana se estima entre 2 y 50 millones y su estructura aproximada es la que se muestra en la Figura 3.3.

Desde su desarrollo a mediados de los años 60, la goma Xhantana, se volvió uno de los polímeros más estudiados, sus aplicaciones en Texas demostraron su eficacia como un viscosificante capaz de resolver problemas de limpieza en el hoyo. El uso de biopolímeros como la goma Xhantana, permite la obtención de fluidos

viscosos que minimizan los efectos del “Cizallamiento” en la estructura. La estabilidad térmica del lodo se extiende utilizando antioxidantes y sales monovalentes en las formulaciones. [SORRENTINO, 1998]



**Figura 3.3.** Goma Xantana[SEHEULT]

### 3.1.3. Propiedades de los lodos de perforación

Son varias las propiedades fisico-químicas de interés de los fluidos de perforación. Entre las propiedades más importantes se encuentra la densidad y las características reológicas (viscosidad plástica, punto cedente y punto de gelatinización) [MAGUAL/TORRES, 1999]

### *Densidad.*

La presión ejercida por una columna estática de lodo 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 2000 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 el caso de formaciones plásticas como rocas de sal y arcillas no consolidadas, la presión de lodo es crucial.

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. [GRAY, 1988]

En el interés de la seguridad en el pozo, existe una tendencia natural de llevar la densidad del lodo a un valor bastante superior al realmente 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, la cual ocurre cuando el lodo se pierde hacia el interior de la fractura formada y el nivel del mismo en el espacio anular cae hasta que se alcanza una condición de equilibrio, de manera que se interrumpe la circulación del lodo. [SORRENTINO, 1998]

Otra desventaja de una densidad excesiva del lodo es su influencia en la velocidad de perforación. Experimentos de laboratorio y experiencias en campo<sup>(2)</sup> 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 perfora 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. Por último una densidad excesiva del lodo tiene la desventaja de incrementar, en forma innecesaria el costo del lodo. [GRAY, 1988]

### *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 fluidos de perforación juegan un papel vital en la operación de perforación. Estas propiedades son las principales responsables de la capacidad del lodo de remover el ripio, pero también influyen el progreso de la perforación en muchas otras formas.

Se han propuesto ecuaciones empíricas o modelos para expresar la relación que existe, en estado estacionario, entre el esfuerzo cortante ( $\tau$ ) y la velocidad de deformación ( $dv/dy$ ). Un lodo de perforación es un caso intermedio entre el modelo del plástico de Bingham ideal y el modelo de fluidos pseudoplásticos. [BIRD, 1982]

El modelo de plástico de Bingham se representa mediante las siguientes ecuaciones:

$$\tau = \mu \cdot \frac{dv}{dy} + \tau_0 \quad (3.1)$$

$$\text{si } |\tau| > \tau_0 \quad \frac{dv}{dy} = 0 \quad \text{si } |\tau| < \tau_0$$

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 que el esfuerzo cortante es menor de un cierto valor  $\tau_0$ , por encima del cual se comporta de forma semejante a un fluido newtoniano, mostrando una relación lineal entre el



esfuerzo cortante y la velocidad de deformación, cuya viscosidad  $\mu$  es llamada viscosidad plástica.

La *viscosidad aparente* de un fluido se define como el cociente entre el esfuerzo de corte y la tasa de corte ( $dv/dy$ ), y representa la pendiente de la recta que se traza entre un punto de la curva y el origen.

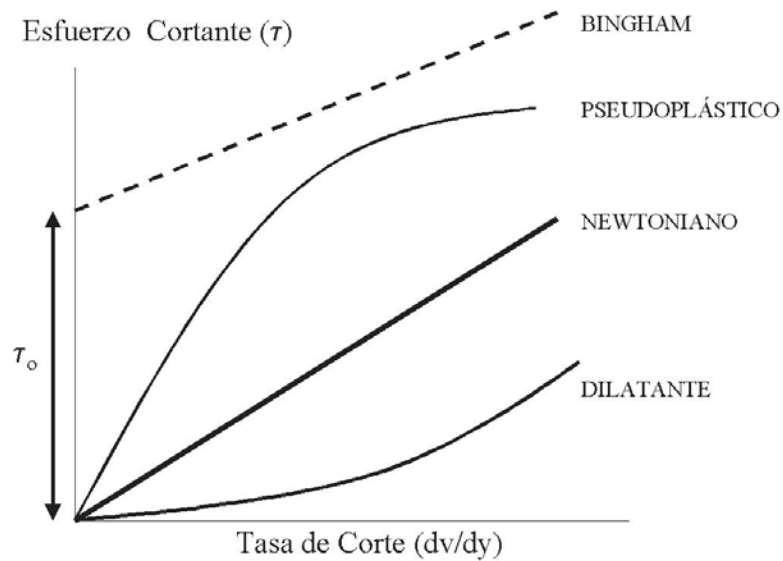
$$\mu_{ap} = \frac{\tau}{dv/dy} \quad (3.2)$$

Cuando la viscosidad aparente ( $\mu_{ap}$ ) disminuye al aumentar el gradiente de velocidad ( $dv/dy$ ), el fluido se denomina *pseudo plástico*. El modelo de fluidos pseudo plásticos se representa mediante la ley de potencias:

$$\tau = m \cdot \left( \frac{dv}{dy} \right)^n \quad (3.3)$$

Donde  $m$  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 pseudo plástico, mientras que si  $n = 1$ , el fluido es newtoniano. En la figura 3.4 se presentan los diferentes tipos de fluidos.

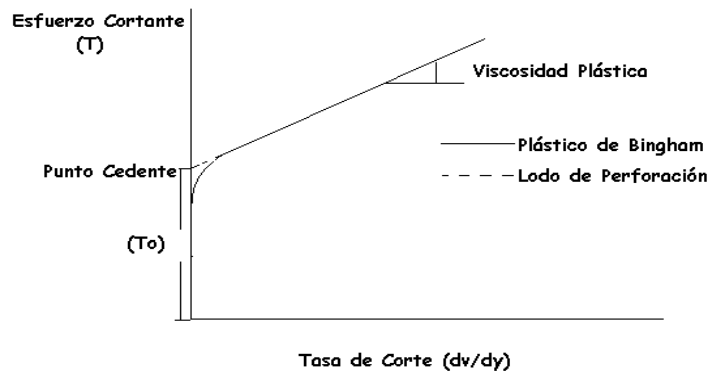
Un fluido de perforación se comporta como un cuasi plástico de Bingham, como se esquematiza en la Figura 3.5. Se observa que existe un esfuerzo cortante, donde el lodo se comporta como un fluido pseudoplástico en la región donde la velocidad de corte es muy pequeña. Luego la velocidad aumenta y la curva se comporta como una línea recta hasta interceptarla con el eje de las ordenadas, se puede decir que, para efectos de simplicidad el lodo se comporta como un plástico de Bingham. [BAROID, 1974]



**Figura 3.4.** Tipos de Fluidos. [BIRD]

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 3.5. La pendiente de la porción de la línea recta de la curva de esfuerzo cortante, representa la viscosidad plástica. Esta 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. Para un sistema de lodo dado, un cambio en la viscosidad plástica generalmente indica un cambio en el contenido de los sólidos.

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 3.5. 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 al ripio fuera del hoyo. Tanto la viscosidad plástica como el punto cedente son propiedades del lodo cuando está en movimiento.



**Figura 3.5:** Reograma de un lodo de perforación [SCHRAMM,1994]

La mayoría de los lodos de perforación exhiben un comportamiento intermedio entre el modelo del plástico de Bingham y el modelo de los fluidos pseudo plásticos. 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 geles a fluir cuando son agitados y regresar a su estado rígido cuando dejan de moverse. La tixotropía se mide mediante la fuerza de gelatinización [SCHRAMM,1994], la cual es la medida de la atracción física y electroquímica bajo condiciones estáticas. Los lodos de perforación son 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 deben ser tan altos como para impedir la recirculación del lodo al colocar el taladro nuevamente en funcionamiento.

#### **3.1.4. Formación del revoque.**

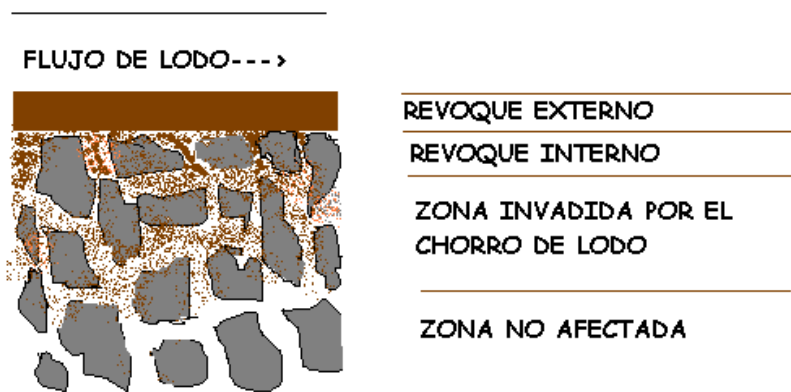
La filtración de los lodos de perforación sobre la superficie porosa del yacimiento es un fenómeno inevitable, debido a que la presión que ejerce la columna de lodo sobre las paredes del hoyo es mayor que la presión de poro de la formación. De esta manera parte de los sólidos dispersos en el lodo se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

Durante el proceso de formación de este 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. [GRAY, 1988]

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. [SORRENTINO,1998]

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 3.6:

- 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 3.6:** Filtración del lodo a través de la formación. [GRAY, 1988]

En la perforación de pozos, el “chorro de lodo” puede ser considerable (llegando 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. Sólo partículas de un tamaño determinado relativo al tamaño del poro pueden formar puentes. Las partículas más grandes que la abertura del poro no pueden entrar en el mismo, y son arrastradas por la corriente de lodo; las 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 de “ $d^{1/2}$ ”*.

*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 regla de “ $d^{1/2}$ ”* sugiere que para un proceso ideal de formación de puentes, 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 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 como al volumen de filtrado.

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 [GRAY, 1988]:  $d/7 < d^* < d/3$ , donde “ $d^*$ ” representa el tamaño (diámetro) de la partícula, y “ $d$ ” el diámetro de la garganta del poro del yacimiento. Aunque esta relación empírica es muy utilizada para seleccionar el tamaño de las partículas que se deben añadir al lodo, no es conveniente emplearla ya que cada yacimiento contiene formaciones cuya distribución de poros puede ser muy variada. [MI, 1991]

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 [AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 1991] 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 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 del 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”.

### 3.1.5. Daños a la formación.

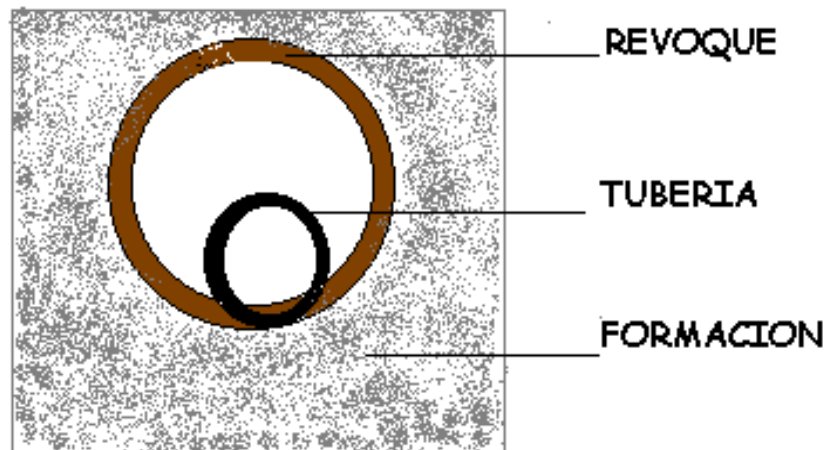
La velocidad de filtración y el “chorro de lodo” deben ser minimizadas cuando se está penetrando en formaciones potencialmente productivas, ya que la productividad puede ser reducida por cualquiera de uno de los cuatro mecanismos siguientes: [GRAY, 1988]

- La permeabilidad de un reservorio rocoso conteniendo arcillas naturales puede ser reducida por el ensanchamiento (aumento del volumen por absorción de líquido y cambios en la estructura molecular) 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 zonas más estrechas 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 (en inglés es “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 sales presentes en el agua intersticial de la formación.

En formaciones permeables, se deben controlar las propiedades de filtración 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 (en inglés es “differential sticking”).



La figura 3.7 muestra el pegado diferencial, el cual ocurre cuando parte del tubo roza contra las paredes del hoyo mientras se perfora, destruyendo parte del revoque. Cuando se detiene la rotación, la parte del tubo en contacto con el revoque está sujeta a la presión de poro de la formación y no a la presión de la columna de lodo. La presión diferencial así creada podría ser lo suficientemente grande para impedir que el tubo sea movido. 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[SORRENTINO,1998]



**Figura 3.7: Pegado Diferencial.**

También son necesarias buenas propiedades de filtración del lodo (formar revoque liso, impermeable y flexible en el menor tiempo posible) 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.

### 3.2. Aspectos conceptuales de la Filtración.

La filtración es el proceso de separación mecánica, que consiste en hacer pasar una suspensión a través de un medio permeable el cual tiene como característica retener las partículas sólidas y dejar pasar el líquido, este proceso se lleva a cabo debido a un diferencial de presión. La capa de sólidos que se deposita sobre el medio permeable ( o medio filtrante) se denomina torta de filtración, y el líquido obtenido se llama filtrado. [BADGER, 1964]

La suspensión a tratar se caracteriza por poseer dos fases: una llamada fase continua que es la parte líquida y la fase dispersa que está formada por las partículas suspendidas. Cuando el proceso de filtración finaliza se tiene un remanente sólido llamado torta de filtración y un líquido clarificado denominado filtrado [SORRENTINO,1998]

Hastchek demostró que la diferencia de presión que se requiere para el proceso de filtración, tiene como única finalidad la de conducir el filtrado de forma continua a través de la torta de filtración y la membrana del filtro.

Existen diferentes tipos de procesos de filtración los cuales están siempre en función de los sólidos retenidos, podemos mencionar los siguientes [ROCCARO,1997]:

- *Filtración en flujo cruzado*: El sólido es arrastrado sobre si mismo junto con el fluido, del cual se obtiene un fluido claro y una suspensión con una concentración mayor que la original.
- *Filtración de lecho profundo*: Los sólidos se depositan dentro de un lecho que actúa como medio filtrante, el cual se obstruye a medida que avanza el proceso de filtrado.

- *Filtración por formación de torta*: Los sólidos se depositan en un medio filtrante de poco espesor y este va incrementándose a medida que la filtración es llevada a cabo.

### 3.2.1. Formación de la torta de filtración

El estudio de la etapa de formación de la torta en un proceso de filtración, implica la obtención de una relación que permita predecir el comportamiento del filtro en términos de la cantidad de sólidos o de filtrado producido por unidad de tiempo, como función de las condiciones de operación del filtro y de las características de la suspensión a ser procesada [BADGER, 1964].

Los parámetros que influyen en este proceso son:

- Caída de presión ( $\Delta P$ ): puede ser constante (la velocidad de filtrado disminuye a medida que transcurre el tiempo) o variar según la caída de presión aplicada.
- Área de filtrado (A): por lo general es constante, a excepción de, por ejemplo, la formación de tortas en filtros tubulares y/o de tambor rotatorio.
- Viscosidad del fluido ( $\mu_L$ ): es proporcional al inverso de la temperatura. Si la temperatura se mantiene constante durante el proceso y el líquido se comporta como un fluido newtoniano la viscosidad no varía.
- Resistencia específica de la torta ( $r_c$ ): permanece constante si las tortas son incompresibles, y depende de la presión aplicada, del grado de consistencia de la torta y del contenido de sólido de la suspensión.
- Resistencia del medio filtrante ( $R_M$ ): por lo general es constante, aunque puede variar con el tiempo debido a la penetración de partículas sólidas en los intersticios del medio filtrante o debido a la presión aplicada, que puede causar la compresión del material fibroso que constituye el medio. Se ha comprobado que la resistencia del medio filtrante aumenta linealmente con el aumento de la presión.

### 3.2.1.1. Porosidad de la Torta.

Las partículas que conforman la torta se encuentran en contacto unas con otras, pero existen en la torta espacios vacíos no ocupados por estos sólidos que constituyen los poros por los cuales pasa el líquido a través de la torta.

La *porosidad* de la torta ( $\varepsilon$ ) se refiere a la fracción del volumen de la torta asociado a los espacios vacíos, y relaciona el volumen de poros o volumen no ocupado por los sólidos ( $V_c - V_s$ ) y el volumen de la torta ( $V_c$ ).

$$\varepsilon = \frac{(V_c - V_s)}{V_c} = 1 - \frac{\frac{m_s}{\rho_s}}{A \cdot h_c} \quad (3.4)$$

De la misma forma se tiene que el fluido no dispone de todo el espacio para circular en el medio poroso, ya que una parte del mismo se encuentra ocupado por el sólido. La fracción del volumen de torta ocupada por el sólido se llama *Solidosidad* ( $\varepsilon_s$ ) o empacamiento:

$$\varepsilon_s = 1 - \varepsilon \quad (3.5)$$

Se puede determinar el volumen de sólidos conociendo la densidad del sólido y midiendo la masa de torta seca, sin embargo para determinar el volumen de la torta se hace necesario medir la altura de la torta húmeda. Si la altura de la torta es muy pequeña o la superficie presenta muchas irregularidades la medición del volumen de la torta húmeda se hace muy imprecisa debido al error asociado en la medición.

### 3.2.2. Ley de Darcy

La ley de Darcy relaciona la caída de presión existente en un medio poroso con el caudal de líquido que lo atraviesa. Esta ecuación, postulada por Darcy en 1853 [BADGER, 1964], establece que el caudal de líquido ( $Q$ ), que pasa a través de un lecho poroso es directamente proporcional a la fuerza impulsora o gradiente de presión aplicado ( $\Delta p$ ), y al área de flujo ( $A$ ), al mismo tiempo es inversamente proporcional a la resistencia, representada por el espesor del lecho ( $h_c$ ) con un coeficiente de proporcionalidad ( $k$ ), el cual depende de las propiedades del lecho y del fluido.

$$Q = k \cdot \frac{A \cdot \Delta p}{h_c} \quad (3.6)$$

#### 3.2.2.1. Permeabilidad de la Torta.

Se puede separar el efecto de la viscosidad del efecto de las características del lecho, introduciendo el concepto de permeabilidad específica del lecho ( $K$ ), conocido simplemente como *Permeabilidad*, la cual indica la facilidad de flujo del líquido a través de la torta.

$$k = \frac{K}{\mu_L} \quad (3.7)$$

Las características de la permeabilidad en el caso en que el líquido fluye dentro de un medio poroso, incluyendo las tortas filtrantes, representan un parámetro importante que ha sido estudiado por muchos trabajos de investigación. Entre los factores que afectan la permeabilidad se incluyen el tamaño de las partículas que

constituyen el medio poroso y la porosidad. La ecuación mejor conocida para la permeabilidad es debida a Kozeny,1972 (citado por SORRENTINO[2000]):

$$K = \frac{\varepsilon^3}{\dot{k}(1-\varepsilon)^2 S_v^2} \quad (3.8)$$

Donde  $S_v$  es el área de la superficie específica por unidad de volumen de las partículas y  $\dot{k}$  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 de lecho. Sustituyendo la ecuación anterior en la ecuación de la ley de Darcy (ecuación 3.6) se obtiene la ecuación de Karman y Kozeny:

$$\frac{\Delta p}{h_c} = \frac{1}{\mu_L} \left( \frac{5(1-\varepsilon)^2 S_v^2}{\varepsilon^3} \right) \frac{dV_L}{dt} \frac{1}{A} \quad (3.9)$$

Se asume que las partículas se encuentran rígidas en los modelos de permeabilidad, en una geometría fija y en contacto unas con otras. Además, sólo se consideran las fuerzas debidas al arrastre de líquido y a la presión. Así cualquier otra fuerza resultante podría causar la desviación de la simplificada ecuación 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.

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 y la distribución de la partícula, la tasa de flujo a que fué formada la torta, la concentración del chorro que está siendo filtrado, etc. Es por ello que sólo deben utilizarse las relaciones teóricas para la

permeabilidad en la ausencia de datos operacionales; las permeabilidades que se miden pueden ser fácilmente uno o dos ordenes de magnitud por debajo de las estimadas con las ecuaciones anteriores. Esto es consecuencia de muchos factores no incluidos en las ecuaciones anteriores. Es cierto, por lo general, que mientras las partículas sean más finas, y la distribución de tamaño más ancha, mayor será la desviación de la relación teórica de la permeabilidad.

Combinando las ecuaciones(3.6 y 3.7) se obtiene la expresión:

$$Q = \frac{dV_L}{dt} = \frac{K \cdot A \cdot \Delta p}{\mu_L \cdot h_C} \quad (3.10)$$

La ecuación de Darcy aplicada a la filtración por formación de torta se puede utilizar suponiendo: medio isotrópico, régimen de flujo laminar, dirección del flujo perpendicular a la sección transversal del filtro y en sentido contrario al crecimiento de la torta, el gradiente de presión existe solamente en dirección del flujo, y por último se desprecia la fuerza impulsora debida a la columna hidrostática frente al gradiente de presión aplicado.

La velocidad a la cual el líquido es filtrado ( $q$ ) es directamente proporcional a la fuerza impulsora e inversamente proporcional a la resistencia que ofrece el medio poroso; la velocidad de filtración puede escribirse como:

$$q = \frac{1}{A} \frac{dV_L}{dt} = \frac{K}{\mu_l} \frac{\Delta p}{h_C} = \frac{1}{\mu_L \alpha_C \cdot m_C} \Delta p \quad (3.11)$$

Donde el término  $m_c$  representa la cantidad de sólidos depositados por unidad de área.

De esta manera se introduce el término de resistencia específica de la torta ( $\alpha_C$ ) el cual expresa el grado de dificultad de paso del flujo de líquido a través de la torta, representado como el inverso de la permeabilidad (K)

$$\text{Donde: } \alpha_C = \frac{1}{K} \quad (3.12)$$

En donde la resistencia específica,  $\alpha_C$ , representa la resistencia que ofrece cada kilogramo de sólidos depositado en un metro cuadrado de superficie, y cuyas unidades son:

$$\alpha_C [=] \frac{m}{Kg} = \frac{m^{-1}}{kgsólido/m^2}$$

Existen otras expresiones para la resistencia específica, las cuales varían de acuerdo a como esta se encuentra expresada, para el caso en que viene dada en función de la altura de torta depositada, se conoce como  $r_C$ , y tiene la siguiente expresión:

$$r_C = \frac{1}{K} \quad (3.13)$$

$$\text{Cuyas unidades son: } r_C [=] \frac{1}{m^2} = \frac{m^{-1}}{m} = \frac{m^{-1}}{m^3 \text{torta}/m^2}$$

También se puede expresar en función del volumen de sólidos depositados por unidad de área,  $\alpha_{CV}$ , y representa la resistencia que ofrece cada metro cúbico de sólidos depositados en un metro cuadrado de superficie, y viene dada por:

$$\alpha_{CV} = \rho_s \cdot \alpha_C \quad (3.14)$$

$$\text{Sus unidades son: } \alpha_{CV} [=] m^{-2} = \frac{m^{-1}}{m^3 \text{sólido}/m^2}$$



### 3.2.3. Ecuación Fundamental para la formación de la torta.

La ecuación de Darcy para una torta que esta creciendo con el tiempo representa una ecuación diferencial en la cual el volumen de filtrado y la altura de la torta varían con el tiempo, por lo tanto un balance de masa considerando un diferencial de torta de espesor  $dh_c$  descrito por Roccaro, 1998, suponiendo que la masa de sólidos depositada en la torta es igual a la masa de sólidos que se encontraba suspendida en el líquido recogido como filtrado más la masa de sólidos presentes en el líquido que queda atrapado en la torta, la expresión que se obtiene es la siguiente:

$$dh_c = \kappa \cdot \frac{dV_L}{A} \quad (3.15)$$

La cual una vez integrada, queda de la siguiente manera:

$$h_c = \kappa \cdot \frac{V_L}{A} \quad (3.16)$$

Asumiendo que cualquier cantidad de filtrado producido deposita los sólidos que lo acompañaban en la suspensión, y que no están presentes efectos de sedimentación, a partir de un balance de sólidos se puede establecer también una relación entre  $m_c$  y el volumen de filtrado,  $V_L$ :

$$m_c = \omega \cdot \frac{V_L}{A} \quad (3.17)$$

Donde  $\kappa$  y  $\omega$  representan los parámetros de concentración, los cuales pueden ser interpretados como la relación entre el volumen de torta depositado ( $V_c$ ) o masa ( $M_c$ ) y el volumen de filtrado producido ( $V_L$ ), y son una función de la relación de la concentración volumétrica de sólidos en la torta,  $\varepsilon_s$ , y la concentración volumétrica de sólidos en la suspensión,  $\phi_s$ :

$$\kappa = \frac{V_c}{V_L} = \frac{h_c \cdot A}{V_L} = \frac{\phi_s}{1 - \varepsilon - \phi_s} = \frac{\phi_s}{\varepsilon_s - \phi_s} = \frac{1}{\frac{\varepsilon_s}{\phi_s} - 1} \quad (3.18)$$

$$\omega = \frac{M_c}{V_L} = \frac{m_c \cdot A}{V_L} = \frac{\rho \cdot \phi_s}{1 - \frac{\phi_s}{\varepsilon_s}} \quad (3.19)$$

Definiéndose  $\phi_s$  como la fracción de sólidos en la suspensión y  $\varepsilon_s/\phi_s$  como la fracción de sólidos en la torta / fracción de sólidos en la suspensión.

Cuando se considera que una torta de filtración es incompresible, trae como consecuencia que la resistencia específica de la torta y la porosidad permanecen constantes con la variación de la caída de presión. Bajo esta suposición y mediante la ecuación de Darcy (Ec.3.6), se obtiene una relación entre la caída de presión del lecho y la altura de la torta.

$$\Delta p_c = \alpha_c \cdot \mu_L \cdot q \cdot h_c \quad (3.20)$$

Cuando se filtra y se forma una torta, el líquido pasa por dos resistencias, la primera es la resistencia de la torta ( $R_c$ ) y la segunda es el medio filtrante ( $R_M$ ), aunque en los primeros instantes de la filtración la resistencia que ofrece la torta es casi nula, sin embargo la resistencia de la torta va aumentando a medida que avanza la filtración, debido a la deposición de sólidos en la superficie del revoque. El cambio en la profundidad de la torta se acompaña con cambios en la proporción del flujo de fluido y el diferencial de presión, mientras aumenta el tiempo de filtración. Se tienen distintas expresiones de la Resistencia de la torta según se evalúe en función de:

- a. La altura de torta depositada:

$$R_c = \frac{h_c}{K} = r_c \cdot h_c = \frac{\kappa \cdot V_L}{A} \quad (3.21.1)$$

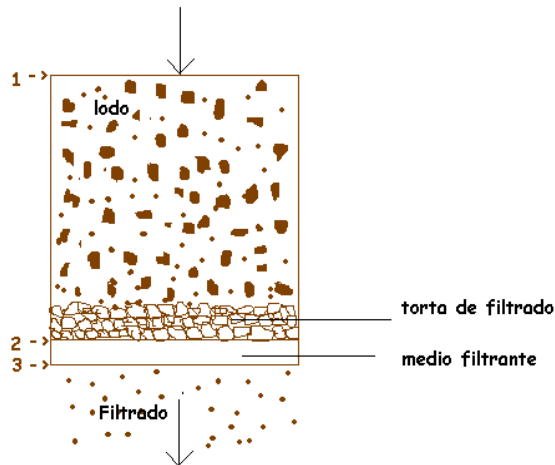
- b. La masa de sólidos depositados por unidad de área

$$R_C = \alpha_C \cdot m_C = \alpha_C \frac{\omega \cdot V_L}{A} \quad (3.21.2)$$

- c. El volumen de sólidos depositados por unidad de área

$$R_C = \alpha_{VC} \cdot v_c = (\alpha_C \cdot \rho_c) \cdot \frac{m_C}{\rho_s} \cdot \frac{\omega \cdot V_L}{A} = \alpha_{VC} \cdot \frac{\omega \cdot V_L}{\rho_s \cdot A} \quad (3.21.3)$$

En la práctica, la diferencia de presión a través de la torta no puede medirse directamente, por lo que se utiliza la diferencia de presión entre la entrada del filtro y la descarga del filtrado, que son los puntos 1 y 3 de la figura 3.8.



**Figura 3.8:** Esquema general de un sistema de filtrado con formación de torta.

La resistencia del medio filtrante es importante solo en los primeros instantes de la filtración. Como usualmente se mide la caída de presión total en el sistema, obligatoriamente, se debe tomar en cuenta la resistencia del medio filtrante,  $R_M$

$$R_M = \frac{\Delta p_m}{\mu_L \cdot q} \quad (3.22)$$

De esta ecuación se tiene que  $\Delta p_m$  es la caída de presión total a través del medio filtrante, por lo tanto la diferencia de presión existente aplicada a lo largo del sistema se puede definir como:

$$\Delta p = \Delta p_C + \Delta p_m = (\alpha_C \cdot h_C + R_M) \cdot \mu_L \cdot q \quad (3.23)$$

En donde  $\Delta p_C$  representa la diferencia de presión entre los extremos de la torta.

$$\Delta p = P_1 - P_2 \quad (3.24)$$

Siendo  $P_1$  y  $P_2$  la presión en los extremos, superior e inferior, de la torta.

Si se combinan las Ecuaciones (3.11) y (3.23), se obtiene una ecuación que rige la filtración en condiciones estáticas, ya que en ella se considera la variabilidad de la altura de la torta y el volumen de filtrado tomando en cuenta la resistencia total aplicada al sistema, la ecuación resultante es la siguiente:

$$q = \frac{1}{A} \cdot \frac{dV_L}{dt} = \frac{\Delta p}{\mu_L \cdot \left( \frac{h_c}{K} + R_M \right)} = \frac{\Delta p}{\mu_L \cdot (\alpha_c \cdot m_c + R_M)} \quad (3.25)$$

Las ecuaciones (3.18) y (3.19) se pueden usar para eliminar  $h_c$  o  $m_c$ , expresando estos en términos de  $V_L$ , con lo cual se modifica la ecuación (3.25) y despejando  $dt$ , se tiene:

$$dt = \left[ \frac{\mu_L \cdot K \cdot V_L}{K \cdot A^2 \cdot \Delta p} + \frac{\mu_L \cdot R_M}{A \cdot \Delta p} \right] \cdot dV_L = \left[ \frac{\mu_L \cdot \alpha_c \cdot \varpi \cdot V_L}{A^2 \cdot \Delta p} + \frac{\mu_L \cdot R_M}{A \cdot \Delta p} \right] \cdot dV_L \quad (3.26)$$

Mediante integración de la ecuación anterior para el caso de que exista una diferencia de presión constante, y suponiendo temperatura constante, la ecuación fundamental de la filtración queda de la siguiente manera:

$$t = \left[ \frac{\mu_L \cdot \kappa \cdot V_L^2}{2 \cdot K \cdot A^2 \cdot \Delta p} + \frac{\mu_L \cdot R_M \cdot V_L}{A \cdot \Delta p} \right] = \left[ \frac{\mu_L \cdot \alpha_c \cdot \varpi \cdot V_L^2}{2 \cdot A^2 \cdot \Delta p} + \frac{\mu_L \cdot R_M \cdot V_L}{A \cdot \Delta p} \right] \quad (3.27)$$

$$t = a \cdot V_L^2 + b \cdot V_L \quad (3.28)$$

Donde:

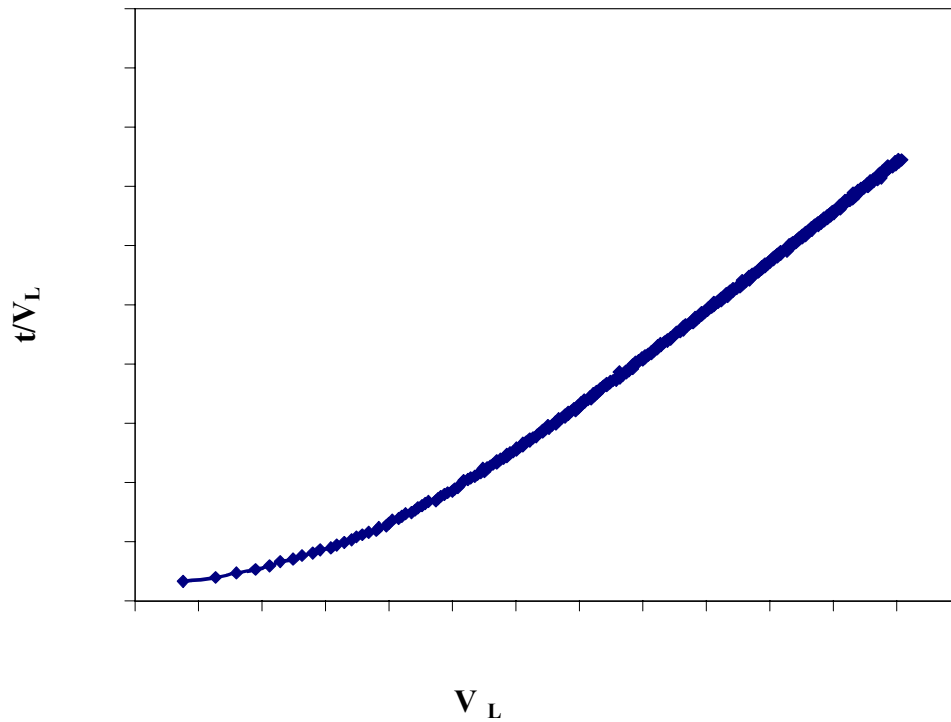
$$a = \frac{\kappa \cdot \mu_L}{2 \cdot K \cdot \Delta p \cdot A^2} = \frac{\alpha_c \cdot \varpi \cdot \mu_L}{2 \cdot \Delta p \cdot A^2} \quad (3.29.1)$$

$$b = \frac{R_M \cdot \mu_L}{\Delta p \cdot A} \quad (3.29.2)$$

Si se dividen ambos lados de la ecuación (3.27) por el volumen de filtrado  $V_L$  se obtiene la ecuación 3.30, la cual permite que a partir de un gráfico  $t/V_L$  en función de  $V_L$ , se pueda determinar la resistencia específica de la torta y la resistencia del medio filtrante por medio de la pendiente de la recta “a” y el punto de corte “b” respectivamente.

$$\frac{t}{V_L} = \left[ \frac{\mu_L \cdot \kappa}{K \cdot A^2 \cdot \Delta p} \right] V_L + \left[ \frac{\mu_L \cdot R_M}{A \cdot \Delta p} \right] = \left[ \frac{\mu_L \cdot \alpha_c \cdot \varpi}{A^2 \cdot \Delta p} \right] V_L + \left[ \frac{\mu_L \cdot R_M}{A \cdot \Delta p} \right] \quad (3.30)$$

Si se representa en un gráfico,  $t/V_L$  en función del volumen de filtrado ( $V_L$ ), la ecuación (3.30) representa una línea recta, sin embargo para un lodo de perforación a partir de los primeros segundos se observa un comportamiento curvo y luego al transcurrir la filtración se estabiliza para tener un comportamiento en línea recta hasta finalizar la filtración, en la figura (3.9) se observa el comportamiento de un lodo de perforación.



**Figura 3.9:** Gráfico  $t/V_L$  vs  $V_L$  para la filtración de un lodo de perforación

Como se observa en la figura 3.9, la ecuación 3.30 no representa una línea recta para un lodo de perforación, esto evidencia la llamada zona incipiente, en la cual la torta formada no ha alcanzado la homogeneidad ya que se encuentra en plena formación.

La resistencia del lodo que pasa a través del poro va en aumento a medida que la torta se va formando, esta torta se empieza a formar en el instante en que aparecen las primeras partículas formadoras de puentes en el poro. Debido a que en la primera etapa la formación de la torta es irregular, la diferencia de presión a través de ella varía con la altura de su superficie, esto hace que la formación de la torta en los primeros instantes no obedezca la Ecuación de Darcy, por lo que a este período se le conoce como *período incipiente* y al volumen de filtrado que se obtiene se denomina *volumen incipiente*. Este período incipiente presenta su final cuando la torta está completamente homogénea en su superficie y por lo tanto la resistencia también lo es,

de aquí en adelante la formación de la torta obedece la ecuación de Darcy y tiene un comportamiento lineal. [SORRENTINO,1998]

Si algo de torta se ha formado entre el tiempo inicial y el tiempo  $t_0$ , que representa el final de la etapa incipiente y comienzo de la etapa Darcyana, se observa que la torta formada (más el medio filtrante) tiene una resistencia  $R^*$ . El tiempo después de  $t_0$ ,  $t - t_0$ , representado por  $t'$ , y el volumen de filtrado producido  $V_L'$ .

$$\frac{t'}{V_L'} = \left[ \frac{\mu_L \cdot \kappa}{2K_D \cdot A^2 \cdot \Delta p} \right] V_L' + \left[ \frac{\mu_L \cdot R^*}{A \cdot \Delta p} \right] = \left[ \frac{\mu_L \cdot \alpha_{CD} \cdot \varpi}{2A^2 \cdot \Delta p} \right] V_L' + \left[ \frac{\mu_L \cdot R^*}{A \cdot \Delta p} \right] \quad (3.31)$$

$$\frac{t'}{V_L'} = a' \cdot V_L' + b' \quad (3.32)$$

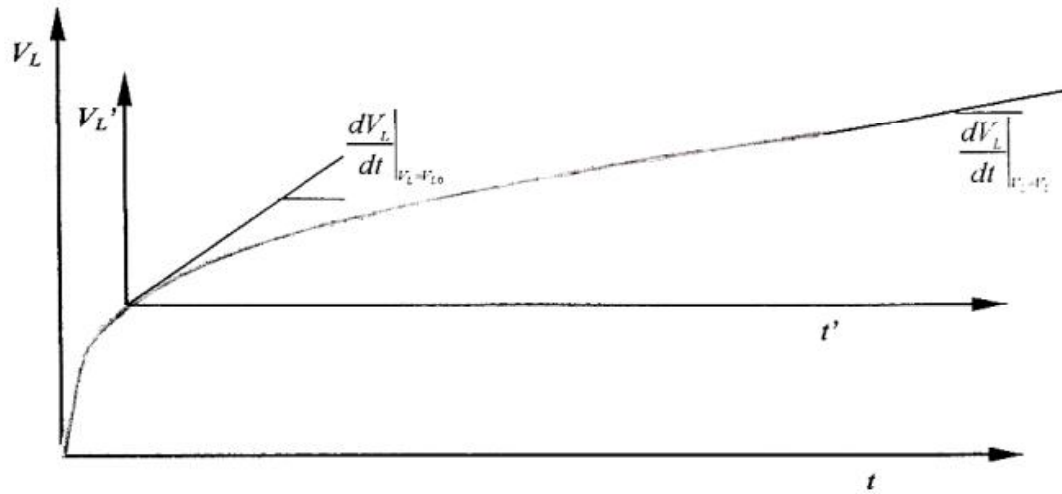
Con:

$$t' = t - t_0 \quad (3.33.1)$$

$$V_L' = V_L - V_{L_0} \quad (3.33.2)$$

Si los datos de filtración representados usando la ecuación (3.30) no ajustan bien a una línea recta o corresponden a esta después de cierto tiempo, se puede utilizar la transformación dada por las ecuaciones (3.33.1) y (3.33.2) y hacer la prueba con el ajuste de la ecuación (3.31) ó (3.32). La pendiente ( $a'$ ) está relacionada con la Permeabilidad (o la resistencia) de la torta formada después de  $t_0$ . La intersección con el eje de las ordenadas ( $b'$ ) está relacionada con la resistencia (y por ende, con la permeabilidad) de la torta que ya existe al tiempo  $t_0$ .

El uso de la ecuación (3.31) para representar la curva de filtración, con la transformación de variables dada por las ecuaciones (3.33.1) y (3.33.2), se presenta esquemáticamente en la figura 3.10.



**Figura 3.10:** Gráfico  $V_L$  vs  $t$  con corrimiento de ejes para los datos de la filtración de un lodo de perforación usando la ecuación 3.31

Derivando la ecuación (3.31) con respecto al tiempo, se pueden obtener las siguientes expresiones para el volumen de filtrado al final de la filtración  $V_{Lf}$ , y al comienzo del tiempo corregido:

$$\left[ \frac{dV_L}{dt} \right]_{V_L=V_{Lf}} = \frac{1}{2 \cdot a' \cdot V' + b'} \quad (3.34)$$

$$\left[ \frac{dV_L}{dt} \right]_{V_L=V_{L0}} = \frac{1}{b'} \quad (3.35)$$

Por lo tanto, si se varía el valor de  $V_{L0}$  ( y su correspondiente  $t_0$ ) hasta que la mayor cantidad de los datos ajuste bien a una línea recta, se puede obtener el tiempo  $t_0$  y el volumen  $V_{L0}$ , así como la ecuación de la recta que mejor ajuste a estos datos, la cual vendría dada por la ecuación:



$$\frac{t'}{V_L'} = a' \cdot V_L' + b' \quad (3.36)$$

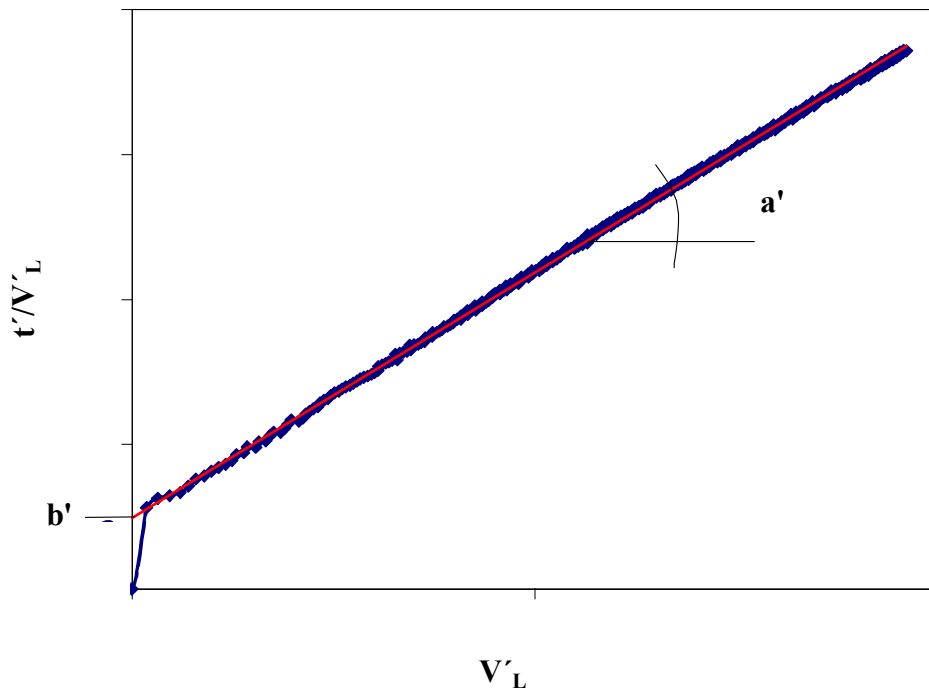
Donde  $a'$  representa la pendiente de dicha recta:

$$a' = \frac{\kappa \cdot \mu_L}{2 \cdot K \cdot \Delta p \cdot A^2} = \frac{\alpha_c \cdot \varpi \cdot \mu_L}{2 \cdot \Delta p \cdot A^2} \quad (3.37.1)$$

Y  $b'$  representa el punto de corte:

$$b' = \frac{R_M \cdot \mu_L}{\Delta p \cdot A} \quad (3.37.2)$$

Los valores de  $t_0$  y  $V_{L0}$  se obtienen mediante: la representación gráfica del tiempo sobre volumen de filtrado modificado ( $t'/V_L'$ ) en función del volumen de filtrado ( $V_L'$ ), luego se desplazan los ejes a través de la curva de filtrado, en el punto donde la curva de filtrado se ajuste mejor a una recta obtendremos los valores de  $t_0$  y  $V_{L0}$ , tal como se muestra en la figura 3.11:



**Figura 3.11:** Determinación de  $t_0$  y  $V_{L0}$

La variación de flujo al final de la filtración se puede relacionar con la permeabilidad Global,  $K_G$ , o la resistencia específica Global,  $\alpha_{CG}$ , usando la ecuación de Darcy:

$$\frac{1}{A} \cdot \frac{dV_L}{dt} \Big|_{V_L=V_{L_f}} = \frac{\Delta p}{\mu_L \cdot (R_{CG} + R_M)} = \frac{\Delta p}{\mu_L \cdot \left( \frac{h_{CG}}{K_G} + R_M \right)} = \frac{\Delta p}{\mu_L \cdot (\alpha_{cI} \cdot m_{CG} + R_M)} \quad (3.38)$$

Mientras la variación de flujo al comienzo del tiempo corregido está relacionada con la permeabilidad Incipiente,  $K_I$ , o la resistencia específica incipiente de la torta,  $\alpha_{CI}$ :

$$\frac{1}{A} \cdot \frac{dV_L}{dt} \Big|_{V_L=V_{L_o}} = \frac{\Delta p}{\mu_L \cdot (R_{CI} + R_M)} = \frac{\Delta p}{\mu_L \cdot \left( \frac{h_{CI}}{K_I} + R_M \right)} = \frac{\Delta p}{\mu_L \cdot (\alpha_{CI} \cdot m_{CI} + R_M)} \quad (3.39)$$

Se puede obtener un valor razonable de la resistencia del medio  $R_M$ , mediante una prueba de permeación del medio filtrante sucio, debido a que el valor tiende a ser despreciable en comparación con la resistencia de la torta.

Las ecuaciones (3.38) y (3.39) permiten determinar la contribución relativa de cada sección del revoque a la resistencia global.

$$R_{CG} = \frac{\Delta p A}{\mu_g} \cdot (2 \cdot a' \cdot V_L' + b') - R_M \quad (3.40.1)$$

$$R_{CI} = \frac{\Delta p A}{\mu_g} \cdot (b') - R_M \quad (3.40.2)$$

$$R_{CD} = R_{CG} - R_{CI} = \frac{\Delta p A}{\mu_g} \cdot (2 \cdot a' \cdot V_L') \quad (3.40.3)$$

Con lo cual se puede determinar la contribución porcentual de cada zona a la resistencia Global, mediante las siguientes expresiones:

$$\%R_{CD} = \frac{R_{CD}}{R_{CG}} \times 100 \quad (3.41.1)$$

$$\%R_{CI} = \frac{R_{CI}}{R_{CG}} \times 100 \quad (3.41.2)$$

Pudiendo también determinarse la contribución porcentual de cada zona a la cantidad de revoque, según las siguientes ecuaciones:

$$\%m_{CD} = \frac{m_{CD}}{m_{CG}} \times 100 \approx \frac{V'}{V} \times 100 \quad (3.42.1)$$

$$\%m_{CI} = \frac{m_{CI}}{m_{CG}} \times 100 \approx \frac{V_o}{V} \times 100 \quad (3.42.2)$$

Para el cálculo de las permeabilidades ( $K_G$ ,  $K_D$  y  $K_I$ ), o de las resistencias específicas ( $\alpha_{CD}$ ,  $\alpha_{CG}$ ,  $\alpha_{CI}$ ), se deben conocer las alturas y las masas de sólidos depositados por unidad de área. La altura final (global) de la torta,  $h_{CG}$ , y la masa de sólidos depositados,  $m_{CG}$ , se miden y los valores incipientes se pueden estimar mediante substracción del crecimiento entre  $t_0$  y  $t$ :

$$h_{CI} = h_{CG} - h_{CD} = h_{CG} - \kappa \frac{V'_L}{A} \quad (3.43.1)$$

$$m_{CI} = m_{CG} - m_{CD} = m_{CG} - \omega \frac{V'_L}{A} \quad (3.43.2)$$

### **Estimación de la Permeabilidad Darcyana**

A partir de la pendiente de la ecuación (3.31) se pueden determinar la permeabilidad Darcyana o la resistencia específica de la torta:

$$K_D = \frac{\kappa \cdot \mu_L}{2 \cdot a' \cdot \Delta p \cdot A^2} = \frac{\mu_L}{2 \cdot a' \cdot \Delta p \cdot A^2} \left( \frac{1}{\varepsilon_s / \phi_s - 1} \right) \quad (3.44)$$

Sin embargo este cálculo sólo es posible si se supone que la porosidad determinada al final de la filtración corresponde con la porosidad de la zona darcyana, lo cual no es cierto por: a) la masa de sólidos incluye la masa depositada en la etapa incipiente y b) la altura del revoque se mide luego de despresurizar la celda, lo cual incluye la posible expansión plástica del revoque, y además se deben conocer la *solidosidad* de la torta (para poder calcular  $\kappa$  (ó  $\varpi$ ) y la *viscosidad* del fluido ( $\mu$ ).

### **Viscosidad efectiva de la goma Xhantana**

Para poder estimar la viscosidad efectiva de la goma  $\mu_g$ , se supone que la resistencia global es igual para el caso de permeación con agua que para el momento final de la filtración.

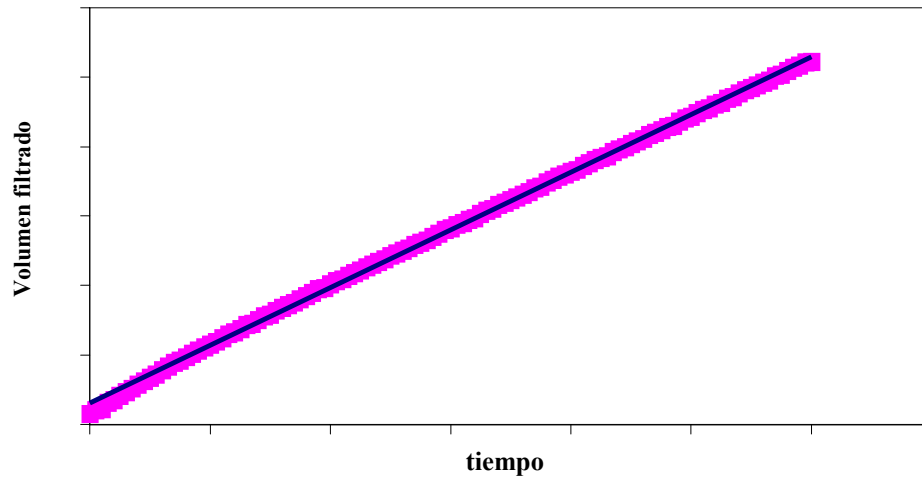
#### Caudal de filtrado para un tiempo t.

$$q_g = \frac{1}{A} \cdot \frac{dV}{dt} \Big|_{V_L=V'_L} = \frac{1}{A \cdot (2 \cdot a' \cdot V' + b')} \quad (3.45)$$

#### Caudal de agua durante la permeación del revoque para un tiempo t.

Partiendo de los datos de la prueba de permeación del revoque, se construye la gráfica Volumen de filtrado en función del tiempo, y a partir de esta se puede determinar el caudal de agua como la pendiente de la curva de filtración dividido entre el área de filtración.

$$q_a = \frac{1}{A} \cdot \frac{dV}{dt} \Big|_p \quad (3.46)$$



**Figura 3.12:** Gráfico para el proceso de Permeación del revoque con agua.

#### Viscosidad efectiva de la goma Xhantana

$$\mu_g = \mu_a \cdot \frac{q_a}{q_g} = \frac{q_a}{A(2 \cdot a' \cdot V_L' + b')} \quad (3.47)$$

#### **Estimación de la movilidad Darcyana.**

Se puede expresar la resistencia al flujo considerando los términos  $r_C$  y  $\mu_L$ , agrupamiento que en la industria petrolera es referido como *movilidad* y equivale a la constante de proporcionalidad de la ecuación de Darcy, la cual es una propiedad del conjunto medio poroso-fluido, y se define de la siguiente forma:

$$Movilidad \equiv \frac{1}{\mu_L \cdot r_C} = \frac{K_D}{\mu_L} \quad (3.48)$$

En caso de que no se disponga de información de la viscosidad, a partir de la pendiente  $a'$  se determina la movilidad Darcyana,  $K_D/\mu$ :

$$Movilidad \equiv \frac{K_D}{\mu_L} = \frac{1}{2 \cdot a' \cdot \Delta p \cdot A^2} \left( \frac{1}{\varepsilon_s / \phi_s - 1} \right) \quad (3.49)$$

**Estimación de la resistencia específica darcyana,  $\alpha_{CD}$ :**

Partiendo del valor de  $a'$ , y despejando, se tiene que la resistencia específica darcyana  $\alpha_{CD}$ , viene dada por:

$$\alpha_{CD} = \frac{2 \cdot a' \cdot \Delta p \cdot A^2}{\mu_g \cdot \omega} \approx \frac{2 \cdot a' \cdot \Delta p \cdot A^2_L}{\mu_g} \left( \frac{\rho_s \phi}{1 - \varepsilon_s / \phi_s} \right)^{-1} \quad (3.50)$$

$$\alpha_{CD} = \frac{2 \cdot a' \cdot \Delta p \cdot A^2}{\mu_g \cdot \omega} \approx \frac{2 \cdot a' \cdot \Delta p \cdot A^2_L}{\mu_g \cdot \rho_s \cdot \phi_s \cdot \chi_w} \quad (3.51)$$

La ecuación anterior se obtiene de la sustitución de  $\chi_w$ , por el valor:

$$\chi_w = \frac{1}{1 - \frac{\phi_s}{\varepsilon_s}} \quad (3.52)$$

La adecuada manipulación de las ecuaciones (3.18) y (3.19) permiten obtener una relación entre  $\omega$  y  $\kappa$ :

$$\frac{\omega}{\kappa} = \rho_s \cdot \varepsilon_s \quad (3.53)$$

Lo cual permite conectar la permeabilidad con la resistencia específica de la torta, utilizando el término conocido como el Producto Permeabilidad-Solidosidad:

$$\rho_s \cdot \alpha_c = \frac{1}{K \cdot \varepsilon_s} \quad (3.54)$$

Donde el termino  $(1/K)$  representa la resistencia ofrecida por cada unidad de espesor de torta [ $\text{m}^3$  de torta/  $\text{m}^2$  de área], la resistencia específica,  $\alpha_c$ , corresponde a la resistencia de la masa de sólidos depositados por unidad de área [ $\text{kg}$  de torta/ $\text{m}^2$  de área], el grupo  $\rho_s \alpha_c$  puede ser interpretado como la resistencia del volumen de sólidos depositados por unidad de área [ $\text{m}^3$  de sólidos/  $\text{m}^2$  de área ].

Ahora bien, el término  $K \cdot \varepsilon_s$ , es un tipo de permeabilidad, no relacionada con el espesor de la torta [ $\text{m}^3$  de torta/  $\text{m}^2$  de área] como lo está  $K$ , pero si al volumen de sólidos depositados por unidad de área depositada [ $\text{m}^3$  de sólidos/  $\text{m}^2$  de área], la ventaja que posee este término que es que no depende de la medición de altura de torta, lo que originaba grandes errores en la determinación de la porosidad.

De donde se tiene que para la zona Darcyana, el producto Permeabilidad-Solidosidad viene dado por:

$$K_D \cdot \varepsilon_s = \frac{1}{\rho_s \cdot \alpha_{CD}} \quad (3.55)$$

### **Estimación de la resistencia específica Global.**

Con la masa de sólidos del revoque seco,  $M_s$ , se puede calcular la masa de sólidos por unidad de área,  $m_{CG}$ , mediante:

$$m_{CG} = \frac{M_s}{A} \quad (3.56)$$

$$\alpha_{CG} = \frac{R_{CG}}{m_{CG}} \quad (3.57)$$

$$K_{CG} \cdot \varepsilon_s = \frac{1}{\rho_s \cdot \alpha_{CG}} \quad (3.58)$$

### **Estimación de la resistencia específica Incipiente.**

$$\alpha_{CI} = \frac{R_{CI}}{m_{CI}} = \frac{R_{CI}}{m_{CG} - m_{CD}} \quad (3.59)$$

$$K_{CI} \cdot \varepsilon_s = \frac{1}{\rho_s \cdot \alpha_{CI}} \quad (3.60)$$

#### **3.2.4. Espesor de la torta o Revoque**

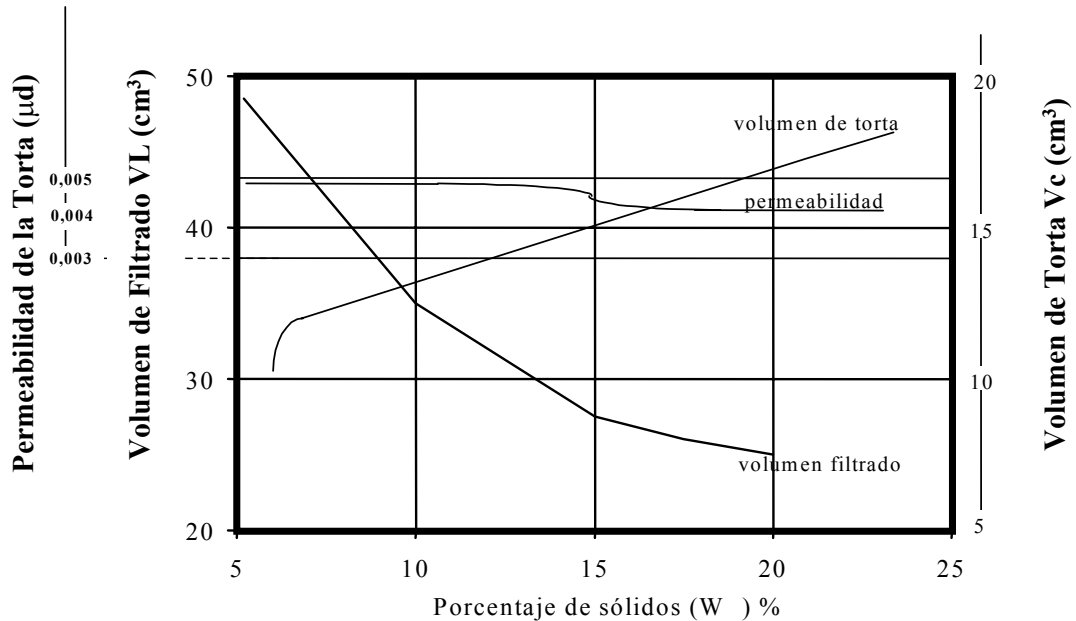
El espesor de la torta puede afectar las condiciones de apertura que pueda tener el hoyo que se halla perforado, como por ejemplo puede afectar el arrastre de la tubería como también causar cambios diferenciales de presión. La mayoría de las veces estos efectos no se toman en cuenta como factor importante ya que se suponen proporcionales a la pérdida del filtrado y solamente se estudia el efecto de dicha pérdida.

La altura de la torta es función de la porosidad, resistencia del medio filtrante, permeabilidad de la torta y concentración de sólidos. Un incremento en la concentración de sólidos produce una disminución en la pérdida de filtrado, y trae como consecuencia inmediata el incremento en el volumen de la torta, ver figura 3.13.

Si se toma como punto de partida la ecuación básica de la filtración (Ecuación 3.19), suponiendo una porosidad y resistencia específica de torta promedio, al integrar desde un instante cero (0) hasta un instante de tiempo (t), se puede obtener la altura de la torta como:



$$h_c = \sqrt{\left(\frac{R_M}{r_C}\right)^2 + \frac{2 \cdot \kappa \cdot \Delta p \cdot t}{r_C \cdot \mu_L}} - \frac{R_M}{r_C} \quad (3.64)$$



**Figura 3.13:** Efecto de la concentración de sólidos sobre la permeabilidad, volumen filtrado y volumen de torta [GRAY, 1988].

### 3.2.5. Relación entre la Temperatura y el Volumen Filtrado.

Un aumento de la temperatura produce una disminución de la viscosidad del filtrado y, consecuentemente, el incremento del volumen filtrado. Adicionalmente, cambios en la temperatura producen cambios continuos en el equilibrio electroquímico que gobierna el grado de floculación y agregación, lo que afecta directamente la permeabilidad de la torta. Una temperatura elevada puede causar, además, la degradación química de los componentes del lodo, principalmente aquellos de carácter orgánico.

La variación de la pérdida de filtrado con el cambio de viscosidad se puede obtener mediante la siguiente relación: [GRAY, 1988]

$$V_{L2} = V_{L1} \cdot \sqrt{\frac{\mu_{L1}}{\mu_{L2}}} \quad (3.65)$$

donde  $\mu_{L1}$  y  $\mu_{L2}$  son las viscosidades del filtrado a la presión de la prueba para  $V_{L1}$  y  $V_{L2}$ , respectivamente.

### 3.2.6. Relación entre el Volumen de Filtrado y la Presión.

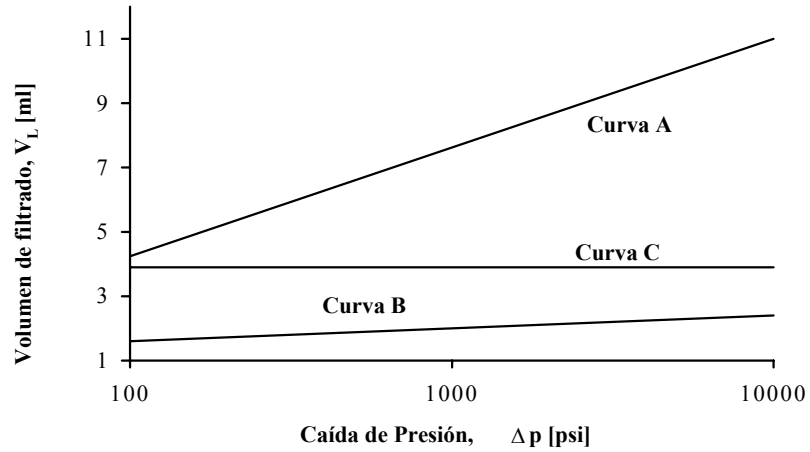
Si los parámetros de la ecuación (3.61), permanecen constantes, exceptuando a la presión, entonces  $V_L$  será proporcional a  $\sqrt{\Delta p}$  y la pendiente de la curva en una escala logarítmica debería ser 0,5. Sin embargo, la mayoría de los lodos forman tortas más o menos compresibles, por lo que su permeabilidad no es constante y decrece con el aumento de la presión; por lo tanto, el volumen de filtrado varía con la presión de la siguiente manera:

$$V_L = k' \cdot \Delta p^\gamma \quad (3.66)$$

Donde  $\gamma$  varía de lodo a lodo, pero siempre es menor a 0.5, como se muestra en la Figura 3.14 (A: arcilla,  $\gamma = 0.205$ ; B: pizarra,  $\gamma = 0.084$ ; C: bentonita,  $\gamma = 0$ ), y  $k'$  es la constante de proporcionalidad, que involucra los valores que permanecen constantes.

El valor de  $\gamma$  depende del tipo, tamaño, forma y distribución de las partículas que forman la torta; mientras más compresible sea la torta, el valor de  $\gamma$  tiende a cero. Si las partículas poseen una forma y tamaño, de manera tal que al aplicar una presión éstas puedan reagruparse de una forma muy compacta, entonces se obtendrá un  $\gamma$  muy

pequeño, como es el caso de la bentonita (curva C) que es muy compresible, debido a que está finamente dividida en plaquetas que tienden a alinearse en forma paralela.



**Figura 3.14:** Efecto de la presión sobre el volumen de filtrado

### **3.3. Aspectos conceptuales de la granulometría**

Debido a que las partículas son fragmentos de un sólido finamente dividido, la principal propiedad que define un sistema de partículas es su tamaño, a pesar de que existen otras propiedades que pueden resultar importantes como lo son la densidad, la forma y la composición.

Para especificar un material que está reducido a partículas, debido a que se encuentran por lo general en una gran variedad de tamaños, es necesario definir no sólo los diferentes tamaños que se encuentran presentes en el conjunto, sino que también se hace necesario especificar las cantidades relativas de cada tamaño que compone la muestra.

El tamaño generalmente se expresa en términos de alguna dimensión característica, promedio o efectiva de las partículas. La mayor parte de los análisis granulométricos no miden de forma directa el tamaño de las partículas, sino que miden alguna propiedad que pueda asociarse de manera efectiva por medio de relaciones analíticas o empíricas que permitan expresar los resultados en función de un tamaño aparente.

#### **3.3.1 Definición de Tamaño de Partículas.**

Los sistemas de partículas están conformados por dos fases, una continua que usualmente es el fluido y una discreta, las partículas, la cual puede ser líquida, sólida o gaseosa [SORRENTINO, 1999]. Un estudio completo de este tipo de sistemas, involucra una descripción del tamaño, forma, densidad, y estructuras que lo conforman.

Se define como partícula a la unidad individual en la que está dividido un material. La medición del tamaño se refiere generalmente a la partícula individual, y es de suma importancia deshacer los grupos de partículas (aglomerados), con el fin de dispersarlas y de esta manera se determinan sus propiedades específicas [ANLAUF y SORRENTINO, 1996].

El tamaño de la partícula puede ser medido utilizando distintas características como son: Longitud, área proyectada, área superficial, volumen, velocidad de sedimentación, interferencia a campos eléctricos y otros. En lo que respecta a la forma de las partículas, éstas se pueden clasificar en regulares e irregulares.

Las partículas regulares son aquellas que tienen una forma geométrica conocida y pueden ser definida por dos parámetros, el tipo de forma y la dimensión principal que la caracteriza, por ejemplo, para una partícula de forma esférica, la medida principal es el diámetro[ANLAUF y SORRENTINO, 1996].

Al no tener siempre las partículas una forma regular, se hace necesario definir *tamaño de partícula* como el diámetro de la esfera que posee la misma característica (ya sea volumen "V", superficie S, área proyectada  $A_p$ , velocidad terminal de sedimentación  $u_t$ , interferencia al paso de la luz en un cierto porcentaje, o una difracción de un rayo láser en un ángulo  $\alpha$ ), que la partícula irregular en estudio. Por lo tanto, hablar del tamaño de partícula es referirse al "*diámetro de la esfera equivalente*".

Las partículas irregulares pueden ser definidas mediante un número de tamaños, dependiendo de cual dimensión o propiedad se esté midiendo. En la tabla 3.1 se definen y clasifican los diámetros utilizados para identificar una partícula irregular, indicando el símbolo, nombre y propiedad medida.

### **3.3.2 Medición del tamaño de partícula**

El revoque está compuesto por muchos sólidos naturales de la formación y por diferentes tipos de sólidos añadidos. Pero igual de importante que la cantidad de sólidos en el lodo, es su forma, tamaño y distribución. Por lo tanto para obtener el mejor revoque es necesario escoger cuidadosamente el tipo de materiales para controlar la pérdida de filtrado, así como también estudiar la distribución del tamaño de partículas en el lodo.

Con el fin de prevenir los problemas de perforación de pozos, los cuales se deben a las características de filtración del lodo, se han orientado los esfuerzos a controlar la torta de filtrado. El objetivo es depositar una torta de filtrado que sea lo más delgada e impermeable posible, y para lograr esto, se debe seleccionar un tamaño de partícula tal que disminuya al máximo el paso de fluido al yacimiento, pero que a su vez no implique un aumento en la invasión de sólidos del mismo [SORRENTINO,1999].

Hasta este momento se ha considerado que el tamaño de partícula es una variable conocida durante el desarrollo y evaluación de la distribución de tamaños de partículas (DTP), por lo que en este punto se definirán las principales técnicas de determinación de este valor, así como los principios físicos en las cuales se basan.

### **3.3.2.1 Técnicas de medición de tamaño de partícula.**

Un método de análisis de tamaño de partículas depende de alguna propiedad (geométrica, óptica, eléctrica, etc.) o combinación de éstas, que permita distinguir un tamaño de otro. Ésta es la clave del mismo, pues basándose en un grado de clasificación total o parcial de la muestra, o en variaciones de dicha propiedad debido a la diferencia de tamaño, se puede definir la DTP.

Es importante señalar el hecho de que distintos métodos de determinación de tamaño de partícula, reportan diferentes medidas de tamaño, por lo tanto debe tenerse mucho cuidado al momento de seleccionar el método apropiado.

### **3.3.2.2 Métodos de Análisis de Tamaño de Partícula.**

Los métodos para expresar el tamaño de las partículas, dependen del dispositivo de medida utilizado.

Tamizado: es un método común. Consiste en una serie de tamices estándar. El sólido se coloca en la parte superior de la serie de tamices; cada tamiz tiene aberturas más pequeñas que la superior. Conforme se hacen vibrar los tamices, las partículas caen a través de ellos, hasta que llegan a un tamiz en el cual las aberturas son lo suficientemente pequeñas para evitar el paso de partículas. Este método presenta las ventajas de ser económico y puede usarse para partículas grandes [FOUST, 1984], pero no permite medir sprays o emulsiones, los materiales cohesivos y aglomerados son difíciles de medir.

Sedimentación: es un método tradicional de medición cuyo rango de aplicación es de 2 a 50  $\mu$ m. El principio de la medición se basa en la ley de Stokes, y el método consiste en separar las mezclas de acuerdo con las velocidades de sedimentación de las partículas. Este método se ve limitado por lo lento de la velocidad de medición, la imprecisión en el control de la temperatura y la imposibilidad de manejar mezclas cuyas partículas tengan diferentes densidades, además de tener un rango limitado de aplicación.

Microscopía: este método consiste en contar y medir ópticamente las partículas. Si las partículas son pequeñas se colocan bajo un microscopio y cada partícula dentro del campo de observación se mide por medio de un micrómetro óptico. La exactitud del diámetro medio obtenido dependerá del uso de un número de partículas estadísticamente grande, la orientación errática de las partículas eliminará cualquier efecto de la dirección tomada. Este método es muy laborioso en comparación con los anteriores pero permite reconocer aglomeraciones de partículas que pueden pasar desapercibidas por otros métodos.

Difracción láser: tiene un amplio rango de aplicación (0.1 a 2000  $\mu$ m), para caracterización y control de calidad. El método se basa en un factor cuyo ángulo de difracción es inversamente proporcional al tamaño de partícula. Está compuesto por un láser de intensidad moderada con longitud de onda fija y un corte de silicón fotosensitivo con un número discreto de difractores (16-32). Este método rápido y

altamente reproducible es ventajoso por ser flexible, las partículas secas se pueden medir directamente, aunque puede ocurrir la aglomeración de las mismas. Se genera directamente una distribución volumétrica de partículas, la cual es igual a la distribución másica si la densidad es constante.

### **3.3.3 Distribución del tamaño de partícula**

La composición de los revoques consiste en una gran cantidad de sólidos naturales que están presentes en la formación y por los sólidos añadidos, por lo tanto es muy importante para la obtención del mejor revoque que se garanticen las condiciones óptimas de la formación que consiste básicamente en controlar la pérdida de filtrado, para llegar a dicho objetivo no solo es necesario escoger adecuadamente el tipo de material del cual estará compuesto el lodo, sino también del tamaño de las partículas contenidas en él.

La forma en las que se miden y se cuentan las partículas lleva necesariamente a generar una distribución del tamaño, ya que las partículas son irregulares y la manera en que sean medidas determinará el tamaño de ellas.

Si la medición se basa en la distribución del tamaño de partícula como una forma estadística, se hace necesario el poder caracterizarla a partir de parámetros, como por ejemplo las medidas de tendencia central y las medidas de dispersión.



**Tabla 3.1:** Lista de diámetros de esfera equivalente, círculo equivalente y estadísticos [SVAROVSKY,1988]

<b>Diámetro de esfera equivalente:</b> Son los diámetros de una esfera que tendría las mismas propiedades de la partícula.		
<b>Símbolo</b>	<b>Nombre</b>	<b>Propiedad</b>
$x_v$	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
$x_{st}$	Diámetro de Stokes	Velocidad de caída libre bajo el cumplimiento de la ley de Stokes
$x_A$	Diámetro de Tamiz	Paso a través del mismo tamaño de apertura (tamiz)
<b>Diámetro del círculo equivalente:</b> Son los diámetros de un círculo que posee las mismas propiedades que el contorno proyectado de la partícula.		
<b>Símbolo</b>	<b>Nombre</b>	<b>Propiedad</b>
$x_a$	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
<b>Diámetros estadísticos:</b> Este grupo se obtiene cuando una dimensión lineal es medida con el micrómetro óptico.		
<b>Símbolo</b>	<b>Nombre</b>	<b>Propiedad</b>
$x_F$	Diámetro de Feret's	Distancia entre dos tangentes opuestas a los lados de la partícula, paralelas a una dirección fija
$x_N$	Diámetro de Martin's	Longitud de la línea que biseciona la imagen de la partícula
$x_{CH}$	Diámetro de máximo contorno	Longitud máxima de una línea limitada por el contorno de la partícula

Para llevar a cabo la representación del tamaño de las partículas se realiza una curva de distribución, en la que el intervalo del diámetro de las partículas o su equivalente, se divide en un número adecuado de clase de amplitud debidamente seleccionada, y se expresa alguna medida (número, longitud, superficie y volumen)

de partículas que entran en cada intervalo de clase preferiblemente en cada intervalo del total.

### 3.3.4 Representación de la Distribución de Tamaño de Partículas.

La distribución de tamaños de partículas (DTP) es una propiedad intensiva de la suspensión, o más precisamente de los sólidos que la componen, que representan la fracción del total de las partículas que pertenecen a cada tamaño. Existen dos tipos de distribuciones ampliamente aceptadas para representar la distribución del tamaño de partículas (DTP), las cuales dependen de qué característica se utilice para definir cuantas partículas pertenecen a cada tamaño, que son: [SORRENTINO, 1999 y FOUST,1984]

- *Densidad de distribución “ $f(x)$ ”*: Se define como la fracción de partículas por unidad de tamaño, la cual se calcula dividiendo la fracción de partículas o frecuencia de clase entre el tamaño del intervalo ( $\Delta x$ ). El área bajo la curva de frecuencia en función del tamaño de partícula debe ser igual a uno. Una representación gráfica típica de la densidad de distribución se muestra en la figura 3.15.

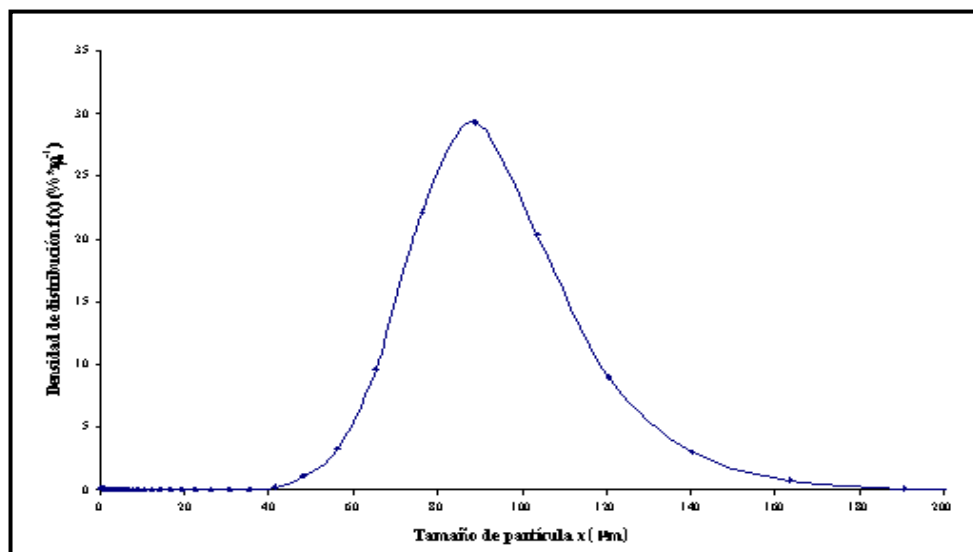
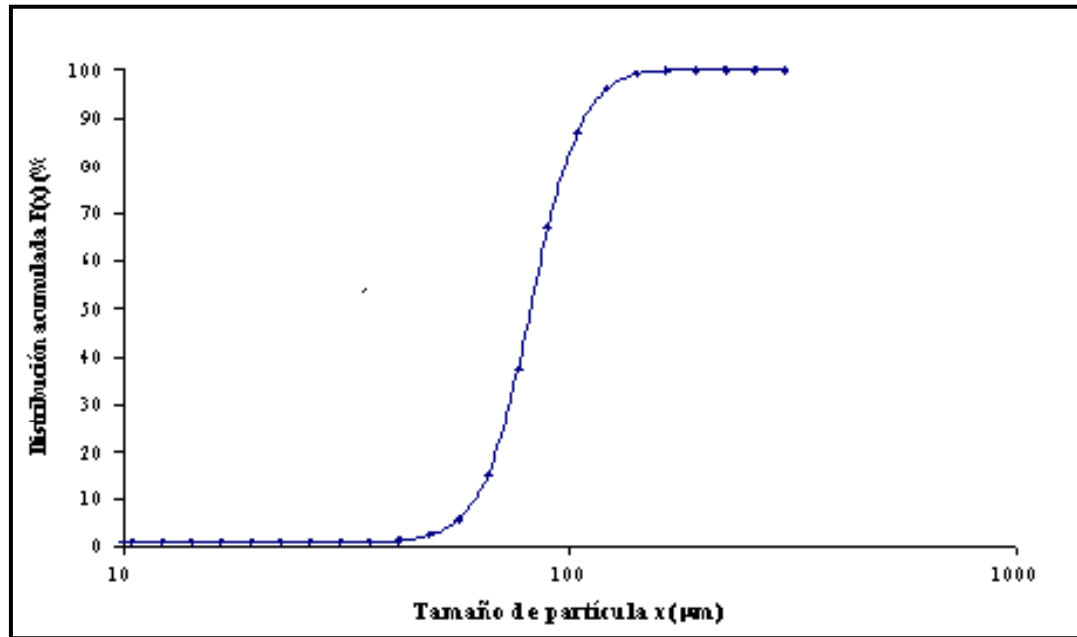


Figura 3.15. Densidad de distribución típica.

- *Distribución acumulada “F(x)”*: La distribución acumulada de tamaños de partículas, F(x), representa la fracción o porcentaje de las partículas que poseen un tamaño menor que x. Una representación gráfica típica de la DTP se muestra en la figura 3.16.



**Figura 3.16.** Distribución acumulada típica.

La relación entre la densidad de distribución y la distribución de frecuencia acumulada viene dada por la siguiente ecuación:

$$F(x) = \int_{x_1}^{x_2} f(x) * dx \quad (3.67)$$

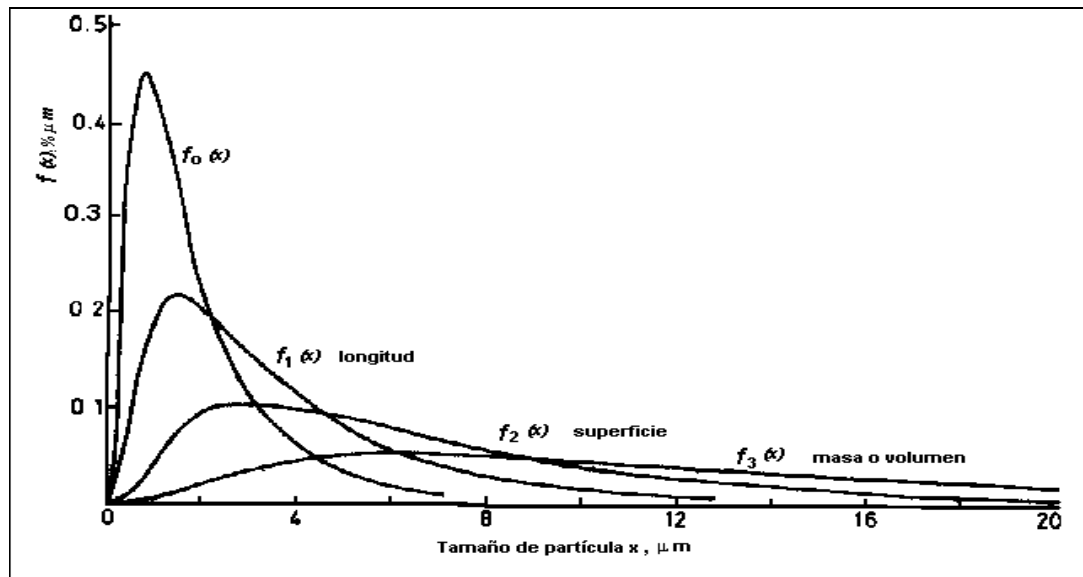
Dependiendo del método usado para cuantificar la cantidad de partículas, existen cuatro tipos de densidades de distribución de partículas y cuatro distribuciones acumuladas (Ver tabla 3.2), cada una de ellas se relaciona con una dimensión diferente e identificada con el subíndice r, el cual posee los siguientes valores 0,1,2 y 3.

**Tabla 3.2:** Tipo de distribuciones de tamaño [SORRENTINO, 1999]

Tipo	Símbolo	Definición	Dimensiones
Densidad de distribución	$f_0$	Por número	Número de partículas de tamaño $x$ entre número total de partículas
	$f_1$	Por longitud	Longitud de las partículas de tamaño $x$ entre longitud total
	$f_2$	Por área o superficie	Superficie de las partículas de tamaño $x$ entre superficie total
	$f_3$	Por volumen o masa	Volumen de las partículas de tamaño $x$ entre volumen total
Distribución acumulada	$F_0$	Por número	Número de partículas de tamaño menor que $x$ entre número total de partículas
	$F_1$	Por longitud	Longitud de las partículas de tamaño menor que $x$ entre longitud total
	$F_2$	Por área o superficie	Superficie de las partículas de tamaño menor que $x$ entre superficie total
	$F_3$	Por masa o volumen	Volumen o masa de las partículas de tamaño menor que $x$ entre volumen o masa total

Las densidades de distribución pueden ser relacionadas entre sí, bajo la suposición de un factor de forma constante, a partir de la siguiente ecuación:

$$f_i(\mathbf{x}) = \frac{\mathbf{x}^{i-j} \cdot f_i(\mathbf{x})}{\int_0^{\infty} \mathbf{x}^{i-j} f_i(\mathbf{x})} \quad (3.68)$$



**Figura 3.17.** Forma de las diferentes distribuciones.

### 3.3.5 Parámetros de Caracterización de una DTP

Los datos resultantes del análisis de la DTP, por sí solos no brindan información útil que el investigador pueda aplicar directamente, por tal razón, se busca condensar la mayor información a través del menor número de parámetros posibles, que permitan evaluar el comportamiento de la DTP. Dicho estudio implica la determinación de parámetros tales como:

#### 3.3.5.1 Medidas de Tendencia Central.

Para cualquier conjunto de datos existen dos medidas de interés: la localización de su centro y su variabilidad. La tendencia central de un conjunto de datos es la disposición de éstos para agruparse, ya sea alrededor de su centro o de ciertos valores numéricos. La variabilidad de un conjunto de datos es la dispersión de las observaciones del conjunto [CANAVOS, 1993].

Existen tres mediciones de tendencia central para una distribución de tamaño dada: la moda, la mediana y la media [CANAVOS 1993].

#### **3.3.5.1.1 Moda**

La moda de una serie de números es aquel valor que se presenta con la mayor frecuencia, es decir, es el valor más común. Para una distribución de frecuencia, es el valor alrededor del cual los términos tienden a concentrarse más densamente. Para una DTP representa el diámetro para el cual  $f(x)$  es máxima (Ver figura 3.18). Es importante señalar que la moda es un valor inestable, cambia radicalmente si se modifica el método utilizado para redondear datos. Algunas distribuciones tienen más de un pico y son comúnmente referidas a distribuciones multimodales.

#### **3.3.5.1.2 Mediana**

La mediana es una medida descriptiva que divide una distribución de tal manera que quede a cada lado un número igual de términos: una mitad que es mayor al tamaño medio y otra que es menor a dicho tamaño, se puede decir que es el centro o localización de una distribución de partículas, que corresponde al valor de tamaño con una frecuencia igual a 50% y divide la curva de densidad de distribución  $f(x)$  en dos sectores de igual área (Ver figura 3.18), por lo que se denomina  $x_{50}$ . Es importante señalar que el valor de la mediana sólo se puede obtener de datos ordenados. El valor de la mediana puede o no coincidir con un valor de la serie; todo depende de si el número de datos es par o impar; en el primer caso no coincide y en el segundo si. Geométricamente la mediana es el valor de la abscisa que corresponde a la recta vertical que divide un histograma en dos partes de igual área.

#### **3.3.5.1.3 Media**

Se define como un índice de localización medio empleado en la descripción de la distribución de frecuencia. Representa un valor promedio basado en la

frecuencia que ejerce cada valor o clase dentro de la muestra (Ver figura 3.18). Para el estudio de la DTP se define a través de la función de tamaño  $g_k(x)$  y la densidad de distribución  $f(x)$  o la distribución de frecuencia  $F(x)$  de manera integral:

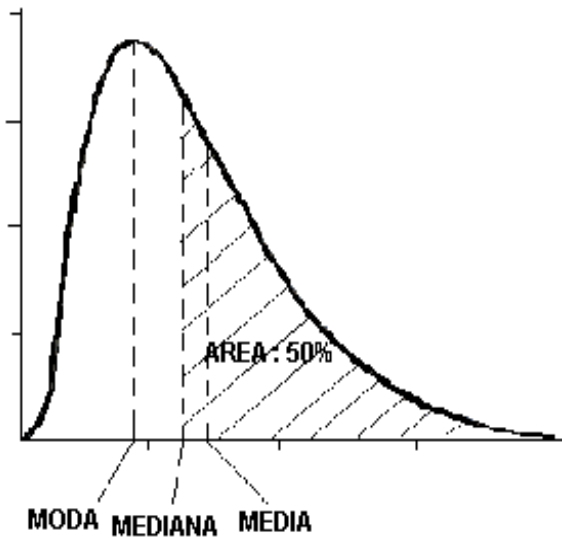
$$g(\bar{x}) = \int_0^{\infty} g(x) \cdot f(x) \cdot dx \quad (3.69)$$

Donde la función  $g(x)$  permite definir diferentes tipos de medias, como por ejemplo la media aritmética ( $\bar{X}_a$ ) y la media geométrica ( $\bar{X}_g$ ) y  $f(x)$  es la distribución de frecuencia de tamaño dada por el número, por la longitud, por la superficie o por la masa.

En la tabla 3.3 se presentan los tipos de medias utilizadas en la distribución de tamaños de partículas.

**Tabla 3.3:** Tipos de Medias [SVAROVSKY, 1988]

$g_k(x)$	Nombre de la media	Símbolo
X	Aritmética	$x_a$
$x^2$	Cuadrática	$X_q$
$x^3$	Cúbica	$x_c$
$x^{-1}$	Armónica	$X_h$
$\ln x$	Geométrica	$X_g$



**Figura 3.18:** Medidas de tendencia central [RIVAS Y MARANO, 1999]

Para calcular la media aritmética ( $\bar{X}$ ) de un conjunto de datos, es necesario hacer una distinción fundamental dependiendo de que los valores estén agrupados por clases o sean valores individuales. Para valores individuales la media aritmética se calcula como la relación entre la sumatoria de todos los elementos del conjunto y el número de elementos del conjunto [SPIEGEL,1996].

En el caso de la distribución de tamaños de partículas, se trata de una variable continua, no-discreta, por lo que el cálculo de la media aritmética debe hacerse mediante integración, siendo  $f$  la función de distribución según el caso.

$$\bar{X} = \int_{x_{\text{mín}}}^{x_{\text{máx}}} x \cdot f(x) dx \quad (3.70)$$

Para valores individuales la media geométrica se calcula como:

$$X_g = (\prod x_i)^{1/n} \quad (3.71)$$



Al aplicar logaritmos la expresión se reduce a

$$\text{Ln}(X_g) = (1/n) \cdot \sum \text{Ln}(X_i) \quad (3.72)$$

Si las partículas se agrupan por clases y la fracción perteneciente a cada clase es  $\Delta F$ , la media geométrica se calcula como:

$$\text{Ln}(X_g) = \sum \text{Ln}(X_i) \cdot \Delta F \quad (3.73)$$

Para variables continuas se tiene:

$$\text{Ln}(X_g) = \int_0^1 \text{Ln}(X) dF = \int_0^\infty \text{Ln}(X) f dX \quad (3.74)$$

### **3.3.5.2 Medidas de la variabilidad de una distribución.**

Las medidas de variabilidad de una distribución o su dispersión son el grado en que los datos numéricos tienden a extenderse alrededor de un valor medio, se necesitan para dar una descripción más completa de las principales características de una distribución o hacer posible una comparación efectiva entre dos o más distribuciones. Para el caso específico de las mezclas que poseen una distribución de tamaños estos parámetros permiten conocer con exactitud que tan dispersa es la muestra con respecto al tamaño promedio. En la tabla 3.4 se muestra una descripción de los parámetros de dispersión más importantes.

**Tabla 3.4:** Parámetros de dispersión. [PIERI Y SERRANO, 2000]

Parámetro	Símbolo	Fórmula	Descripción
Varianza	$\sigma^2$	$\frac{(\text{Suma}(X_i - \bar{X})^2)}{m-1}$	Promedio cuadrado de las distancias entre cada observación y la media del conjunto de observaciones.
Desviación Estándar Aritmética	$\sigma_a$	$\sqrt{\int (x - \bar{x})^2 \cdot f(x) dx}$	Indica que tan dispersos se encuentran los valores de un sistema de partículas con respecto a la media
Desviación Estándar geométrica	$\sigma_g$	$e^{\sqrt{\int (\ln(x) - \ln(\bar{x}))^2 \cdot f(x) dx}}$	
Coefficiente de Variación	CV	$\frac{\sigma_a}{\bar{x}} \times 100$	Expresa la magnitud de la dispersión de una variable aleatoria (desviación estándar) con respecto a su media aritmética, expresado como porcentaje.
Rango	$A_R$	$x_i - x_j$	Es la diferencia entre los valores máximo y mínimo de tamaño de partícula dentro de una distribución dada
Dispersión Aritmética	$S_{a,i/j}$	$\frac{x_i - x_j}{2}$	Expresa que tan alejados se encuentran los valores de la media
Dispersión Geométrica	$S_{g,i/j}$	$\sqrt{\frac{x_i}{x_j}}$	Es un valor adimensional. Es igual a 1 si la mezcla es monodispersa y en cualquier otro caso es diferente de 1

La varianza ( $\sigma^2$ ) de un conjunto de observaciones es la diferencia entre el valor de z y el valor promedio, elevada al cuadrado e integrada, ponderado con la

función de distribución. Si se tiene un conjunto de  $m$  elementos  $z_i$ , la varianza se puede expresar mediante la siguiente formula:

$$\sigma^2 = \int (z_i - \bar{X})^2 dF \quad (3.75)$$

La desviación estándar ( $\sigma$ ) corresponde a la raíz cuadrada positiva de la varianza. La misma se denomina según la media con la que se calcula (aritmética, geométrica, etc.). La definición general de la desviación estándar  $\sigma_{k,r}$  es:

$$[\mathbf{g}_k(\sigma_{k,r})]^p = \int_0^\infty [\mathbf{g}_k(z) - \mathbf{g}_k(\bar{x}_{k,r})]^p f_r dz = \int_0^1 [\mathbf{g}_k(z) - \mathbf{g}_k(\bar{x}_{k,r})]^p dF_r \quad (3.76)$$

$$\sigma_{k,r} = \mathbf{g}_k^{-1} \left( \sqrt{\int_0^\infty [\mathbf{g}_k(z) - \mathbf{g}_k(\bar{x}_{k,r})]^p f_r dz} \right) = \mathbf{g}_k^{-1} \left( \sqrt{\int_0^1 [\mathbf{g}_k(z) - \mathbf{g}_k(\bar{x}_{k,r})]^p dF_r} \right) \quad (3.77)$$

Para el caso particular de las desviaciones estándar aritmética ( $\sigma_a$ ) y geométrica ( $\sigma_g$ ), la ecuación general se convierte en:

$$\sigma_{a,r} = \sqrt{\int_0^\infty [z - \bar{x}_{a,r}]^p f_r dz} = \sqrt{\int_0^1 [z - \bar{x}_{k,r}]^p dF_r} \quad (3.78)$$

y

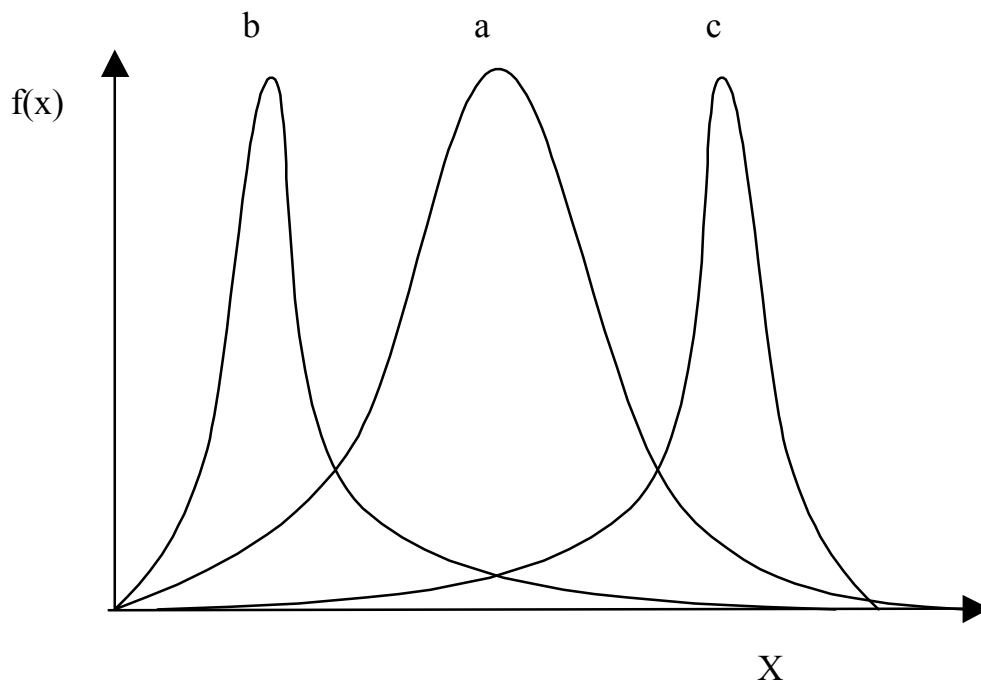
$$\ln(\sigma_{k,r}) = \sqrt{\int_0^\infty [z / \bar{x}_{k,r}]^p f_r dz} = \sqrt{\int_0^1 [z / \bar{x}_{k,r}]^p dF_r} \quad (3.79)$$

Con frecuencia una distribución no es simétrica con respecto a un máximo sino que tiene una “cola” más larga que otra. Si la cola se extiende hacia la derecha, se dice que está sesgada a la derecha, mientras que si la cola más larga se extiende a la izquierda, se dice que está sesgada a la izquierda. Las medidas que describen esta

simetría se denominan coeficiente de sesgo o sencillamente sesgo. Una de las medidas es:

$$\psi = \frac{\int_0^m (z - \bar{X})^3 * q(z) * dz}{\sigma^3} \quad (3.80)$$

Si  $\psi$  es negativa o positiva la distribución está sesgada a la izquierda o a la derecha respectivamente. Esto se observa en la figura 3.19, donde: a) distribución simétrica, b) distribución que posee asimetría negativa y c) distribución que posee asimetría positiva.



**Figura 3.19:**Curvas representativas de diferentes tipos de sesgo. [ARIAS Y UGAS, 1998]

La forma de la curva de distribución se estudia por medio de parámetros estadísticos, los cuales permiten evaluar que fracción de partículas presenta un tamaño inferior o superior al tamaño promedio definido. Estos parámetros de dispersión se muestran en la tabla 3.5 en donde se presenta la fórmula, símbolo, parámetro y descripción.

**Tabla 3.5:** Parámetros de asimetría [PIERI Y SERRANO,2000]

Parámetro	Símbolo	Fórmula	Descripción
Sesgo	$\gamma$	$\frac{\int_{x \min}^{x \max} (x - \bar{x})^3 \cdot f(x) dx}{\sigma_a^3}$	Expresa una medida de la asimetría de la distribución. Se dice que una distribución (f(x)) con una cola más larga hacia el lado derecho, se encuentra sesgada hacia la derecha o presenta sesgo positivo. Análogamente se define para una curva de sesgo negativo (f''' (x)) o una simétrica de sesgo nulo (f'' (x)) (Ver figura N°3.19).
Asimetría aritmética	$a_{a,i/j}$	$\frac{(x_i - x_{50}) - (x_{50} - x_j)}{(x_i - x_{50})}$	Compara los tamaños de dos segmentos de la curva de distribución, sin tomar en cuenta el resto de la distribución
Grado de asimetría aritmética	$A_{a,i/j}$	$\frac{x_i - x_{50}}{x_{50} - x_j}$	Divide las diferencia una entre otra. Es igual a 1 para curvas simétricas, >1 para curvas sesgadas hacia los gruesos, < 1 para curvas sesgadas hacia los finos
Asimetría geométrica	$a_{g,i/j}$	$\frac{\frac{x_i}{x_{50}} - \frac{x_{50}}{x_j}}{\frac{x_i}{x_j} - 1}$	Usa los coeficientes entre dos puntos de la curva de distribución
Grado de asimetría geométrica	$A_{g,i/j}$	$\frac{\frac{x_i}{x_{50}}}{\frac{x_{50}}{x_j}}$	Divide los cocientes uno entre otro. Cumple con las mismas propiedades de la asimetría aritmética

#### 4 ANTECEDENTES

Siguiendo con la línea de investigación en el campo de los lodos de perforación petrolera del LSM-UCV, este trabajo se realiza con el fin de conocer y profundizar sobre el efecto de la distribución del tamaño de partículas en las características de revoques formados a partir de lodos de perforación de base agua que utilizan como material sellante Carbonato de Calcio.

Glenn y Slusser presentaron en 1957 sus estudios en relación con los factores que afectan la productividad de los pozos. Por un lado estudiaron el proceso de filtración de lodos de perforación y por el otro el efecto de la invasión de partículas en la filtración.

En la primera parte llegaron a la conclusión de que el proceso de filtración se realiza en tres etapas: un período de pérdida súbita, donde ocurre la pérdida del filtrado a alta velocidad en comparación con las etapas siguientes; 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 que obtuvieron en esta etapa fue que las partículas de lodo forman puentes en los poros de la formación en la primera etapa de la filtración y que la formación del revoque ocurre durante las etapas subsiguientes; además de que la pérdida de filtrado aumenta con la permeabilidad y la presión diferencial.

Sorrentino, 1998, inicia el estudio del efecto de los parámetros estadísticos de la distribución del tamaño de las partículas sobre la resistencia específica y la porosidad de la torta, concluyendo que variaciones leves en este parámetro pueden ocasionar cambios importantes tanto en la permeabilidad como en la porosidad de la torta de filtración. Parte de los resultados se encuentran reportados en el informe titulado Estudio de la formación de revoques de fluidos de perforación con sólidos de distintas granulometrías.

Luego de la presentación de dicho informe, en el laboratorio de Separaciones Mecánicas de la UCV se han venido realizando diferentes estudios relacionados con la formación y caracterización de revoques.

García y Gimón, 1999, estudiaron el efecto sobre las características del revoque tales como la permeabilidad, la porosidad, la movilidad y la compresibilidad mediante la adición de partículas finas utilizando como material sellante Carbonato de Calcio de diferentes granulometrías. Este trabajo se centró principalmente en la adición de partículas finas a partir de Carbonato de Calcio grados 20-25 y 40-45 como base, constituyendo mezclas en las cuales dos de ellas contenían menor porcentaje de partículas finas que la base y otras dos con un porcentaje mayor, para hacer un total de cuatro mezclas para cada base, variando las diferencias de presión durante la filtración.

Los resultados obtenidos en este trabajo no mostraron resultados concluyentes en cuanto a la porosidad de los revoques formados, ya que presentaron gran dispersión entre ellos a medida que el porcentaje de partículas finas aumentaba. Esta dispersión pudo ser causada debido a que no se tuvo un control riguroso del pH en la formulación de los lodos, como también el control de la temperatura durante el proceso de filtración. Sin embargo aporta a este trabajo las siguientes conclusiones:

- La porosidad, la permeabilidad y movilidad de los revoques formados disminuyen a medida que aumenta la diferencia de presión utilizada para la formación de los mismos, por lo tanto en este trabajo la diferencia de presión se mantiene constante para poder observar el efecto que produce el cambio de la granulometría en las características del revoque.
- Los revoques formados son delgados, irregulares y compresibles.
- La resistencia del medio filtrante empleado aumenta con la diferencia de presión de 100 a 300psi, 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. Debido a este hecho el presente trabajo estudia el efecto que en esta etapa tiene los cambios de granulometría

Pessolano, 2000, estudió la caracterización en la etapa inicial de formación de revoques controlando la temperatura y el pH en la formulación de los lodos, tomando como base Carbonato de Calcio Intecarb grados 20-25 y 40-45, sin embargo las mezclas obtenidas con la base 40-45 no arrojaron resultados satisfactorios por lo que decidió no utilizarla en las pruebas.

Pessolano concluyó en su trabajo que al transcurrir el tiempo de filtración la superficie del revoque tiende a ser lisa, por lo cual, el revoque durante su evolución topológica tiende a minimizar las irregularidades que presenta la superficie del medio filtrante, y cuando estas irregularidades se eliminan se dice que termina la etapa incipiente. Al incrementar la temperatura de filtración el volumen de filtrado aumenta a pesar que la etapa incipiente no se ve afectada. Además comprobó que el tiempo de maduración del pseudo-lodo afecta de manera notoria al tiempo incipiente y al volumen de filtrado, ya que cuando se incrementa el tiempo de maduración se incrementa el tiempo incipiente, lo que afecta directamente la viscosidad de la goma Xhantana utilizada como viscosificante. Los aportes más importantes del trabajo realizado por Pessolano está el control estricto del pH y la temperatura, al igual que el tiempo de maduración del pseudo lodo para evitar variaciones diferentes a las causadas por el cambio de granulometría empleada

Hernández y Hernández, 2001, estudiaron el efecto de la adición de partículas finas a las características del revoque (porosidad, permeabilidad, movilidad), trabajando con Carbonato de Calcio Intecarb grados 20-25 y 40-45, a diferencia del trabajo realizado por García y Gimón, Hernández y Hernández mantuvieron control sobre el pH y la temperatura de filtración. Entre sus resultados más importantes podemos mencionar:



- La porosidad y la permeabilidad no presentan tendencias claras que permitan algún tipo de predicción en su comportamiento al aumentar el porcentaje de partículas finas a la granulometría base 20-25, sin embargo la movilidad presenta una disminución clara a medida que este porcentaje aumenta entre valores de 4,1% y 6,9%, para porcentajes mayores la movilidad disminuye.
- Para las mezclas realizadas utilizando la granulometría base 40-45, la porosidad disminuye a medida que el porcentaje de partículas finas aumenta entre 1,3% y 11,7%, para la movilidad esta disminuye al aumentar el contenido de partículas finas entre 1,26% y 7,95%, aumentado para porcentajes mayores de 7,95%, y la permeabilidad no presenta tendencia clara a medida que se aumenta el porcentaje de partículas finas entre 1,3% y 11,7%.

El trabajo realizado por Hernández y Hernández permite decir que los cambios de granulometría no afectan la permeabilidad del revoque ya que no permite establecer una tendencia clara, no ocurriendo lo mismo con la porosidad y la movilidad la cual en el presente trabajo puede verse afectada de manera similar disminuyendo frente a cambios en la cantidad de partículas finas contenidas en el pseudo lodo.

Sorrentino,1998, introduce 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. 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.
- 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.

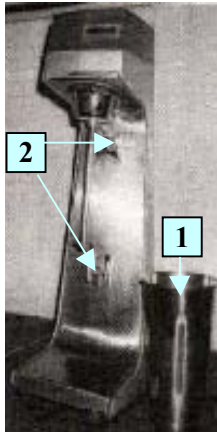
- Se introduce el uso de un nuevo método de análisis de los datos de la filtración con la finalidad de poder determinar los valores de los parámetros de formación del revoque: Permeabilidad, porosidad, movilidad.

El aporte más importante es la aplicación de un nuevo método de análisis de la curva de filtrado que permitirá obtener resultados con menor dispersión al no introducir la altura de revoque experimental ya que es fuente de incertidumbre en los cálculos.

Estos trabajos han servido de base para el presente estudio ya que se plantea la realización del análisis del proceso de formación de revoques mediante el uso de condiciones controladas de pH, presión, etc, así como también se busca caracterizar las distintas etapas de la formación del revoque mediante el uso del método de análisis de los datos de filtración planteado por Sorrentino.

## 5. EQUIPO EXPERIMENTAL

### 5.1 Agitadores



(A)

Al preparar un fluido de perforación, se debe mantener una elevada agitación para lograr mezclar el viscosificante con el agua, permitiendo que éste cumpla con sus funciones en el fluido de perforación.

El agitador MONOMIXER es el equipo que se muestra en la Figura 5.1 (A), tiene tres velocidades, mantiene la agitación constante sin calentarse y permite cumplir con los tiempos de agitación, los cuales son importantes en la formulación del fluido de perforación. Este equipo posee un vaso metálico (1) que al colocarlo sobre el soporte del agitador (2) acciona el motor del equipo. De las tres velocidades que tiene este aparato se utiliza la menor (L) para la agitación del agua más el viscosificante y para la agitación del lodo se utiliza la mayor (H).



Figura 5.1 Agitadores

En la formulación del fluido de perforación, se deben eliminar totalmente las burbujas generadas por la fuerte agitación, para ello se deben disminuir las revoluciones, por lo que se emplea el agitador de baja revolución Figura 5.1 (B), el mismo tiene una perilla (3) que permite regular la intensidad de agitación.

En ambos agitadores se utiliza un potencial de 110 voltios y son de fácil manipulación.

Partes de los equipos:

- 1 Vaso Metálico
- 2 Soporte del vaso
- 3 Perilla para regular la agitación

## 5.2 Analizador de tamaño de partículas. MASTERSIZER-2000

El equipo Mastersizer-2000 se basa en la técnica de difracción láser, y permite el análisis de tamaños de partículas en un rango de 0,2 a 2000  $\mu\text{m}$ .

El equipo está constituido básicamente por tres partes, tal como se puede observar en la figura 5.2, las cuales serán descritas a continuación:

- Una unidad óptica (1), encargada de generar y recolectar la información de la muestra estudiada para medir tamaño de partículas. La unidad está conformada de: una celda de tipo húmeda que se desempeña como porta muestra durante la medición, con unos dispositivos de protección, un desagüe para drenar el líquido que es introducido a la celda, un indicador de poder y un panel donde se encuentran las salidas digitales de la misma.
- Accesorios de dispersión (2), encargados de preparar y entregar la muestra a la unidad óptica para su medición.
- Un computador (3), el cual contiene un software determinado, y que sirve para el control del sistema mientras se lleva a cabo la medición y procesa la información para determinar la distribución de tamaño de partículas.

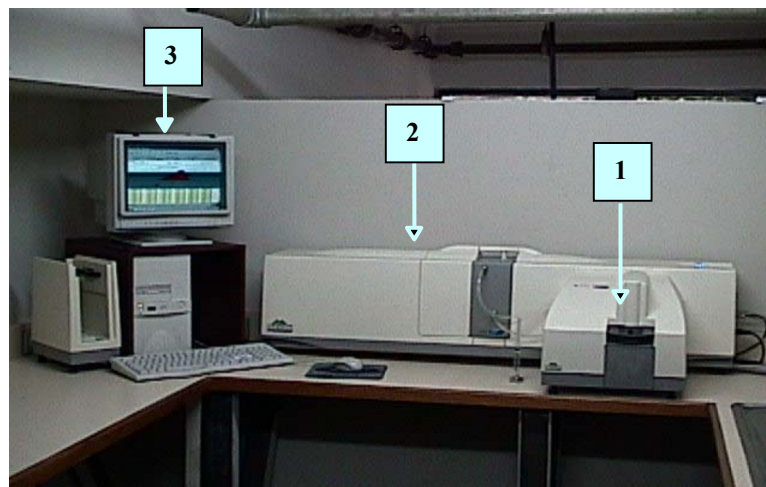


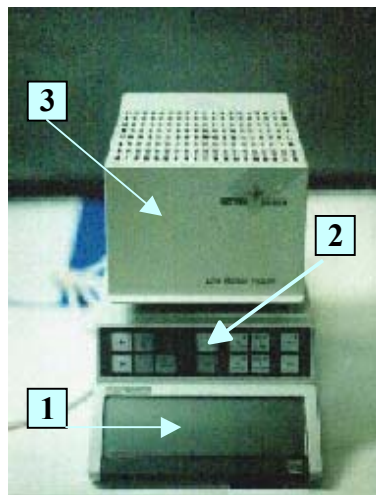
Figura 5.2: Analizador de tamaño de partícula. Mastersizer-2000

### 5.3 Balanza con desecador infrarrojo

La balanza digital con desecador infrarrojo (Figura 5.3), es utilizada para determinar el contenido de humedad de una muestra y la masa de la misma. Este equipo permite que el revoque se seque de manera uniforme a una temperatura constante. El error de apreciación de la balanza es 0.001 g.

Los elementos de mando del equipo son: la tecla de mando de la balanza (1) la cual permite encender o apagar la pantalla donde se visualiza la masa y los valores que pueden ser programados, tal como el tiempo y la temperatura; el teclado del desecador (2), el cual tiene teclas que permiten ajustar los valores de temperatura y tiempo de secado. Además de los elementos de mando, tiene una unidad de desecación (3), la cual posee una tapa y un platillo de aluminio que sirve como porta muestra.

La balanza posee una interfase que le permite reportar, en una hoja de cálculo (EXCEL) y en el intervalo de tiempo deseado, los valores correspondientes a la masa medida.



Partes del equipo:

- 1 Tecla de mando de la balanza
- 2 Teclado del desecador
- 3 Unidad de desecación

Figura 5.3. Balanza con desecador infrarrojo

#### 5.4 Clasificador centrífugo

El clasificador centrífugo (Figura 5.4) consta de una sección de descarga para la alimentación (❶), un interruptor para el clasificador (❷), un rotámetro (❸), una unidad de alimentación (❹) con un interruptor (❺) que a su vez posee una perilla para regular la alimentación (❻), un recipiente colector para las partículas finas (❼) y uno para las gruesas (❽), un filtro pequeño, un ciclón (❾), un silenciador (❿), un ventilador con un interruptor (⓫), un indicador de velocidad del clasificador (⓬) y un panel de control (⓭) donde se encuentra el interruptor principal (⓮).

La alimentación se sitúa en el recipiente (❶), la misma se añade lentamente a la sección de descarga (❶), donde se lleva a cabo el proceso de separación mediante la aplicación de una fuerza centrífuga y un flujo de aire. Las partículas más finas son recogidas en el recipiente (❼) y las restantes en el recipiente (❽).

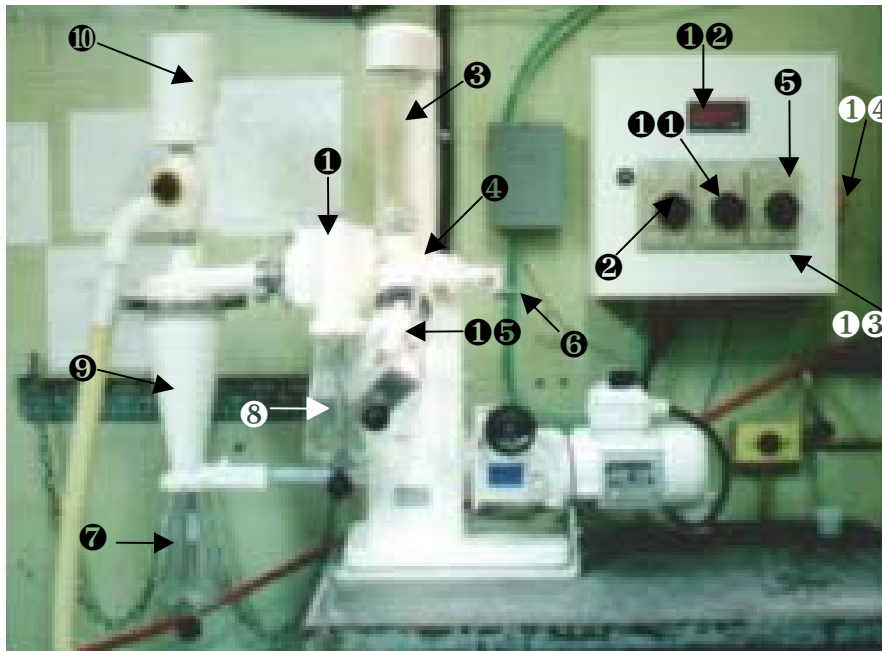
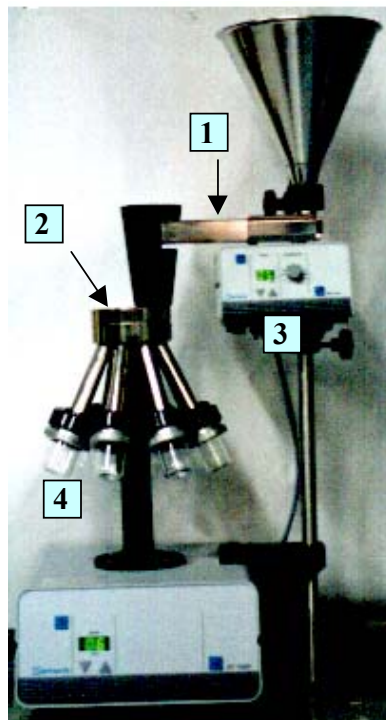


Figura 5.4 Clasificador Centrífugo.

## 5.5 Divisor de muestras tipo PT-1000

El divisor de muestras PT 1000 (Figura 5.5) es apropiado para la división representativa y la toma de muestras de productos dispersos, susceptibles a corrimiento con granulometría de carga de hasta un máximo de. 6 mm y la cantidad de carga máxima 4000 cm<sup>3</sup> (8 botellas para polvo de 500 cm<sup>3</sup> cada una).

El equipo consta de una corona divisora (2) la cual gira y divide el material de muestra durante un tiempo previamente predeterminado; de un aparato dosificador DR 100/40 (1), que es necesario en la división de la muestra, para que la misma sea alimentada a (2) de manera homogénea, además de recipientes colectores, los cuales pueden ser botellas para polvo de 250 o 500 ml y vasos de cristal de 50 ml.



Partes del equipo:

1. Dosificador de la alimentación
2. Corona divisora
3. Controlador.
4. Vasos de cristal de 50 ml

Figura 5.5 Divisor de muestras tipo PT-1000



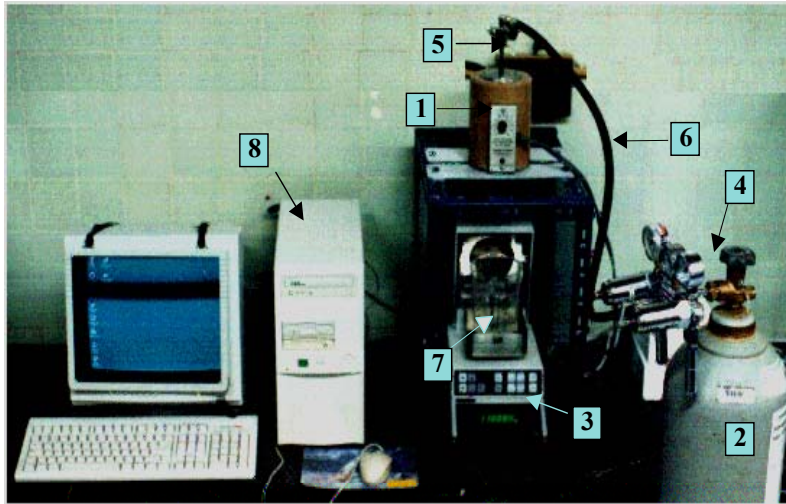
## 5.6 Equipo de filtración estática: celda HPHT

El equipo de filtración estática (Figura 5.6) consta principalmente, de una celda de filtración para alta presión y alta temperatura (HPHT) y la misma se encuentra dentro de una camisa de calentamiento (1). Para inyectar presión a la celda se emplea una bombona de nitrógeno (2). Adicionalmente, se tiene una balanza digital (3).

La bombona debe tener una presión mínima de 700 psi. Se cuenta con un manómetro que indica la presión de la bombona y otro que permite regular la presión de trabajo, a través de una válvula de aguja (4).

El conector de la manguera (5), tiene una válvula con tela metálica la cual resiste presiones superiores a 800 psi (6).de purga para liberar presión y poder extraer la celda. La manguera es de goma, recubierta La masa de filtrado que sale por la parte inferior de la celda, se recoge en un beaker (7) colocado sobre la balanza digital.

La balanza registra la masa de filtrado en cada instante de tiempo y tiene un error de apreciación de  $\pm 0,001$  g, la misma es Metler Toledo del tipo desecadores infrarrojos LJ16. Los valores registrados por la balanza, son pasados al computador (8), el cual contiene el programa Balancelink.

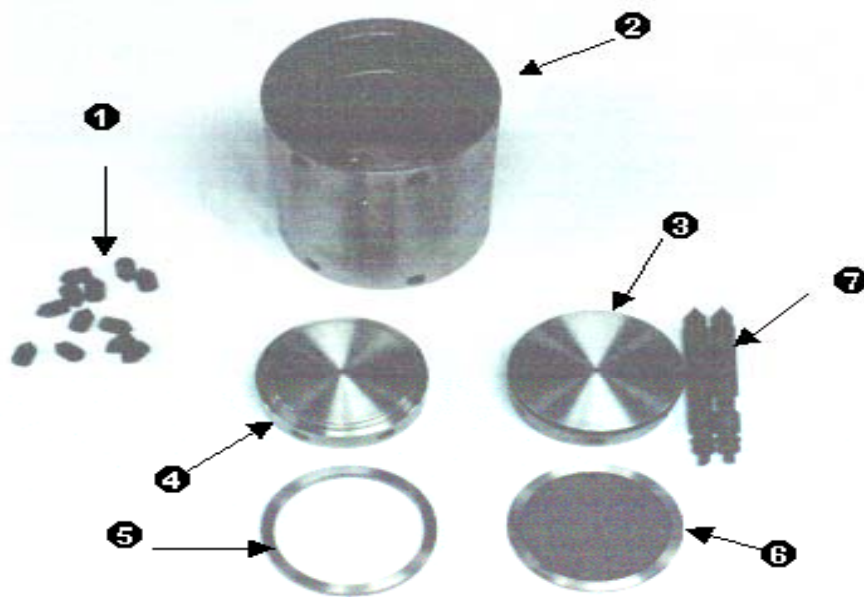


- (1) Camisa de Calentamiento
- (2) Bombona de Nitrógeno
- (3) Balanza con secador infrarrojo
- (4) Regulador de presión
- (5) Conector
- (6) Manguera
- (7) Colector de filtrado
- (8) Computadora

**Figura 5.6 Equipo de filtración estática**

La celda de filtración (Figura 5.7) está formada por doce pernos (❶), el cuerpo (❷), la tapa superior (❸), la tapa inferior (❹), un aro (❺) utilizado como soporte de la tapa superior cuando no se utilizan discos de cerámica, una rejilla (❻) y dos válvulas vástagos con sus respectivas empaaduras (❼).

En esta celda se emplea papel de filtro como medio filtrante. Esta celda puede también ser usada para discos de cerámica y posee un espacio mayor, en la parte superior, para el disco. También permite la realización de los experimentos de permeación, ya que hace posible vaciar el lodo de la celda y llenar la celda con agua (u otro líquido) libre de sólidos.



**Partes del equipo:**

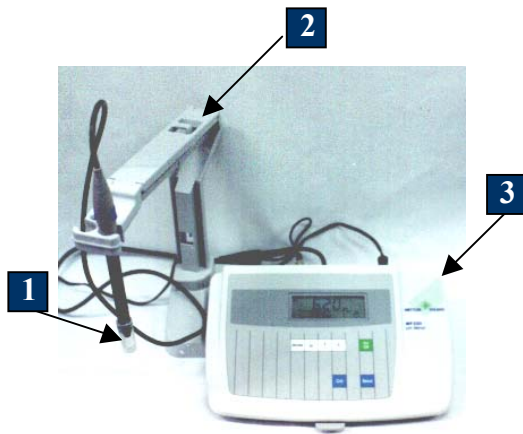
- |                      |                   |
|----------------------|-------------------|
| 1 Pernos             | 5 Aro             |
| 2 Celda de dos bocas | 6 Rejilla         |
| 3 Tapa superior      | 7 Válvula vástago |
| 4 Tapa inferior      |                   |

**Figura 5.7 Celda de filtración HPHT**

## 5.7 Medidor de pH

El medidor de pH MP220/225 se muestra en la figura 5.8, el mismo es necesario para alcanzar las condiciones óptimas, tanto en el agua como en el agua con viscosificante, para que el viscosificante (un polímero orgánico) cumpla su función principal, la cual es mantener las partículas de carbonato en suspensión hasta que se lleve a cabo la filtración del lodo. El medidor de pH consta de un electrodo de vidrio (1), una base para el electrodo (2) y un panel (3) que permitirá ejecutar las diversas funciones del medidor de pH.

El medidor de pH permite medir el valor del pH de una solución, la conductividad y la temperatura de la misma. Tiene una interfase para computadoras o impresoras y es de fácil calibración.



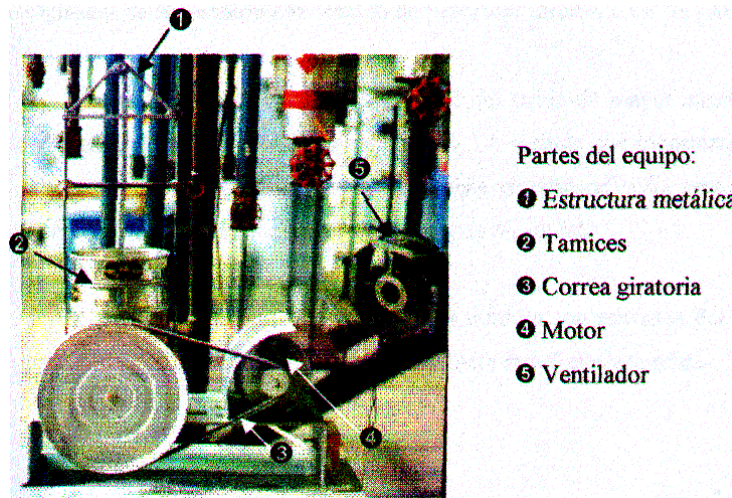
- Partes del equipo:
- 1 Electrodo de vidrio
  - 2 Base del electrodo
  - 3 Panel de control

**Figura 5.8 Medidor de pH**

## 5.8 Tamizador vibrante. (vía seca)

El tamizador se observa en la figura 5.9, el mismo consta de una estructura de hierro (1) la cual sirve de soporte a los tamices; tres tamices (2) utilizados para separar las partículas de diferentes tamaños, una correa giratoria (3), un motor (4), un ventilador (5) y un recipiente colector, donde es depositado el carbonato que será posteriormente clasificado utilizando el clasificador centrífugo.

La correa giratoria (3), la cual está conectada al motor (4) hace que vibre la estructura de hierro (1) junto con los tamices (2). Al vibrar la estructura y los tamices, la muestra va descendiendo, quedando en cada tamiz las partículas que no fueron capaces de pasar a través del mismo. Por último, se desechan las partículas contenidas en los tamices (estos tamices son de 45, 60 y 100 mesh) y la muestra recogida en la bandeja recolectora es guardada para un posterior tratamiento.



**Figura 5.9 Tamizador vibrante (Vía seca).**

### **5.9 Tamizador vibrante. (vía húmeda).**

El tamizador vibrante (vía húmeda) mostrado en la Figura 5.10, se utiliza para obtener 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 un motor (2) y un soporte (3).

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

El agua se alimenta por el tope de los tamices, a través de una manguera (7), y fluye a través de estos por gravedad a un caudal que debe ser ajustado previamente. 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 fijan 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), a través del cual se desplaza el agua al exterior con la ayuda de otra manguera (12) luego de pasar por la torre de tamices.



- 1 Base metálica
- 2 Motor
- 3 Soporte
- 4 Carcasa metálica
- 5 Contador de tiempo
- 6 Brazo
- 7 y 12 mangueras
- 8 Tamices
- 9 Seguros
- 10 Plato asegurador
- 11 Plato de desagüe

**Figura 5.10: Tamizador vibrante (vía húmeda)**

### **5.10 Tornillo micrométrico**

La determinación de la altura en los revoques se puede hacer a partir del tornillo micrométrico. Este equipo consiste de un vástago que se desliza verticalmente, una pantalla digital donde se lee el valor de la altura de acuerdo a la posición del vástago y un tornillo, que sirve para ajustar el vástago en la superficie del revoque. La calibración se lleva a cabo ajustando a cero la lectura de la pantalla, con la ayuda de un botón de calibración.

El deslizamiento del vástago debe ser suave para impedir que se pierda la calibración realizada para el papel de filtro o disco. El error de apreciación del equipo es de  $\pm 0,01\text{mm}$ .

## **6. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.**

Para alcanzar los objetivos propuestos en este trabajo es necesario llevar a cabo una serie de pruebas experimentales, para lo cual es necesario emplear la siguiente metodología:

### **6.1 Tamizado por vía seca.**

El tamizado por vía seca tiene como finalidad separar las partículas más gruesas de una muestra de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), permitiendo obtener partículas menores de 125  $\mu\text{m}$ . Además, representa una medida de seguridad para evitar el taponamiento de los tamices de menor abertura de la malla, los cuales son usados durante la operación de tamizado por vía húmeda. Los pasos a seguir son los siguientes:

- 1) Se toma un recipiente limpio y seco, y se pesan de 200 a 250 g. de una muestra de carbonato de calcio.
- 2) Ordenar los tamices en el tamizador (en forma vertical), de tal manera que el tamiz superior tenga mayor abertura de malla y el inferior menor abertura de malla, el orden de dichos tamices es: primero el de 45 mesh, luego el de 60 mesh y por último, la bandeja recolectora.
- 3) Colocar el grupo de tamices en Vibrador y colocar la Tapa de seguridad para evitar que los tamices se salgan del equipo.
- 4) Colocar la muestra sobre el tamiz superior y poner en funcionamiento el tamizador por un período de tiempo de 3 a 5 minutos aproximadamente.
- 5) Apagar el tamizador, se retira la tapa de seguridad y se extrae el contenido de los tamices y se coloca en un saco para luego ser enviado a molienda.
- 6) Retirar lo que queda en el último recipiente y almacenarlo para luego ser separado en fracciones finas y gruesas por vía centrífuga.



7) Proceder a limpiar los tamices usando aire a presión.

## **6.2 Tamizado por vía húmeda.**

La operación de tamizado por vía húmeda se realiza con el fin de obtener fracciones de granulometría estrecha, separando la muestra de Carbonato de Calcio en tamaños mayores a 38  $\mu\text{m}$ , 45  $\mu\text{m}$ , 53  $\mu\text{m}$ , 63  $\mu\text{m}$ , 75  $\mu\text{m}$ , 90  $\mu\text{m}$ , 106  $\mu\text{m}$  y 125  $\mu\text{m}$ . Los pasos a seguir son los siguientes:

- 1) Se pesan 500 gr de una muestra de Carbonato de Calcio.
- 2) Se ordena en forma creciente la columna de tamices a utilizar, de tal manera que el tamiz superior sea el de mayor abertura de malla y el inferior sea el de menor abertura de malla.
- 3) Se coloca el fondo y se suministra manualmente la alimentación por el tamiz superior antes de colocar la tapa.
- 4) Se coloca la columna sobre la tamizadora y se coloca el cabezal de sujeción.
- 5) Se afloja al máximo los cierres de sujeción rápida de la parte superior del cabezal y se desliza hasta hacer contacto con la tapa de la columna.
- 6) Se ajustan los cierres de sujeción rápida situados lateralmente en el cabezal y se procede al ajuste firme de la columna apretando los cierres de sujeción superiores.
- 7) Se oprime la tecla "Pulsed".
- 8) Se regula el tiempo requerido para el tamizado mediante los pulsadores "+/-".
- 9) Antes de poner en marcha el tamizador oprimiendo el pulsador ON, asegúrese que el valor de amplitud este en el nivel 1.

- 10) Se oprime el pulsador ON y se regula la amplitud (nivel de potencia) requerida para el tamizado mediante los pulsadores “+/-”.
- 11) Para tamizar en húmedo, lleve la amplitud a nivel 4.
- 12) Ajuste el caudal de agua requerido y lleve la amplitud a nivel 5.
- 13) Un minuto antes de cumplirse el tiempo estipulado corte el suministro de agua, con el fin de vaciar los tamices.
- 14) Se apaga el tamizador y se retiran los tamices, luego se extraen las muestras presentes en cada uno de ellos lavándolos con suficiente agua. Las muestras extraídas se envasan en recipientes identificados.
- 15) Las distintas muestras recolectadas se colocan en la estufa a una temperatura de 50<sup>0</sup>C y se retiran al día siguiente.

### **6.3 Clasificador Centrifugo.**

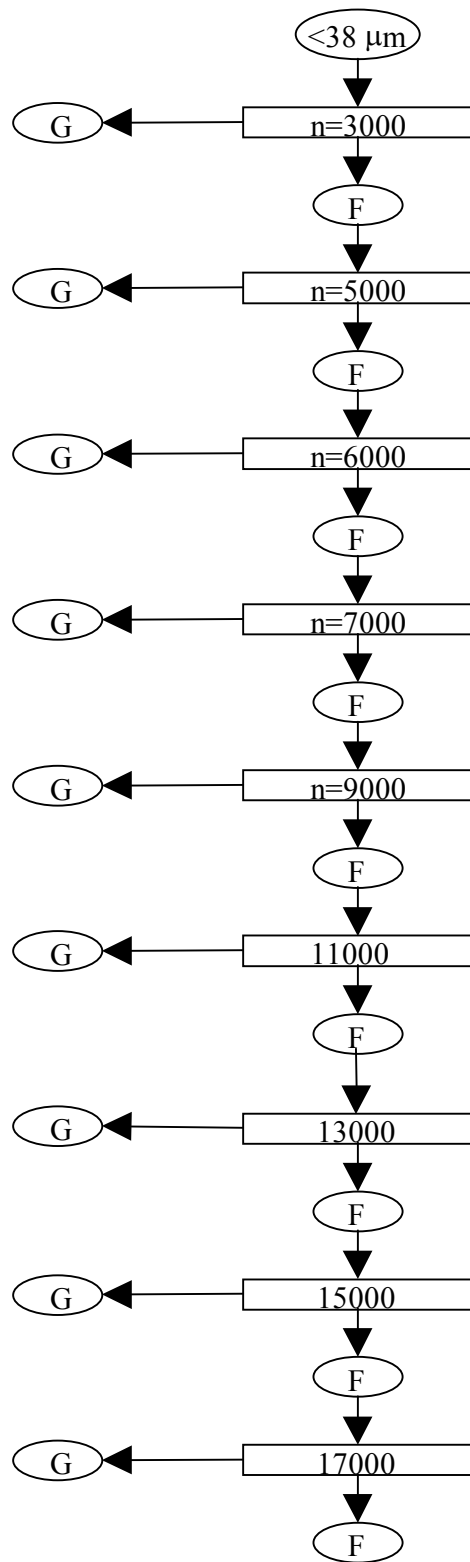
El clasificador centrífugo es un equipo que permite clasificar en fracciones de diferentes tamaños, muestras de carbonato de calcio con un tamaño menor a 38  $\mu\text{m}$ .

Este sistema de clasificación es análogo a la técnica de tamizado, y el procedimiento de operación del equipo es el siguiente:

- 1) Poner en funcionamiento la consola de control.
- 2) Verificar que todo el equipo se encuentra limpio, de lo contrario proceda a limpiarlo siguiendo el procedimiento que se muestra al final.
- 3) A través de la figura N°11, se obtiene la velocidad de rotación de manera secuencial con los que se operará el equipo, según la muestra a ser clasificada.

- 4) Con la fórmula anexa en la figura N°11, se determina el caudal volumétrico de aire necesario, para las revoluciones dadas previamente, con el cual se pondrá en funcionamiento el ventilador.
- 5) Llenar el recipiente de alimentación con carbonato de calcio y acoplarlo al equipo. Igualmente acoplar los recipientes receptores de finos (F) y gruesos (G).
- 6) Girar los interruptores B y M1, correspondientes al clasificador y al soplador.
- 7) Ajustar la altura del rotámetro, correspondiente al flujo de aire necesario para lograr la separación deseada, utilizando los valores obtenidos con la ecuación correspondiente o los valores tabulados en el procedimiento del Laboratorio.
- 8) Regular las Revoluciones por minuto necesarias para obtener la clasificación deseada. Comenzando con 3000 rpm, de donde se obtienen los gruesos que se van a tamizar por vía húmeda y los finos que se reclasificarán desde 5000rpm hasta llegar a 17000rpm, para obtener las fracciones estrechas de finos.
- 9) Iniciar la clasificación de la muestra haciendo girar el “tornillo sinfin” que permite el paso de la misma al sistema de clasificación. Para ello conecte el enchufe de alimentación eléctrica al motor del alimentación.
- 10) Verificar que la alimentación de muestra es constante, de lo contrario, proceda a ayudar al descenso de la muestra mediante el golpeteo suave del recipiente de alimentación.
- 11) Una vez separada la muestra alimentada, bajar las revoluciones a 0 rpm, apagar el interruptor.
- 12) Cerrar el flujo de aire, apagar el soplador.
- 13) Descargar el envase receptor de las Partículas Gruesas (G) a un recipiente de almacenamiento, identificándolo con los Datos de la muestra obtenida.

- 14) Descargar el envase receptor de las Partículas Finas (F) a un recipiente de almacenamiento, identificándolo con los Datos de la muestra obtenida.
- 15) Limpiar el equipo con la aspiradora, hasta garantizar que esté libre de partículas sólidas su interior.
- 16) Posteriormente, se acopla el recipiente receptor de los Finos (F) en la alimentación del equipo y se procede de forma análoga a lo expuesto anteriormente.
- 17) Cada vez que se desee cambiar las revoluciones y al terminar de clasificar, se debe limpiar el equipo.



$$\dot{V} = 55 - \frac{n}{1000} \left( \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right)$$

**Figura N°6.1: Clasificación ascendente del Aero-Clasificador**

#### **6.4 Uso del Divisor de Muestras PT 1000.**

- 1) Acoplar la botella para el polvo sobre el adaptador y girarla a la izquierda hasta que la misma se desplace hacia adentro.
- 2) Ajustar bien la botella para el polvo girando hacia la derecha.
- 3) Activar el interruptor principal, el cual se encuentra en parte posterior del PT 1000.
- 4) Ajustar el tiempo de marcha requerido, que se indicará en el recuadro *time*,
- 5) Presionar el botón *start*.
- 6) Al poner en servicio el PT 1000, activar el dosificador de alimentación.
- 7) Ajustar el dosificador a servicio permanente (debe aparecer en el recuadro *time*, el símbolo [--]) ya que el PT 1000 se encarga de la temporización.
- 8) Llenar la tolva de carga del dosificador.
- 9) Arrancar el PT 1000 y ajustar el potenciómetro “amplitud” a la velocidad de dosificación deseada.

#### **6.5 Uso del Desecador de Infrarrojo.**

- 1) Conectar la balanza analítica al desecador y activar el mismo.
- 2) Pulsar la tecla de duración de desecación en el teclado del desecador.
- 3) Ajustar el tiempo del desecador en auto. Pulsar la tecla *enter*.
- 4) Pulsar la tecla de temperatura de desecación.

- 5) Ajustar la temperatura de desecación en 70°C. Pulsar la tecla *enter*.
- 6) Abrir la tapa del desecador.
- 7) Poner el plato de aluminio sobre el soporte del platillo.
- 8) Tarar la balanza.
- 9) Colocar el revoque formado en el desecador, luego de haberlo permeado.
- 10) Cerrar el desecador.
- 11) Pulsar la tecla *start*.
- 12) Esperar a que la luz de la balanza titile, retirar el revoque del desecador y anotar la masa.

#### **6.6 Uso del Tornillo micrométrico.**

El tornillo micrométrico es utilizado para determinar la altura del revoque.

- 1) Colocar el vástago en la posición cerrado y calibrar en cero la pantalla digital, apretando el botón de calibración
- 2) Colocar en el soporte del tornillo micrométrico, el revoque más el papel de filtro
- 3) Girar el tornillo hasta tocar la superficie del revoque, luego girar el tornillo de ajuste, hasta tener un valor fijo en la pantalla, anotar dicha medida de altura.
- 4) Repetir este procedimiento en ocho puntos diferentes del revoque.

## 6.7 Preparación del Fluido de Perforación.

El Fluido de perforación es un pseudo-lodo base agua, puesto que contiene agua, viscosificante (goma Xhantana) y Carbonato de Calcio Intecarb Grados 10-15 o 30-35. El procedimiento para su elaboración se describe a continuación:

- 1) Verificar la Calibración del Phimetro:
- 2) Encender el Phimetro.
- 3) Presionar CAL
- 4) Colocar el electrodo en la solución Buffer correspondiente (PH=7.00).
- 5) Presionar CAL.
- 6) Cuando se estabilize la lectura (aparece en la pantalla  $\sqrt{A}$ ), Lavar el electrodo y secarlo con una servilleta (Blanca).
- 7) Introducir el electrodo en la Solución Buffer de pH = 4.00, presionar CAL y esperar a que se estabilice la lectura.
- 8) Lavar el electrodo y secarlo y medir el PH de la solución de pH=10.00. Esperar hasta que la lectura se estabiliza (debe ser  $10.00 \pm 2\%$  de error)
- 9) Colocar un Beacker de 500ml en la Balanza y pesarlo vacío.
- 10) Pesar 338.00gr de Agua Destilada.
- 11) Medir el pH y la Temperatura del Agua. Registrar este valor.
- 12) Colocar en el Agitador de baja revolución. Preferiblemente utilizar el aspa de paleta para líquidos viscosos.
- 13) Pesar 2.000gr de Viscosificante (Goma Xhantana.)



- 14) Colocar el agitador en Posición 4.
- 15) Añadir el viscosificante al agua lentamente, de forma tal que caiga justo en el borde del vórtice que se forma en el agua.
- 16) Una vez finalizada la adición del viscosificante, dejar en agitación durante cinco (05) minutos.
- 17) Al finalizar este tiempo, apagar el agitador y dejar en reposo por veinte (20) minutos.
- 18) Medir el pH y la Temperatura de la mezcla de viscosificante y agua. Registrar este valor.
- 19) Agregar KOH 0.5N a la solución de agua viscosificante, de gota en gota, con agitación constante. Apague el agitador y mida el pH y la temperatura.
- 20) Continuar con la adición de KOH 0.5N hasta alcanzar una lectura de PH de 9.50  $\pm 0.05$ .
- 21) Registrar el valor de pH y Temperatura obtenido.
- 22) Pesar en una Balanza 30.000gr de Carbonato de Calcio Intecarb Grado 10-15 o 30-35 según sea el caso.
- 23) Añadir lentamente el Carbonato de Calcio a la mezcla de emulsificante y agua, manteniendo una agitación constante con el agitador en posición 5-7. Tratar de añadir el Carbonato lentamente para evitar que la mezcla se apelozone o aglomere.
- 24) Si se observa la formación de espuma, sin detener la agitación, agregar una gota de antiespumante.
- 25) Al finalizar la adición de Carbonato, cambiar la mezcla al recipiente de metal.

- 26) Colocar el envase de metal en el agitador de altas Revoluciones Monomixer (Hamilton), colocar el agitador en la posición LOW. Agitar por quince (15) minutos.
- 27) Medir el PH y la Temperatura del Lodo de Perforación. Registrar estos valores.
- 28) Cambiar la mezcla de Lodo de perforación para un envase de vidrio limpio con tapa.
- 29) Dejar en reposo por 24 horas. Identificar adecuadamente el frasco con el lodo preparado, anotando la hora de inicio del proceso de maduración.
- 30) Lavar el electrodo del pHmetro y apagarlo, colocarle el protector al electrodo.
- 31) Lavar y secar todos los utensilios de trabajo utilizados.
- 32) Guardar todo el material en las Gavetas correspondientes dentro del laboratorio de Separaciones Mecánicas.

## **6.8 Resistencia del medio limpio**

Esta prueba permite cuantificar el valor de la resistencia del medio filtrante limpio, los pasos a seguir se describen a continuación.

- 1) Encender la camisa de calentamiento, y colocar el lector de temperatura.
- 2) Ensamblar la parte inferior de la celda, para ello se debe colocar el medio filtrante, colocando primero el papel de filtro, luego la rejilla y finalmente la goma.
- 3) Asegurar la tapa de la celda con los pernos.
- 4) Añadir agua hasta dejar un mínimo de media pulgada (1.3 cm) a partir de la parte superior de la celda.
- 5) Tapar la celda.

- 6) Colocar la celda en la camisa de calentamiento y ajustarla de tal manera que la temperatura sea aproximadamente 92°C.
- 7) Conectar la fuente de gas con presión regulada al vástago de la válvula superior de la celda.
- 8) Abrir la válvula de la bombona de gas.
- 9) Regular la presión a 100 psi, con la válvula de aguja.
- 10) Abrir la válvula superior de la celda.
- 11) Verificar que la balanza esté enchufada y conectada a la computadora.
- 12) Programar el software Balancelink para que registre la masa recogida cada 1 seg.
- 13) Colocar el recipiente para recolectar el filtrado sobre la balanza previamente tarada.
- 14) Activar la recolección de datos y abrir el vástago de la válvula inferior.
- 15) Registrar en la computadora la masa medida en la balanza.
- 16) Detener la prueba cuando la celda se haya vaciado, para esto se debe cerrar la válvula inferior, luego cerrar la válvula superior y detener el registro de datos.
- 17) Cerrar el regulador de presión, purgar la manguera que lo conecta a la válvula y desconectarlo del vástago de la válvula superior.
- 18) Abrir lentamente la válvula superior y esperar a que se libere toda la presión.
- 19) Sacar la celda de la camisa.
- 20) Abrir la parte superior de la celda.

## **6.9 Filtración del fluido de perforación.**

En este procedimiento se realizará la prueba de filtración en la celda HPHT, según la norma API RP 13 B-2 [API]. La filtración se lleva a cabo 24 horas después de haber preparado el lodo aproximadamente, en la celda de dos bocas. El procedimiento es como sigue a continuación.

- 1) Colocar el lodo en el agitador de baja revolución (velocidad 4 o 5) y agitarlo durante 1 hora, antes de realizar la filtración.
- 2) Agregar la 50ml de lodo a la celda de filtración. Con este volumen se garantiza la realización de varias de filtración para un mismo lodo.
- 3) Ensamblar la parte superior de la celda, y ajustar la tapa con los pernos.
- 4) Repetir los pasos 4 al 6 del procedimiento de resistencia del medio limpio, regulando la temperatura de la camisa de calentamiento si es necesario.
- 5) Regular la presión a 500 psi con la válvula de aguja.
- 6) Regular la presión a 100, 200, 300, 400 y 500psi en el caso de estudios de compresibilidad.
- 7) Abrir la válvula superior de la celda.
- 8) Verificar que la balanza esté enchufada y conectada a la computadora.
- 9) Programar el software Balancelink para que registre la masa recogida cada 5 seg.
- 10) Colocar el recipiente para recolectar el filtrado sobre la balanza previamente tarada, simultáneamente, abrir el vástago de la válvula inferior e iniciar la recolección de datos en la computadora.
- 11) Anotar el valor medido en la balanza para el tiempo cero.

12) 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.

13) Repetir los pasos 14 al 16 del procedimiento de resistencia del medio limpio.

#### **6.10 Permeación del revoque formado.**

Después de haber realizado la filtración del fluido de perforación, se procede a permear la torta formada, para determinar, la permeabilidad del revoque. Los pasos para lograr esto son los siguientes.

1) Abrir la parte superior de la celda, retirar todo el lodo de residuo de la misma, cuidando no causar daños en el revoque.

2) Añadir agua destilada cuidando no dañar el revoque, dejar un mínimo de media pulgada (1.3 cm) a partir de la parte superior de la celda.

3) Cerrar la parte superior de la celda.

4) Repetir los pasos 4 al 6 del procedimiento resistencia del medio limpio.

5) Regular con la válvula de aguja la presión a 500 psi.

6) Repetir los pasos 10 al 13 del procedimiento de filtración del fluido de perforación.

7) Registrar en la computadora a partir del tiempo cero y cada 5 s, la masa medida en la balanza.

8) Detener la permeación a los 600 segundos (10 min.), para ello se debe cerrar la válvula inferior, luego cerrar la válvula superior y detener la recolección de datos.

9) Repetir los pasos 14 al 16 del procedimiento de resistencia del medio limpio.

10) Abrir la parte superior de la celda, luego abrir la parte inferior de la celda y retirar el medio filtrante (papel de filtro) con mucho cuidado de manera de no dañar la torta.

11) Lavar la celda.

12) Llevar la torta formada al desecador infrarrojo a una temperatura de 70°C y programar el tiempo en auto, para que se apague automáticamente al secarse. Registrar el valor de la masa y medir la altura del revoque.

### **6.11 Resistencia del medio filtrante sucio**

Esta prueba permite evaluar el valor de la resistencia del medio filtrante luego de ser usado, el procedimiento es como sigue a continuación.

1) Al realizar la tercera formación de torta, sacar de la celda el papel de filtro y el revoque. Retirar el revoque con cuidado para no dañar el medio filtrante.

2) Armar la parte inferior de la celda, colocando el papel de filtro usado.

3) Añadir agua, hasta dejar un mínimo de media pulgada (1.3 cm) a partir de la parte superior de la celda y tapar la misma.

4) Repetir los pasos 3 al 6 del procedimiento de resistencia del medio limpio.

5) Regular la presión a 100 psi con la válvula de aguja.

6) Repetir los pasos 10 al 13 del procedimiento de filtración del fluido de perforación.

7) Registrar en la computadora cada 30 s, la masa medida en la balanza.

8) Parar la prueba cuando hayan transcurrido 10 min., para ello se debe cerrar la válvula inferior, luego cerrar la válvula superior y detener el registro de datos.

9) Repetir los pasos 14 al 16 del procedimiento de resistencia del medio limpio.

10) Abrir la parte superior de la celda, luego abrir la parte inferior de la misma.

11) Retirar el medio filtrante (papel de filtro).

12) Lavar la celda.

### **6.12 Medición de las Propiedades de la Torta.**

Se deben realizar las siguientes mediciones, necesarias para posteriormente realizar los cálculos.

- 1) Anotar el valor de la masa del revoque, que se obtiene al realizar el secado en el desecador de infrarrojo.
- 2) Calibrar el comparador de altura.
- 3) Medir la altura de la torta seca y anotar el valor.
- 4) Estas mediciones se deben hacer en 5 puntos diferentes de la torta, para luego calcular una altura promedio.

### **6.13 Medición de la Distribución de Tamaño de Partícula.**

La medición de la distribución de tamaño de partícula para las mezclas en estudio se realiza utilizando el equipo Mastersizer 2000.

El procedimiento general se citara a continuación y los detalles pueden encontrarse en el manual del equipo, disponible en el Laboratorio de Separaciones Mecánicas.

- 1) Encender el equipo, la unidad óptica del sistema y sus accesorios.
- 2) Iniciar el software de operación del equipo, a través del icono Mastersizer 2000.
- 3) Abrir la ventana “Measurement Options”.
- 4) Si la medición se encuentra predefinida se continúa en el paso 6, de lo contrario, se selecciona el tipo de muestra a analizar a través de la opción “Nombre de la muestra” o presionando el botón “Materials” e incorporando sus propiedades (índice de refracción y coeficiente de absorbanca).

- 5) Se debe seleccionar el agente dispersante, (en caso de usarse) en la opción Nombre del dispersante. En caso de no encontrarse en la lista se debe añadir presionando el botón (dispersantes) y se debe incluir su índice de refracción.
- 6) Seleccionar en el menú de entrada, medición automática (Measure Automatic).
- 7) Añadir la muestra en el compartimiento de análisis y comprobar que el nivel de obscuración se encuentre en el rango (13-15) y en su color adecuado (Verde).
- 8) Iniciar la medición por medio del botón Start.
- 9) Para tener acceso al análisis y mediciones realizadas se selecciona la opción de registro de datos y tablas de reportes (Records).

Se debe mencionar que se debe mantener limpio el sistema óptico ya que de ocurrir lo contrario influiría en las mediciones.



## **7 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

La metodología empleada para cumplir con los objetivos de este Trabajo Especial de Grado es la siguiente:

1. Entrenamiento en la preparación de lodos de perforación, en los equipos de clasificación, en el manejo de la celda de filtración a alta presión y en el uso del analizador de tamaño de partícula de dispersión láser.
2. Preparación de fracciones de granulometría estrecha por tamizado y clasificación centrifuga.
3. Preparación de Lodos de Perforación y medición de sus propiedades reológicas.
4. Preparación del Programa experimental o plan de experiencias.
5. Evaluación y discusión de los resultados.
6. Redacción del informe.
7. Presentación.

## 7. PLAN DE EXPERIENCIAS

En esta sección, se presentan los pasos a seguir para lograr los objetivos propuestos al comienzo de este trabajo de grado. Para ello el plan de experiencias se dividió en dos etapas:

- La primera, será la preparación de las fracciones necesarias para la formación del revoque utilizando las granulometrías de los carbonatos comerciales Intecarb 1015 e Intecarb 3035, estableciendo mezclas de estas fracciones que permitan identificar las características de las granulometrías que más influyen sobre las propiedades del revoque.
- La segunda etapa, será la determinación de los parámetros relacionados con las características del revoque formado usando los lodos de perforación generados a partir de las mezclas preparadas en la primera etapa, manteniendo bajo control propiedades como el pH en la formación del lodo de perforación y la temperatura en la formación del revoque. Los lodos preparados se filtrarán sobre papel utilizando celdas HPHT para formar los revoques a analizar. Caracterizando luego los revoques mediante la determinación de su permeabilidad, porosidad y solidosidad, definiendo además las zonas Darcyana e Incipiente.

Para llevar a cabo la primera etapa, se seguirá el siguiente plan:

1. Se utilizaran dos granulometrías bases, las cuales son:
  - Carbonato Comercial Intecarb Grado CM-1015 (1)
  - Carbonato Comercial Intecarb Grado CM-3035 (2)
2. Se obtendrá, para cada una de las bases, diferentes fracciones de tamaños de partícula de carbonato de calcio mediante el proceso de tamizado húmedo. Estas fracciones varían entre  $38\mu\text{m}$  y  $125\mu\text{m}$ .

3. Se obtendrán, para cada una de las bases, diferentes fracciones de tamaños de partícula de carbonato de calcio menores a  $38\mu\text{m}$  mediante la utilización del clasificador centrífugo cuyo procedimiento fue descrito anteriormente.
4. Se obtendrá la distribución de tamaño de partícula para cada una de las fracciones obtenidas, mediante la utilización del Mastersizer 2000.
5. Se definirán cuatro (4) mezclas, agregando finos a cada granulometría base, manteniendo la parte superior de la curva de porcentaje acumulado de la base constante, asimismo con el valor de la mediana de la DTP,  $X_{50}$ . Las mezclas se obtendrán, a partir del programa “Definición de mezclas”, que se encuentra a la disposición en el Laboratorio de Separaciones Mecánicas de la UCV. Dos de las mezclas tendrán una DTP con mayor cantidad de partículas menores a  $10\mu\text{m}$  y las otras dos con DTP que contengan una cantidad menor de partículas de este tamaño con respecto a la base.
6. Se definirán dos (2) mezclas, agregando gruesos a cada granulometría base, manteniendo la parte inferior de la curva de porcentaje acumulado de la base constante, asimismo con el valor de  $X_{50}$ . Las mezclas se obtendrán, a partir del programa “Definición de mezclas”. Una de las mezclas se hará con puntos por encima de la curva base y otra por debajo de la base.
7. Se verificará en el Mastersizer 2000 que la mezcla preparada tenga la granulometría deseada.

Una vez preparadas las mezclas necesarias se entra en la segunda etapa, en donde se procederá de la siguiente manera:

8. Se prepararán los lodos siguiendo los procedimientos descritos en el procedimiento experimental.

9. Se realizará una serie de pruebas, para cada lodo, que consta de:
- *Formación de la Torta:* El lodo se filtra en la celda HPHT, se recogen datos de volumen de filtrado en función del tiempo, de aquí se determina la zona *Darcyana e Incipiente*.
  - *Permeación del Revoque Formado.* El revoque formado será permeado con agua con el fin de obtener la resistencia específica del conjunto torta-medio filtrante, que involucra la zona *Darcyana e Incipiente*.
  - *Permeación del medio usado:* a partir de una de las tortas formadas la cual se desecha para poder efectuar esta determinación, con el fin de conocer la resistencia del medio sucio.

Dichas pruebas se repetirán un mínimo de tres veces cada una, con la finalidad de obtener un valor promedio de las características del revoque formado, exceptuando la prueba de Permeación del medio usado la cual se realizará una sola vez por cada serie y se tomará como válida para el resto de las pruebas.

10. Se realizarán pruebas con las granulometrías base y con las mezclas definidas, a las condiciones de presión y tiempo que se presentan en la tabla 8.1, recolectando los datos en la computadora en el intervalo de tiempo especificado en esa misma tabla.

**Tabla 8.1 Condiciones de trabajo y duración de cada prueba.**

<b>PRUEBA</b>	<b>DIFERENCIA DE PRESIÓN (PSI)</b>	<b>INTERVALOS DE TIEMPO (S)</b>	<b>TIEMPO (MIN)</b>
<b>Formación del revoque</b>	<b>500</b>	<b>5</b>	<b>30</b>
<b>Permeación con agua del revoque formado</b>	<b>500</b>	<b>5</b>	<b>10</b>
<b>Permeación del medio usado</b>	<b>500</b>	<b>5</b>	<b>10</b>

11. Determinación de los parámetros de caracterización del revoque, a partir de los resultados obtenidos durante las pruebas de filtración siguiendo el procedimiento de Análisis de la Curva de Filtrado.

## 9. DISEÑO DE MEZCLAS.

Las mezclas fueron diseñadas a partir de las fracciones estrechas obtenidas mediante el tamizado húmedo y la clasificación centrífuga utilizando como granulometrías base Carbonato comercial Intecarb grados CM 1015 y 3035. Las fracciones estrechas generadas provienen del tamizado por vía seca de los carbonatos grados CM 1015 y 3035 que permiten tener bases con un tamaño de partícula menor a 125  $\mu\text{m}$ . Las mezclas preparadas y la base obtenida a partir del Carbonato de Calcio Intecarb CM 1015, y las obtenidas del Carbonato de Calcio Intecarb CM 3035 serán denominadas Grupo 1 y Grupo 2 respectivamente. Las bases serán nombradas como Base 1 para CM 1015 y Base 2 para CM 3035.

En total se obtuvo 10 fracciones estrechas para cada base, 4 fracciones obtenidas del clasificador centrífugo con velocidades de 3000, 5000, 7000, 9000, 11000rpm con una media entre 3.5 $\mu\text{m}$  y 38  $\mu\text{m}$ , y otras 6 provenientes de los gruesos de 3000rpm y separándolos mediante el tamizado vía húmeda que permite obtener partículas en un rango de tamaño medio nominal ( $X_{50}$ ) comprendido entre 38  $\mu\text{m}$  y 125  $\mu\text{m}$ . Esta producción de fracciones estrechas se realizó para las Bases 1 y 2.

En la tabla 9.1 se muestra las fracciones utilizadas para diseñar y simular las mezclas con su valor de mediana ( $X_{50}$ ) obtenidas a partir de la Base 1 y la Base2.

**Tabla 9.1. Fracciones estrechas utilizadas para el diseño de mezclas.**

Método de Separación		Mediana $X_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	
		Base 1	Base 2
		$X_{50} = 16,2$	$X_{50} = 28,6$
Clasificación Centrifuga	11000 rpm	3,61	3,80
	9000 rpm	5,66	6,18
	7000 rpm	9,49	3,39
	5000 rpm	18,96	21,19
Tamizado Via Húmeda	38<x<45	50,90	50,33
	45<x<53	59,59	58,63
	53<x<63	68,11	67,33
	63<x<75	82,86	80,96
	75<x<90	98,72	97,39
	90<x<106	113,36	113,77

En la Figura 9.1 se muestran la DTP acumulada de la Base 1 y 2, y en la Figura 9.2 (A y B) las fracciones estrechas utilizadas para el diseño, simulación y preparación de las mezclas extraídas de las bases respectivas.

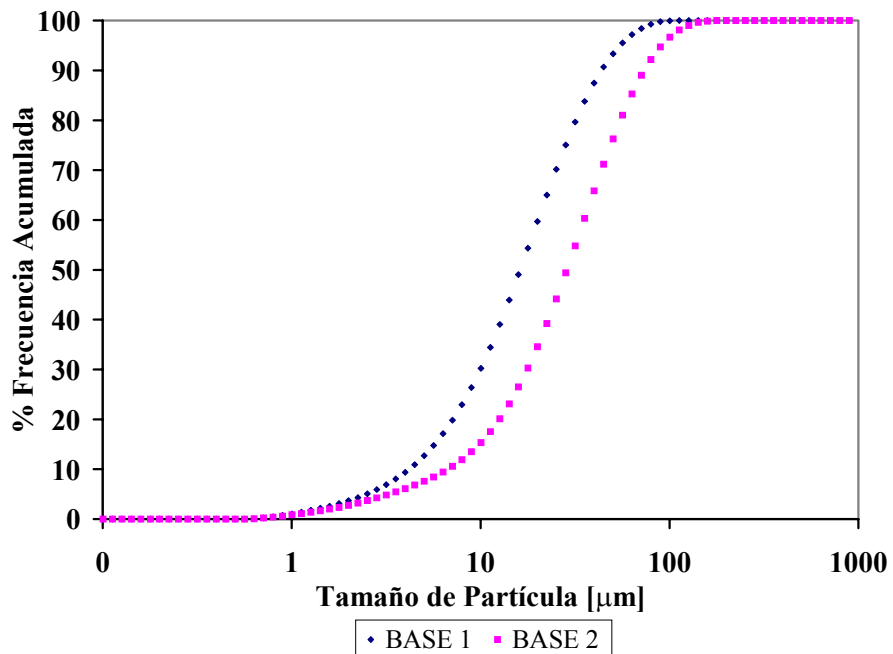
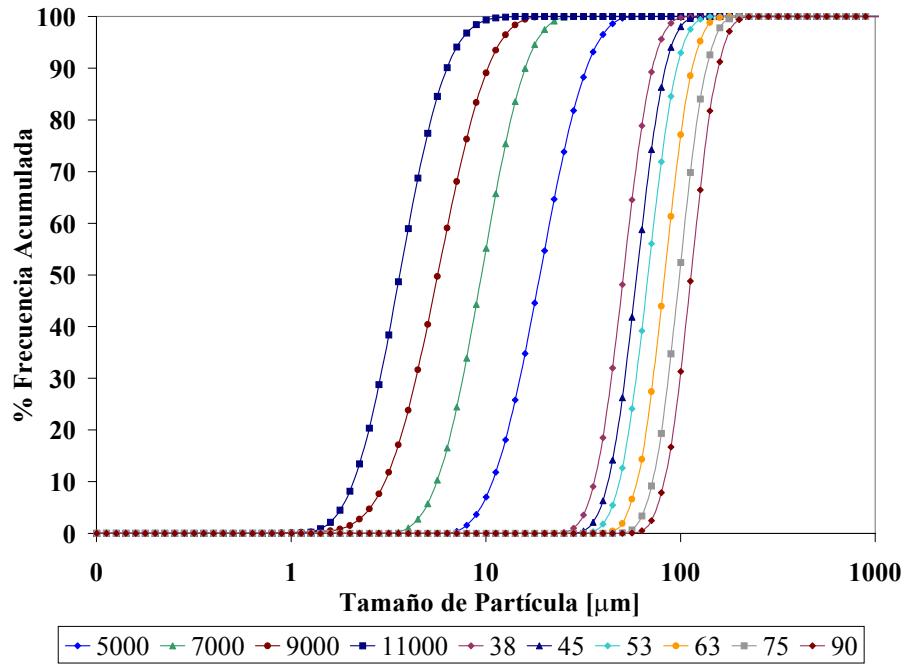
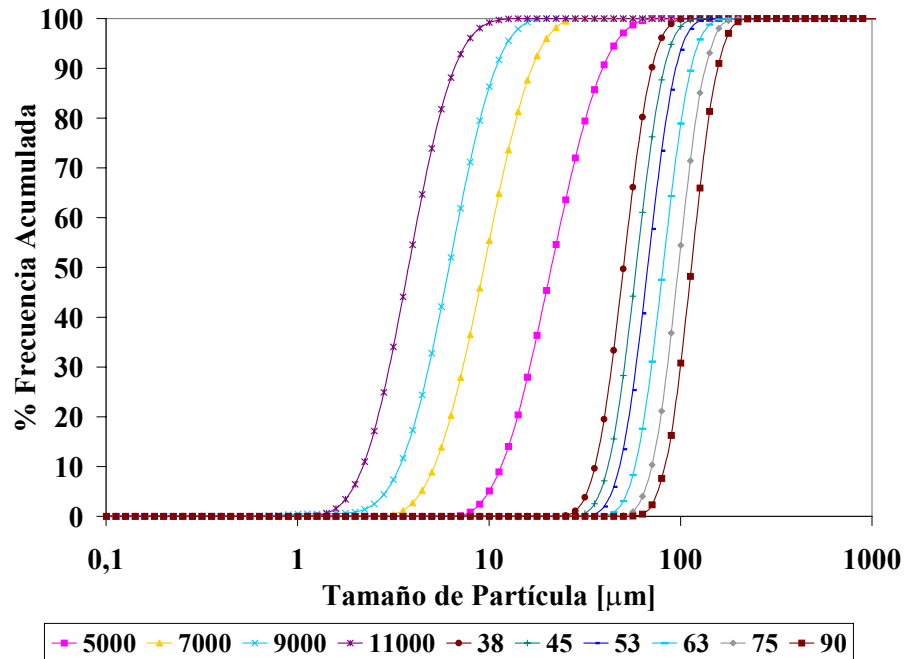


Figura 9.1. DTP acumulada de la Base 1 y Base 2.



A)



B)



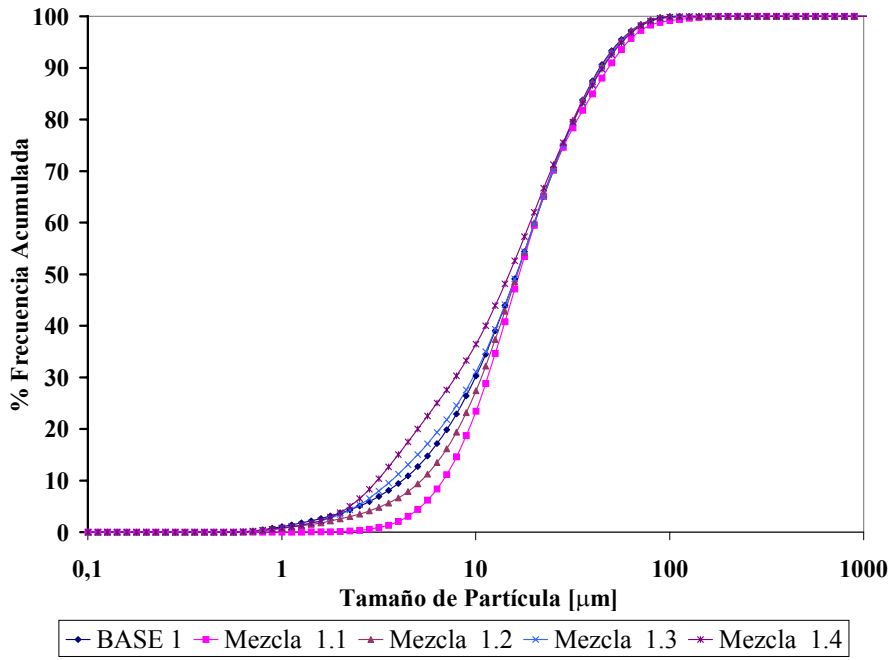
**Figura 9.2.** A)Fracciones estrechas generadas de la Base 1. B) Fracciones estrechas generadas de la Base 2

Se observa que las fracciones estrechas obtenidas de las bases 1 y 2 no permiten recuperar las partículas menores a 2 micrones ya que estas se pierden en la clasificación centrífuga, debido a esto se añadió en la preparación de las mezclas las bases correspondientes para poder incluir partículas menores a este tamaño, añadiendo las fracciones finas y gruesas requeridas para diseñar la DTP deseada.

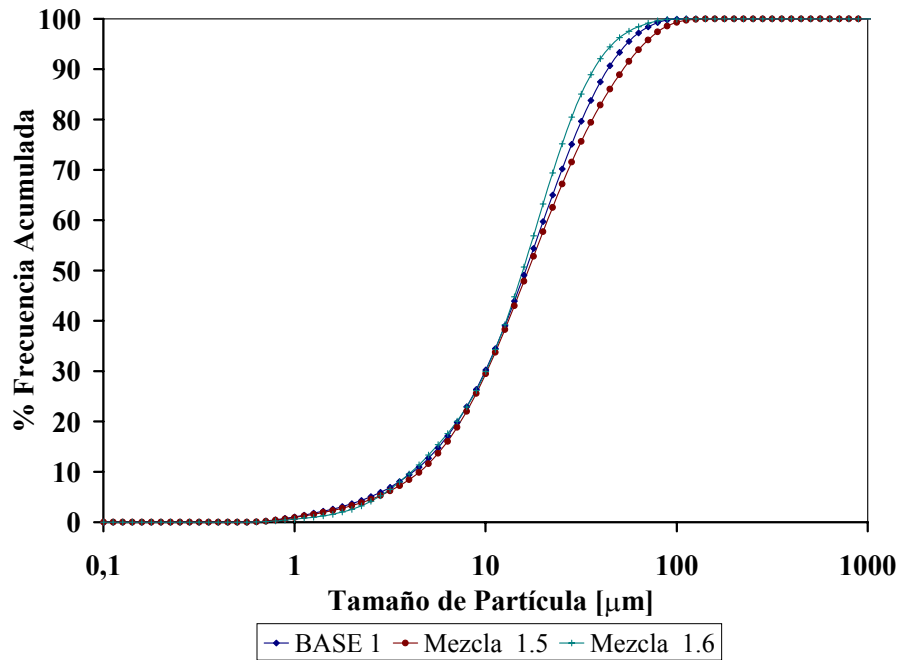
Se generó un total de doce mezclas, seis para cada una de las bases, cuatro de estas mezclas consistieron en la adición de finos a partir de la granulometría base manteniendo constante el valor de  $X_{50}$ , en las dos restantes se varió el contenido de partículas gruesas manteniendo constante el  $X_{50}$ , aunque era necesario mantener constante el valor de  $X_{50}$  para las mezclas, esto en la práctica resultó físicamente imposible.

Las mezclas son nombradas de acuerdo a la cantidad de partículas finas que contienen, por lo tanto las mezclas 1.1, 1.2 generadas a partir de la Base 1 contienen una cantidad menor de partículas finas que la base correspondiente, las mezclas 1.3, 1.4 contienen un porcentaje mayor de partículas finas, las mezclas 1.5 y 1.6 presentan una cantidad menor y mayor de partículas gruesas respectivamente(ver figura 9.3). De igual forma se nombran las mezclas generadas a partir de la base 2.

En la Figura 9.3 (A y B) se muestra la DTP acumulada de las mezclas del Grupo 1 con variación de finos, y las mezclas del Grupo 1 con variación de gruesos.



A)

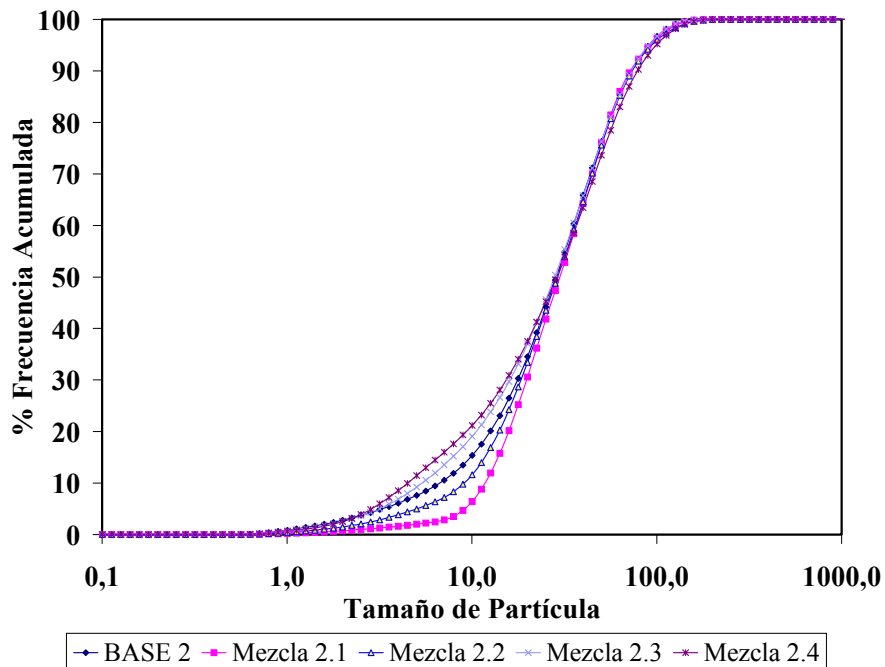


B)

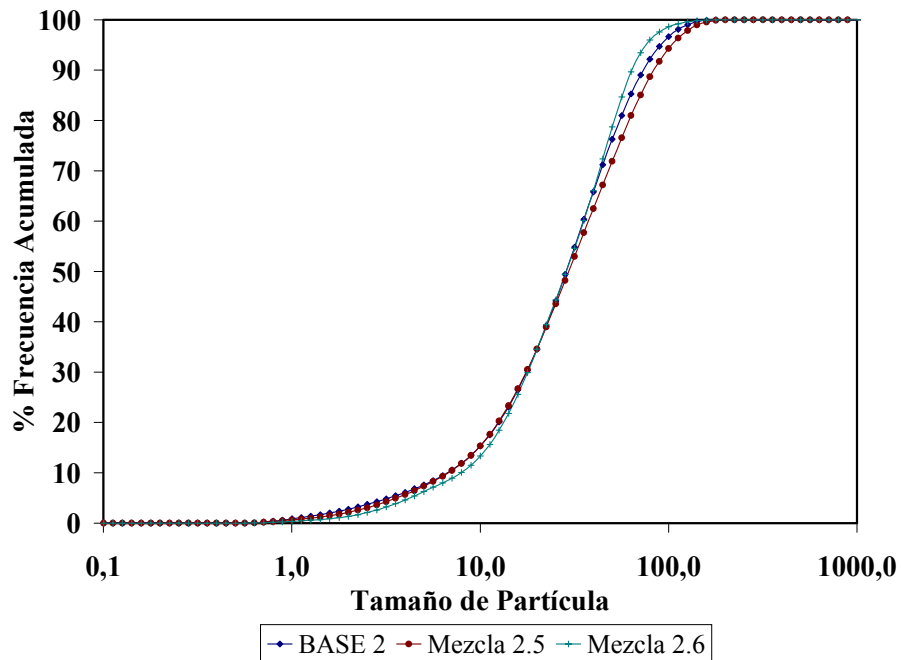
**Figura 9.3.** A) Mezclas con variación en los finos. B) Mezclas con variación en los gruesos

Existe una variación del  $X_{50}$  de las mezclas del Grupo 1 con el valor de la Base 1 (16.22  $\mu\text{m}$ ), logrando que a partir del  $X_{60}$  se mantenga constante en el caso de las mezclas donde se efectúa una variación en las partículas finas. En el caso de variaciones en las partículas gruesas tampoco se logra mantener el valor de  $X_{50}$  aunque permanece en un valor muy cercano. La preparación de estas mezclas se hace complicada al estar condicionadas a mantener un  $X_{50}$  igual al de la base, por lo cual la variación en la cantidad de finos se vio restringida.

De manera análoga a las mezclas de la Base 1 se diseñaron las mezclas de la Base 2 siguiendo la nomenclatura antes descrita, a continuación en la Figura 9.4 (A y B) se presentan las DTP acumuladas de las mezclas generadas a partir de la Base 2.



**Figura 9.4.A)** Mezclas con variación en los finos.



**B)**

**Figura 9.4. B) Mezclas con variación en los gruesos**

Se observa que las mezclas diseñadas para la Base 2 presentan igual comportamiento con respecto al  $X_{50}$  que la Base 1, y en este caso existió restricción en la adición de finos para mantener los valores de  $X_{50}$  cercanos a los de la base.

En las Tablas 9.2 y 9.3 se presentan las masas requeridas de cada fracción estrecha para obtener las DTP que serán sometidas a estudio, estas masas se obtienen del programa de simulación de mezclas. La suma de las masas de las fracciones estrechas utilizadas son 30 grs de Carbonato de Calcio, necesarios para preparar un pseudo lodo de perforación.

**Tabla 9.2.** Masa de Mezclas pertenecientes al Grupo 1, Intecarb CM 1015  
(X50≈16.2 μm)

Fracciones	Masa (gr)					
	Mezcla 1.1	Mezcla 1.2	Mezcla 1.3	Mezcla 1.4	Mezcla 1.5	Mezcla 1.6
<b>5000</b>	15,890	5,050	3,345	2,390	0,000	9,771
<b>7000</b>	7,060	2,878	0,000	0,000	1,360	0,848
<b>9000</b>	2,276	0,000	0,000	0,000	0,000	1,308
<b>11000</b>	0,000	0,000	1,935	4,129	0,000	1,732
<b>Base 1</b>	0,000	20,806	23,701	22,057	26,784	16,338
<b>38&lt;X&lt;45</b>	4,416	1,264	0,951	1,368	0,099	0,000
<b>45&lt;X&lt;53</b>	0,000	0,000	0,000	0,002	0,972	0,000
<b>53&lt;X&lt;63</b>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>63&lt;X&lt;75</b>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,789	0,000
<b>75&lt;X&lt;90</b>	0,000	0,002	0,002	0,000	0,000	0,002
<b>90&lt;X&lt;106</b>	0,357	0,000	0,066	0,054	0,000	0,000
<b>Total</b>	30,000	30,000	30,000	30,000	30,003	30,000

**Tabla 9.3.** Masa de Mezclas pertenecientes al Grupo 2, Intecarb CM 3035.  
(X50≈28.6 μm)

Fracciones	Masa (gr)					
	Mezcla 2.1	Mezcla 2.2	Mezcla 2.3	Mezcla 2.4	Mezcla 2.5	Mezcla 2.6
<b>5000</b>	14,213	6,073	0,000	0,000	3,147	9,637
<b>7000</b>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,875	0,000
<b>9000</b>	0,000	0,000	1,780	1,465	0,000	1,014
<b>11000</b>	0,000	0,000	0,000	1,522	0,652	0,722
<b>Base 2</b>	7,892	20,520	26,960	24,708	21,600	12,298
<b>38&lt;X&lt;45</b>	6,021	2,556	1,064	1,861	0,494	6,328
<b>45&lt;X&lt;53</b>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,053	0,000
<b>53&lt;X&lt;63</b>	0,000	0,000	0,000	0,000	1,883	0,000
<b>63&lt;X&lt;75</b>	0,065	0,313	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>75&lt;X&lt;90</b>	1,809	0,538	0,196	0,444	0,125	0,000
<b>90&lt;X&lt;106</b>	0,000	0,000	0,000	0,000	1,171	0,000
<b>Total</b>	30,000	30,000	30,000	30,000	30,000	30,000

## **10. ANÁLISIS DE DATOS.**

La influencia de la granulometría, la resistencia del medio filtrante, el volumen de filtrado, masa y altura de revoque son características propias que presenta cada formulación de pseudo lodo, por lo tanto se hace necesario un análisis minucioso de estos aspectos antes de llegar a una discusión de resultados para poder de alguna manera conocer o predecir los resultados finales.

### **10.1. Granulometría.**

Las fracciones utilizadas para el diseño de las mezclas y posterior preparación de los pseudo lodos de perforación, no permite la construcción de la base original, esto se debe principalmente a que las partículas más finas (menores a 1  $\mu\text{m}$ ) no se logran recuperar luego de la clasificación centrífuga, lo cual hizo necesaria la utilización de la base para que incluyera los mencionados tamaños.

En el caso de las mezclas del Grupo 1 se observó una peculiaridad específicamente en la mezcla 1.1. Esta mezcla se diseñó con un contenido bajo de partículas finas, específicamente, conteniendo un porcentaje despreciable de partículas menores a 1  $\mu\text{m}$  (0.013%, ver apéndice A.2.1) lo cual provocó que el pseudo lodo formulado no tuviera la capacidad de sellar el medio filtrante, permitiendo volúmenes de filtración mayores a 100 ml y generando revoques con una masa de 10 grs aproximadamente, por lo cual se decidió descartar esta mezcla para el estudio ya que se busca formular un pseudo lodo que permita una baja permeabilidad y un revoque formado delgado, liso y flexible.

### **10.2. Resistencia del Medio Filtrante.**

La resistencia del medio filtrante experimentalmente se ha convertido en un punto difícil de definir, en el 2001, Hernández y Hernández midieron la resistencia

del medio filtrante permeando con agua destilada el papel de filtro limpio, sin haber sido utilizado, lo cual no es correcto ya que la resistencia ofrecida por el medio filtrante durante la formación del revoque incluye, además del papel, la resistencia que ofrecen las partículas que lo invaden, por lo tanto la resistencia del medio debe medirse después de retirar el revoque que se ha formado en él, sin embargo la forma en que se retira el revoque del papel varía en gran forma la resistencia del medio, ya que si no se limpia completamente hasta desaparecer cualquier rastro de torta, la resistencia del medio se hace muy alta, además los restos de revoque, que quedan en suspensión sobre el medio, se van depositando durante la permeación haciendo que la resistencia del medio cambie lo cual trae como consecuencia valores errados en la resistencia incipiente. Las pruebas realizadas al papel de filtro *sin usar* evidencian que la resistencia del medio llega a ser hasta 10 veces menor que la del papel invadido.

En la Tabla 10.1 se muestran los valores de resistencia del medio para el papel de filtro después de haberse formado el revoque, variando la forma en que es limpiado el medio filtrante. El *papel sin usar* se refiere al papel de filtro el cual ha sido permeado sin haber formado un revoque. Esta variación produce resultados erróneos en la determinación de la resistencia del medio.

Tabla 10.1. **Resistencia del medio filtrante.**

		<b>Resistencia del medio <math>R_M</math> (<math>m^{-1}</math>)</b>		
		<b>Sin limpiar</b>	<b>Limpio</b>	<b>Papel sin usar</b>
<b>Base 1</b>		1,01E+14	4,76E+12	1,10E+11
<b>Mezcla 1.4</b>		1,95E+14	1,96E+12	1,20E+11

### 10.3. Volumen de Filtrado.

El volumen de filtrado es uno de los mejores indicadores para saber si la formulación de un pseudo lodo de perforación cumple los objetivos previstos de

generar un revoque liso y delgado además de tener una baja permeabilidad, ya que un volumen de filtrado alto se traduce en un revoque grueso y poco permeable, mientras que volúmenes de filtrado pequeños reflejan la formación de un revoque liso, delgado y poco permeable. Trabajos anteriores (Pessolano,2000) muestran como varía el volumen de filtrado con la temperatura (al aumentar la temperatura la viscosidad de la goma disminuye), la presión y la cantidad de pseudo lodo que se añade a la celda de filtración. A pesar de que estas variables se controlaron de forma estricta, la existencia en la variación de volumen de filtrado se hizo inevitable, esto se debe a que las mezclas que se usaron para la formulación de los pseudo lodos de perforación presentaban variaciones importantes en su granulometría.

Los volúmenes de filtrado obtenidos de la Base 1 y la Base 2 se mantuvieron relativamente constantes entre cada prueba. Las pequeñas variaciones se deben principalmente a que la chaqueta de calentamiento tarda algunos minutos en estabilizar la temperatura de la celda, esto ocasiona que si no se espera un tiempo prudente antes de comenzar la filtración, la temperatura puede ir variando mientras la prueba se lleva a cabo, ocasionando la variación del volumen de filtrado.

A continuación se muestra los volúmenes de filtrado obtenidos para la Base 1 y la Base 2, en pruebas llevadas a cabo para 30 minutos de filtración.

**Tabla 10.2. Volúmenes de filtrado para las bases.**

Prueba	Volúmenes de Filtrado VL (ml)	
	Base 1	Base 2
1	11,194	11,259
2	10,186	12,252
3	11,483	11,858
Coefficiente de Variabilidad CV (%)	6,2	4,2

Al hacer un análisis para los datos de volumen de filtrado obtenido para cada prueba de filtración de las mezclas de cada una de las bases, se observa que los volúmenes de filtrado para las mezclas de la Base 1 se encontraron en un rango que



va desde 10ml hasta 118ml aproximadamente, presentando la Mezcla 1. el volumen de filtrado más alto (118 ml), ya que esta mezcla carecía de partículas menores a 1  $\mu\text{m}$ , lo cual no permitió el taponamiento mínimo para que las partículas sellantes de Carbonato de Calcio y las moléculas de goma Xhantana impidan el paso de partículas de Carbonato de menor tamaño suspendidas en el pseudo lodo y de esta manera formar un revoque delgado. Para las mezclas restantes, constituidas a partir de la Base 1 los volúmenes de filtrado se mantienen en un rango que va desde 10 ml hasta 40 ml aproximadamente, causados por la diferencia de granulometría empleada, las variaciones de temperatura existentes durante la filtración por las razones ya expuestas, además de sumarse el efecto de la agitación constante del pseudo lodo, que a altas velocidades, rompe las moléculas de la goma Xhantana y la convierte en una suspensión mucho menos viscosa. En el caso de las mezclas constituidas a partir de la Base 2 se presenta una menor variación, encontrándose en un rango que va desde los 11ml hasta los 15ml aproximadamente, ya que la velocidad de agitación se redujo, logrando así mantener homogéneo el pseudo lodo sin romper las moléculas de goma Xhantana.

Los volúmenes de filtrado para las mezclas constituidas a partir de las bases 1 y 2 son presentados en la Tabla 10.3 y en la Tabla 10.4

**Tabla 10.3. Volumen de filtrado de las mezclas del Grupo 1.**

Prueba	Volumen de Filtrado $V_L$ (ml)					
	Mezcla 1.1	Mezcla 1.2	Mezcla 1.3	Mezcla 1.4	Mezcla 1.5	Mezcla 1.6
<b>1</b>	109,760	10,720	20,438	39,390	15,929	22,311
<b>2</b>	112,711	12,190	20,275	33,983	17,711	29,523
<b>3</b>	118,020	12,359	20,600	37,992	17,080	23,635
<b>CV %</b>	3,7	7,7	0,8	7,6	5,3	15,3

**Tabla 10.4. Volumen de filtrado de las mezclas del Grupo 2**

Volumen de Filtrado $V_L$ (ml)						
Prueba	Mezcla 2.1	Mezcla 2.2	Mezcla 2.3	Mezcla 2.4	Mezcla 2.5	Mezcla 2.6
1	13,686	13,457	12,533	11,365	12,079	12,233
2	12,568	15,050	11,029	11,063	11,045	14,808
3	12,715	15,033	12,681	15,565	11,821	15,419
CV %	6,0	7,9	9,0	1,9	6,3	13,5

**10.4. Masa del Revoque.**

La masa de revoque depositado va íntimamente asociado con el volumen de filtrado obtenido, ya que la cantidad de sólidos depositados en el papel de filtro corresponde a los sólidos que se encuentran suspendidos en igual volumen de pseudo lodo filtrado. Las variaciones en la masa depositada muestran el mismo comportamiento que los volúmenes de filtrado, tanto para las mezclas como para las bases, por las razones antes expuestas. El obtener una masa de revoque mayor es indicativo de que se generó un revoque muy permeable y grueso, ya que a medida que el volumen de filtrado aumenta la masa asociada a dicho volumen de filtrado es mayor. El instrumento utilizado para la medición de estas alturas es el tornillo micrométrico el cual es capaz de medir la altura en un sector pequeño de la torta, por lo tanto los valores que se reportan son valores promedio. Las masas de los revoques obtenidos se muestran en la Tabla 10.4 y la Tabla 10.5 para las mezclas del Grupo 1 y grupo 2 respectivamente.

**Tabla 10.5. Masa de Revoques para mezclas del Grupo 1.**

Masa de Revoques [gr]							
Prueba	Base 1	Mezcla 1.1	Mezcla 1.2	Mezcla 1.3	Mezcla 1.4	Mezcla 1.5	Mezcla 1.6
1	1,199	10,186	1,146	2,185	3,814	1,721	2,154
2	1,295	10,21	1,313	1,992	3,116	1,816	2,827
3	1,267	10,93	1,313	2,056	3,936	1,817	2,307

**Tabla 10.6. Masa de Revoques para mezclas del Grupo 2**

Masa de Revoques [gr]							
Prueba	Base 2	Mezcla 2.1	Mezcla 2.2	Mezcla 2.3	Mezcla 2.4	Mezcla 2.5	Mezcla 2.6
<b>1</b>	1,285	1,419	1,463	1,207	1,35	1,395	1,188
<b>2</b>	1,295	1,253	1,581	1,242	1,189	1,554	1,168
<b>3</b>	1,176	1,255	1,473	1,267	1,003	1,579	1,345

## **11. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.**

Sobre la base de los datos obtenidos de las pruebas de filtración realizadas para las diferentes mezclas y sus respectivas bases, y para ver de una forma más clara el efecto que produce la variación de granulometría, adición de partículas finas y gruesas, en las características del revoque formado y siguiendo el procedimiento de análisis de la curva de filtrado se presentan a continuación los resultados de identificación de las dos zonas de filtración (Incipiente y Darcyana), el producto Permeabilidad-Solidosidad para estas etapas, así como las contribuciones porcentuales de dichas etapas en la resistencia global y la cantidad de revoque formado.

### **11.1. Identificación de las Zonas Incipiente y Darcyana.**

A partir de la curva de filtración y mediante el análisis de la misma es posible identificar las dos zonas de las cuales está compuesta la filtración sobre papel. De los valores importantes que se obtienen del análisis de la curva de filtrado es el correspondiente a  $t_0$  y  $V_{L0}$ , llamados también tiempo incipiente y volumen incipiente respectivamente, éstos representan el límite físico entre el fin de la etapa Incipiente y el comienzo de la etapa Darcyana. Los valores tanto de  $t_0$  como de  $V_{L0}$  serán determinantes en las características del revoque ya que serán generados a partir de la correcta identificación de estas zonas.

En la Tabla 11.1 y 11.2 se muestran los valores de  $t_0$  y  $V_{L0}$  correspondientes a las mezclas del Grupo 1

**Tabla 11.1.** Valores de  $t_0$  para el Grupo 1.

Tiempos Incipientes $t_0$ [seg]						
Prueba	Base 1	Mezcla 1.2	Mezcla 1.3	Mezcla 1.4	Mezcla 1.5	Mezcla 1.6
1	15	10	75	90	70	55
2	5	20	55	85	85	45
3	25	55	65	90	65	65
CV (%)	66,7	83,4	15,4	3,3	14,2	18,2

**Tabla 11.2.** Valores de  $V_{L0}$  para el Grupo 1.

Volúmenes Incipientes $V_{L0}$ [m <sup>3</sup> ]						
Prueba	Base 1	Mezcla 1.2	Mezcla 1.3	Mezcla 1.4	Mezcla 1.5	Mezcla 1.6
1	1,530	1,006	6,449	11,040	5,750	7,590
2	0,320	2,014	6,080	9,490	7,670	7,010
3	2,060	3,020	5,620	10,487	6,160	7,779
CV (%)	68,4	50,0	6,9	7,6	15,5	5,4

Como se observa los valores de los Volúmenes Incipientes  $V_{L0}$  para las mezclas 1.3, 1.4, 1.5 y 1.6 tienen una menor variación (6.9%, 7.6%, 15.5%, 5.4% respectivamente) respecto a la Base1 y la mezcla 1.2. Igual comportamiento sucede con los tiempos Incipientes  $t_0$ , esto se debe a que en el momento de realizar la prueba de filtración un pequeño cambio en la apertura de la válvula de salida de la celda HPHT ocasiona una variación en la velocidad inicial de filtrado, lo cual incide en este tiempo y el volumen asociado a él.

Los volúmenes incipientes dependerán principalmente de la cantidad de partículas capaces de sellar el medio filtrante que estén contenidas en la mezcla, sin embargo las pruebas realizadas demuestran que la apertura adecuada y reproducible de la válvula, así como una agitación correcta del pseudo lodo entre cada prueba de filtración permiten reducir variaciones ajenas a la granulometría.

En las Tablas 11.3 y 11.4 se presentan los tiempos Incipientes ( $t_0$ ) y los volúmenes Incipientes ( $V_{L0}$ ) para las mezclas del Grupo 2

**Tabla 11.3.** Valores de  $t_0$  para el Grupo 2.

Tiempos Incipientes $t_0$ [seg]							
Prueba	Base 2	Mezcla 2.1	Mezcla 2.2	Mezcla 2.3	Mezcla 2.4	Mezcla 2.5	Mezcla 2.6
1	30	5	40	40	30	35	40
2	15	20	55	25	30	25	45
3	20	30	45	45	70	40	45
CV (%)	35,3	68,6	16,4	28,4	53,3	22,9	6,7

**Tabla 11.4.** Valores de  $V_{L0}$  para el Grupo 2.

Volúmenes Incipientes $V_{L0}$ [ml]							
Prueba	Base 2	Mezcla 2.1	Mezcla 2.2	Mezcla 2.3	Mezcla 2.4	Mezcla 2.5	Mezcla 2.6
1	2,560	1,690	4,991	3,844	2,300	3,170	2,985
2	2,510	2,990	6,570	1,734	2,040	1,706	5,858
3	1,789	3,263	5,969	4,217	5,961	3,470	6,254
CV (%)	18,9	31,7	13,6	41,0	63,9	33,9	35,5

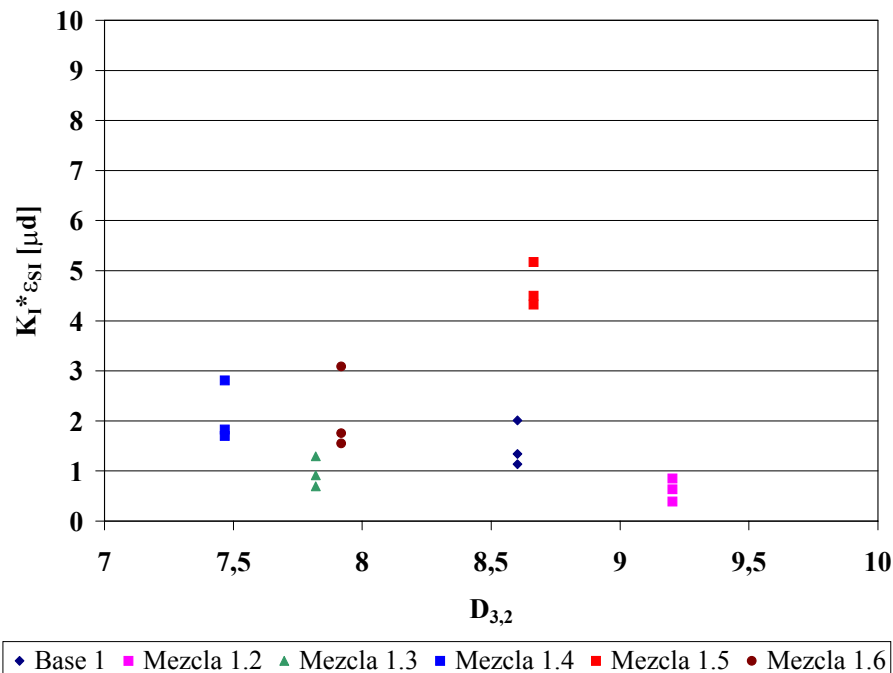
En los volúmenes Incipientes de las mezclas del grupo 2 no muestran un comportamiento regular en cada prueba, de manera similar que los obtenidos para las mezclas del grupo 1, presentando valores de variabilidad mayores en la mezclas 2.3, 2.4, 2.5, 2.6 y la menor en la mezcla 2.2. Los valores de  $t_0$  no son un indicativo del tiempo que tarda la mezcla formulada en sellar los poros del papel de filtro, ya que hay factores como la temperatura que afecta directamente la viscosidad del pseudo lodo afectando el volumen de filtrado en el primer instante de la filtración ya que si aumenta la temperatura la viscosidad disminuye y trae como consecuencia volúmenes de filtrado mayores, igualmente sucede con la abertura de la válvula de salida de la celda HPHT, si no se mantiene aproximadamente igual entre cada prueba, se corre el riesgo de variar la resistencia que encuentra el fluido a través de la salida de la celda, como ocurrió en este caso. Debido al corto tiempo en el cual se lleva a cabo esta etapa (aproximadamente 30 segundos) en comparación con los 30 minutos de filtración, hace que la etapa Incipiente sea muy sensible a cualquier perturbación externa.

## 11.2. Permeabilidad-Solidosidad en la etapa Incipiente

La etapa Incipiente o etapa inicial es la que rige el sellado en el medio filtrante en los primeros instantes de la filtración, en esta zona se requiere que las primeras partículas que invadan el medio tengan la capacidad de reducir la porosidad inicial, y de esta manera impedir el paso de las partículas muy finas (menores al tamaño del poro) y las moléculas de goma Xhantana, reduciendo de esta forma los espacios vacíos por donde pueda pasar el fluido contribuyendo con un aumento en la resistencia al paso de flujo.

### 11.2.1. Permeabilidad-Solidosidad en la etapa Incipiente para mezclas del Grupo 1.

La Figura 11.1, muestra el comportamiento del producto Permeabilidad-Solidosidad en la etapa Incipiente en función del diámetro  $D_{3,2}$  para las mezclas del Grupo 1.

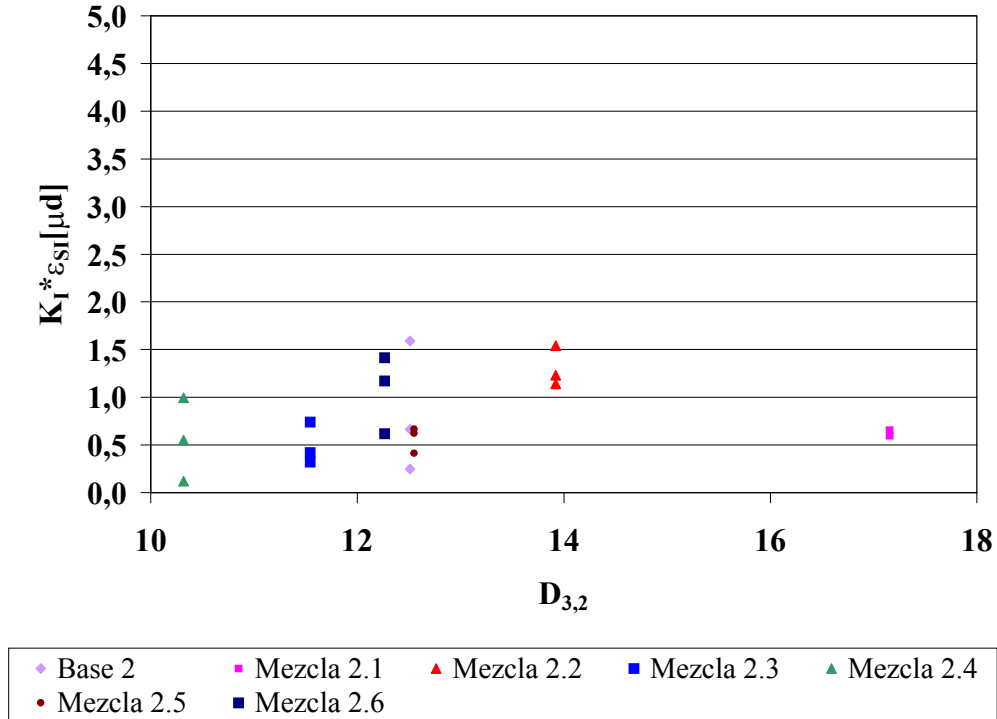


**Figura 11.1.** Producto Permeabilidad-Solidosidad en la etapa Incipiente para mezclas del Grupo 1.

En la figura anterior no se observa una tendencia clara del comportamiento en la etapa incipiente, los valores de Permeabilidad-Solidosidad varían desde 0,5 hasta 5,5  $\mu\text{d}$  lo cual no permite establecer el efecto neto que sobre esta etapa produce la variación del tamaño  $D_{3,2}$ . Sin embargo este hecho se atribuye a que la etapa incipiente es llevada a cabo en un tiempo relativamente corto (aproximadamente 20 segundos) por lo tanto si no se realiza un precalentamiento del pseudo lodo para asegurar la misma condición de temperatura en cada prueba, se producen cambios en la viscosidad de la goma Xhantana afectando los volúmenes de filtrado de esta etapa. Por esta razón, una pequeña variación de volumen filtrado en la etapa Incipiente representará un cambio mayor en la pendiente de la curva de filtración ( $V_L$  en función de  $t$ ) ocasionando que los valores de resistencia se vean afectados. Por esto la desviación en los valores calculados mediante el análisis de la curva de filtrado para la etapa incipiente son mayores, ya que la diferencia de volúmenes al cabo de 5 segundos puede ser de hasta 1ml con respecto a 12ml que representa una filtración promedio.



**11.2.2. Permeabilidad-Solidosidad en la etapa Incipiente para mezclas del Grupo 2.**



**Figura 11.2.** Producto Permeabilidad-Solidosidad en la etapa Incipiente para mezclas del Grupo 2.

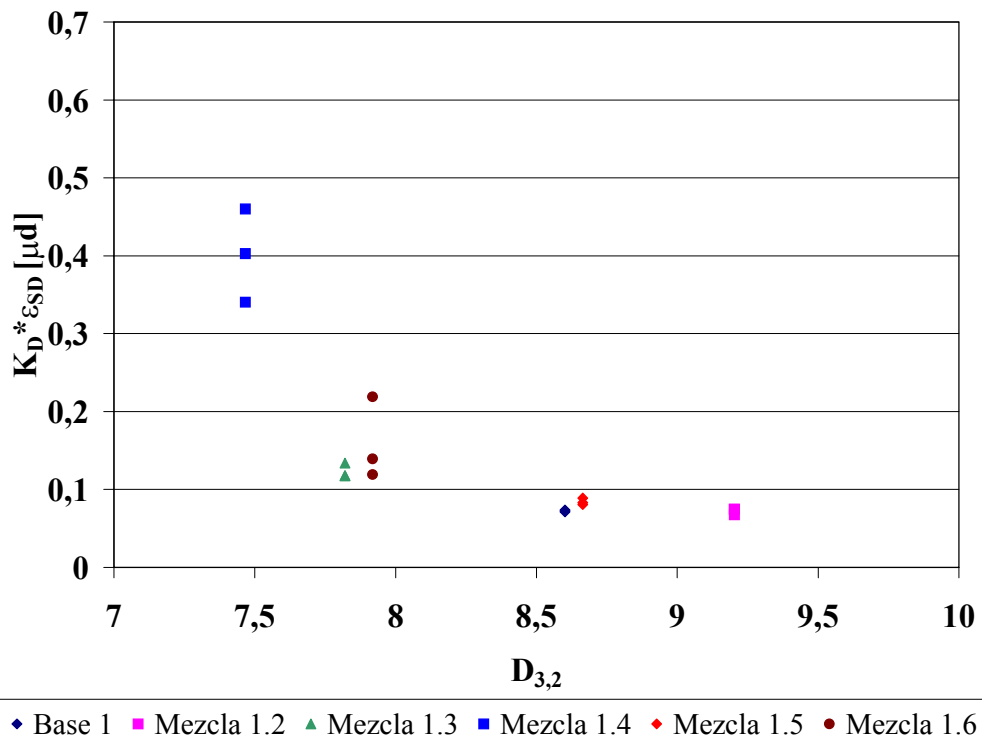
La permeabilidad se mantiene constante al variar el tamaño  $D_{3,2}$  manteniéndose en un rango de 0 hasta 2  $\mu d$ . En las mezclas del Grupo 2, la cantidad de partículas sellantes (menores a 1  $\mu m$ ) se mantuvo relativamente constante (entre 1,2 y 1,4 % ver apéndice A.2.2), de esta forma se impidió una variación en las permeabilidades al aumentar el tamaño  $D_{3,2}$ . Además se logró un mejor control de temperatura descartándose este efecto sobre la permeabilidad.

### 11.3. Permeabilidad-Solidosidad en la zona Darcyana.

La etapa Darcyana es la más representativa de la formación del revoque, ya que esta es la etapa donde la mayor cantidad de revoque es depositado lo que hace que el comportamiento de la zona Darcyana se parezca mucho al comportamiento del revoque una vez finalizada la filtración.

#### 11.3.1. Permeabilidad-Solidosidad de la Etapa Darcyana para las mezclas del Grupo 1.

A continuación en la figura 11.3, se muestra el comportamiento del producto Permeabilidad-Solidosidad de la etapa Darcyana para las mezclas del grupo 1.



**Figura 11.3. Producto Permeabilidad-Solidosidad de la etapa Darcyana para mezclas del Grupo 1.**

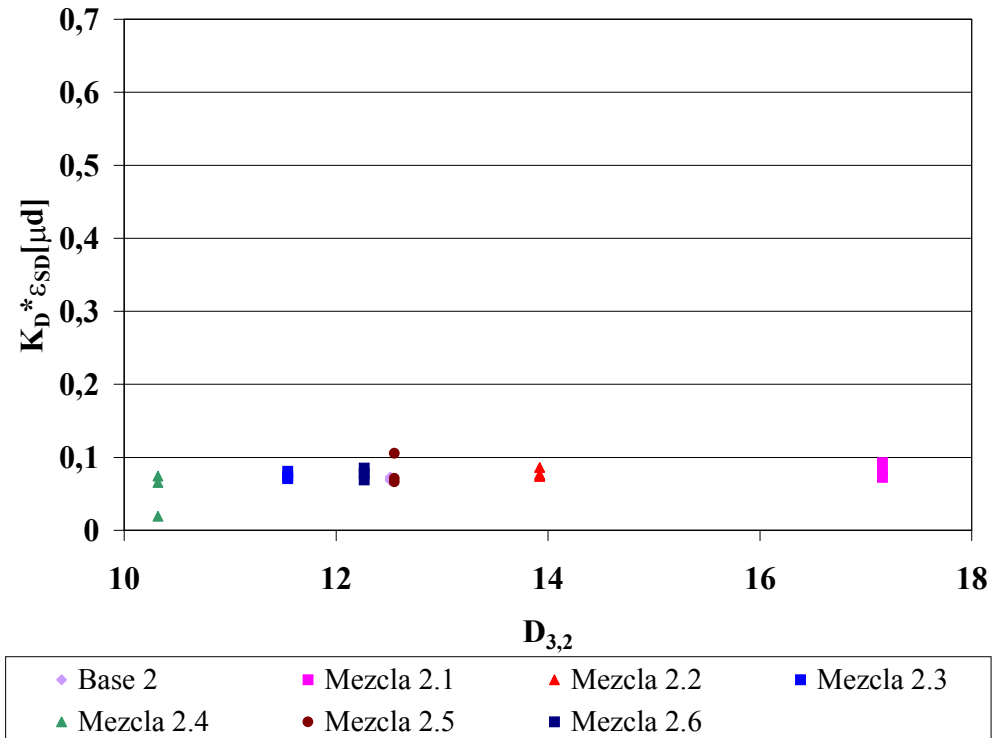
Se puede observar que el comportamiento del producto Permeabilidad-Solidosidad en la Etapa Darcyana para las mezclas del grupo 1 disminuye a medida que aumenta el tamaño  $D_{3,2}$  hasta llegar a valores de  $8,5\mu m$ , y, para valores mayores

se mantienen relativamente constante. Las mezclas que se encuentran en este rango son las 1.3, 1.4 y 1.6, poseen mayor porcentaje de partículas (16 %, 20% y 15 % respectivamente) comprendidas entre  $1\mu\text{m}$  y  $5\mu\text{m}$  (ver apéndice A.2), observándose que para la mezcla 1.4 el producto Permeabilidad-Solidosidad es mayor, por lo tanto se puede decir que para porcentajes mayores a 15 % de partículas entre  $1\mu\text{m}$  y  $5\mu\text{m}$  la permeabilidad del revoque Darcyano aumenta. Lo cual causa un efecto negativo en las propiedades del revoque en la etapa darcyana.

Para las mezclas 1.2, 1.5 y la Base 1 los porcentajes de partículas entre 1 y 5  $\mu\text{m}$  son 8.6%, 11.5% y 11.7% respectivamente, observándose que los valores de Permeabilidad-Solidosidad permanecen relativamente constantes, lo cual coincide con lo expuesto anteriormente.

Como consecuencia inmediata se observa que el gran aporte a la permeabilidad del revoque que se forma durante la filtración depende de la zona Darcyana, el arreglo que tienen las partículas una vez que se ha sellado el medio filtrante rigen las características que tendrá el revoque formado.

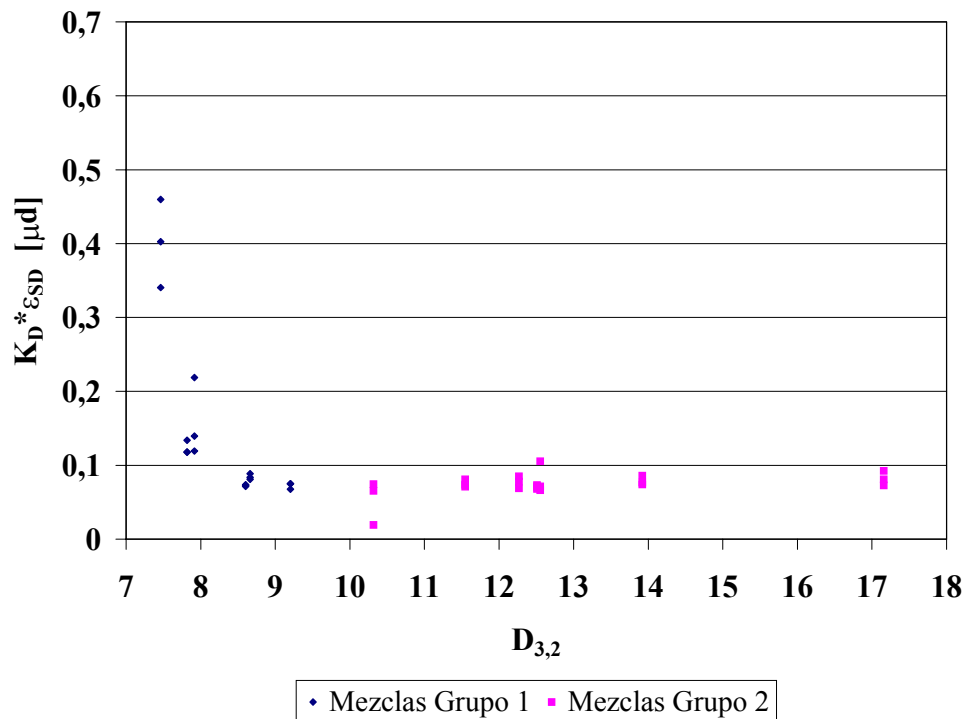
### 11.3.2. Permeabilidad-Solidosidad de la Etapa Darcyana para las mezclas del Grupo 2.



**Figura 11.4. Producto Permeabilidad-Solidosidad de la etapa Darcyana para mezclas del Grupo 2.**

En la figura anterior se observa que las mezclas y la base del grupo 2 mantienen valores relativamente constantes del producto Permeabilidad-Solidosidad, estas mezclas presentan un porcentaje menor de partículas entre 1 y 5  $\mu m$  con respecto a las mezclas 1.3, 1.4, 1.6 como se muestra en la tabla A.2.2 del Apéndice A.2, lo cual demuestra que la etapa darcyana se ve afectada por el contenido de partículas finas en el pseudo lodo. Las mezclas cuyo tamaño  $D_{3,2}$  sea menor a 8,5  $\mu m$  generan revoques con una alta permeabilidad.

La siguiente figura muestra en forma conjunta el comportamiento del producto Permeabilidad-Solidosidad para las mezclas del grupo 1 y 2 con el fin de observar la variación a lo largo de todo el rango de  $D_{3,2}$ . Las mezclas cuyo tamaño  $D_{3,2}$  es menor a  $8,5\mu\text{m}$  generan revoques con alta permeabilidad, y a partir de valores mayores se mantiene relativamente constante, lo que quiere decir que la granulometría no afecta las propiedades del revoque en esta zona.



**FIGURA 11.5.** Producto Permeabilidad-Solidosidad para las mezclas del Grupo 1 y Grupo 2.

#### 11.4. Permeabilidad-Solidosidad Global.

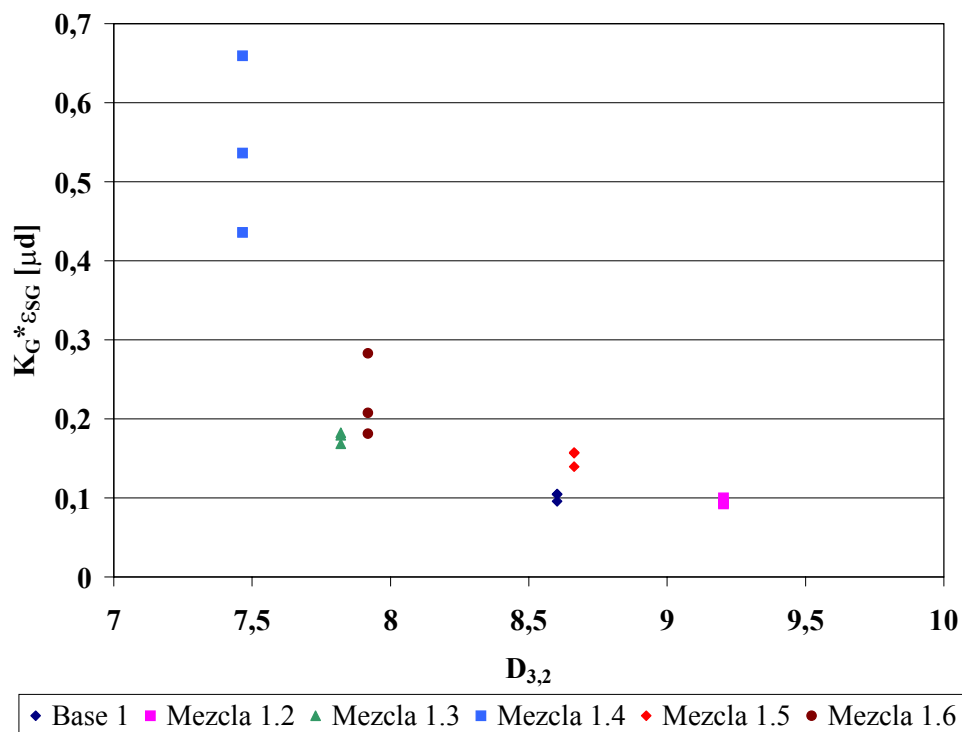
El producto Permeabilidad-Solidosidad depende principalmente de la resistencia al paso de fluido que tenga un determinado revoque y a la porosidad del mismo, ya que la solidosidad aumenta a medida que la porosidad disminuye, permitiendo de esta manera que la resistencia que ofrece el revoque aumente debido a

que el fluido encuentra una cantidad menor de espacios vacíos por donde pueda pasar.

En este caso el papel de filtro necesita partículas menores a  $1\ \mu\text{m}$  para poder sellar los poros y de esta manera impedir el paso de partículas muy finas de carbonato y crear un medio de retención para las moléculas de goma Xhantana impidiendo el paso de la goma que actúa como taponador y de esta manera se logra un sellado efectivo del medio filtrante.

#### 11.4.1. Permeabilidad-Solidosidad Global para mezclas del Grupo 1.

En la siguiente figura se muestra el comportamiento del producto Permeabilidad-Solidosidad global frente a variaciones en el diámetro promedio  $D_{3,2}$ .



**Figura 11.6. Producto Permeabilidad-Solidosidad Global para las mezclas del Grupo 1.**

Como se observa en la Figura 11.6, el producto Permeabilidad-Solidosidad global presenta una disminución para los tamaños de  $D_{3,2}$  comprendidos entre  $7,5\mu\text{m}$  y  $8,5\mu\text{m}$  aproximadamente, para valores mayores tiende a permanecer constante en aproximadamente  $0.1\mu\text{d}$ . Este comportamiento indica que la Permeabilidad global del revoque formado no es afectada para valores de  $D_{3,2}$  mayores a  $8,5\mu\text{m}$ , aunque este comportamiento es contrario a la predicción teórica, ya que se espera que la permeabilidad disminuya a medida que la mezcla posea una mayor cantidad de partículas fina ( $D_{3,2}$  menores) esto ocurre principalmente porque las partículas finas pueden compactarse mejor durante la formación del revoque y de esta manera los espacios vacíos generados son de menor tamaño, lo cual se traduce en una porosidad menor haciendo que fluido que atraviesa el medio filtrante encuentre una resistencia mayor y la permeabilidad disminuya., sin embargo parece existir un límite óptimo de cantidad de partículas finas contenidas en un pseudo lodo ya que el exceso puede ocasionar revoques con permeabilidades altas.

El revoque global está mayormente influenciado por la etapa Darcyana, por lo tanto seguirá el mismo comportamiento que dicha etapa, obteniéndose permeabilidades altas para tamaños  $D_{3,2}$  menores a  $8.5\mu\text{m}$ .

### 11.4.2. Permeabilidad-Solidosidad Global para las Mezclas del Grupo 2.

En la siguiente figura se muestran los valores del producto Permeabilidad-Solidosidad global en función del diámetro  $D_{3,2}$ .

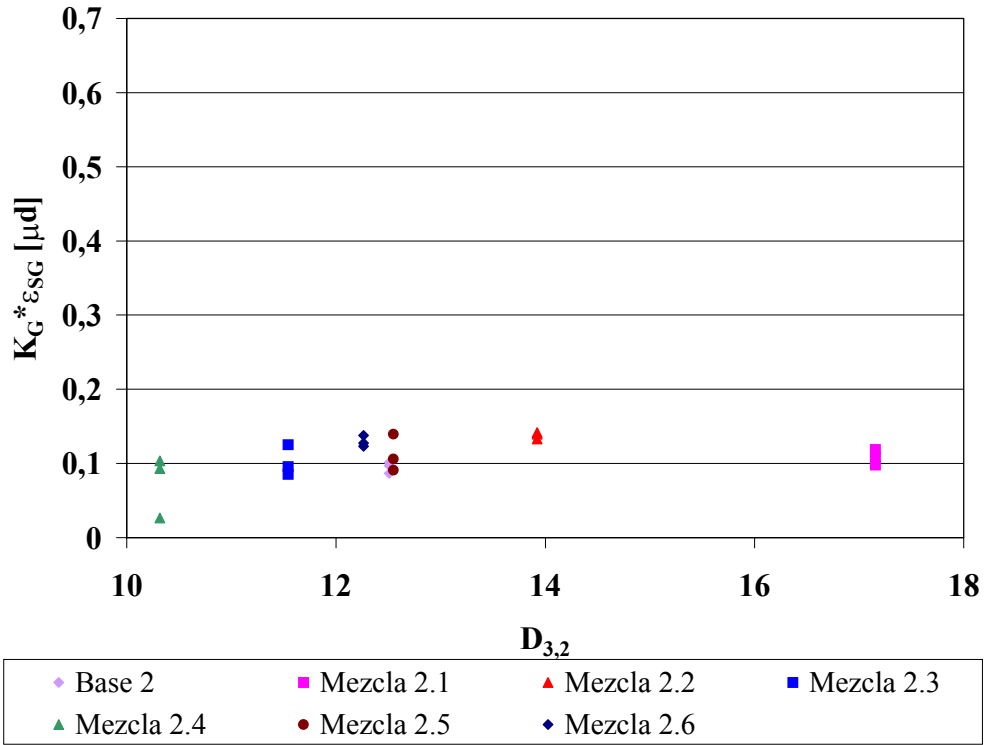


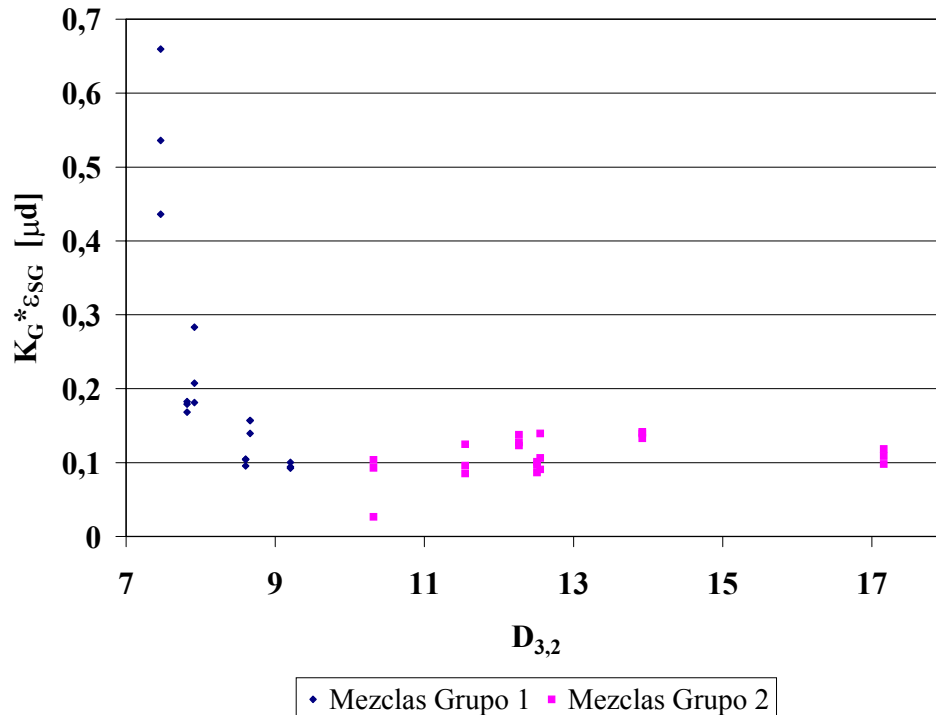
Figura 11.7. **Producto Permeabilidad-Solidosidad Global para las mezclas del Grupo 2.**

En la figura anterior se puede observar como el comportamiento del producto Permeabilidad-Solidosidad global tiende a ser constante al aumentar el diámetro  $D_{3,2}$ , siguiendo la tendencia de las mezclas del grupo 1, lo cual lleva a decir que a pesar de que existan en su mayoría partículas gruesas dentro de las mezclas, si las partículas finas se encuentran en un porcentaje adecuado (entre 6 y 13%) el revoque formado presentará un producto Permeabilidad-Solidosidad en un rango de  $0,05\mu d$  y  $0,2\mu d$  aproximadamente.

Seguidamente en la Figura 11.8 se muestran los valores del producto Permeabilidad-Solidosidad global para las mezclas del grupo 1 y 2 con sus



respectivas bases con el fin de poder apreciar de manera más clara la tendencia presentada al variar el tamaño  $D_{3,2}$ .



**Figura 11.8. Producto Permeabilidad-Solidosidad Global para las mezclas del Grupo 1 y Grupo 2.**

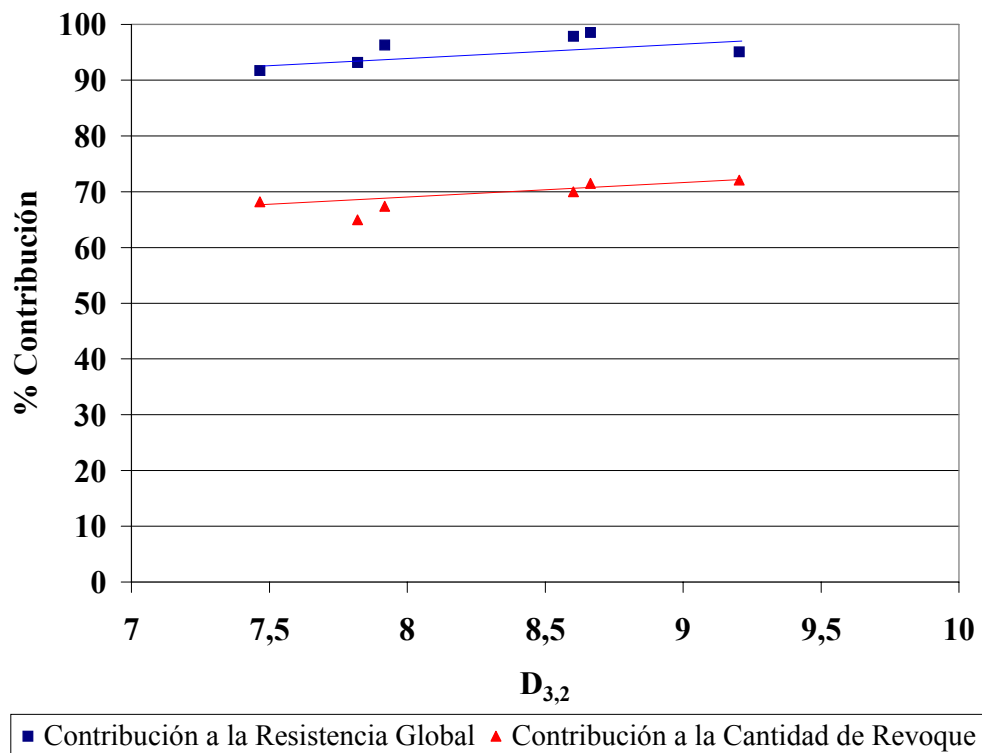
**11.5. Contribución de las zonas Darcyana e Incipiente a la Resistencia Global y a la cantidad de Revoque formado.**

Como se discutió anteriormente las dos zonas por las cuales está compuesta la filtración (Incipiente y Darcyana) están influenciadas por factores diferentes, y presentan comportamientos distintos, pero sin embargo se encuentran íntimamente relacionadas. La etapa incipiente se encuentra mayormente influenciada por la cantidad de partículas sellantes que están contenidas en el pseudo lodo, además de ser una etapa que se forma en un corto tiempo por esto es mucho más sensible a cambios en la granulometría y otras variables tales como: temperatura, presión, condiciones

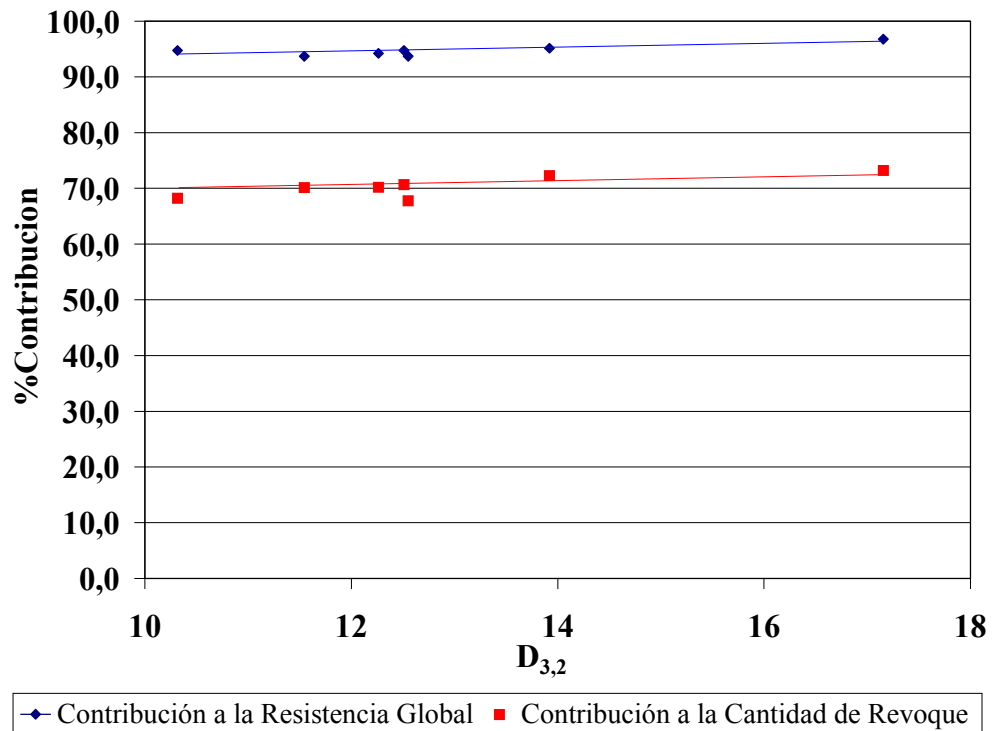
de agitación del pseudo lodo, abertura de la válvula de salida, etc, en cambio la etapa Darcyana aunque está directamente relacionada con la incipiente, la cantidad de finos o gruesos contenidos dentro de la mezcla dictará la pauta en cuanto a las características con que será formado el revoque, estos cambios y características se verán reflejados en la permeabilidad y altura que posea el revoque una vez finalizada la filtración.

### 11.5.1. Etapa Darcyana.

En la figura 11.9 (A y B) se muestra la contribución de la etapa Darcyana a la resistencia global y a la cantidad de revoque para las mezclas del Grupo 1 y mezclas del grupo 2 respectivamente en función de la variación del tamaño  $D_{3,2}$ .



**Figura 11.9A) Contribución a la Resistencia Global y a la Cantidad de Revoque de la Etapa Darcyana para mezclas del grupo 1.**



B)

**Figura 11.9. B) Contribución resistencia global y a la cantidad de revoque de la etapa Darcyana. Mezclas del Grupo 2.**

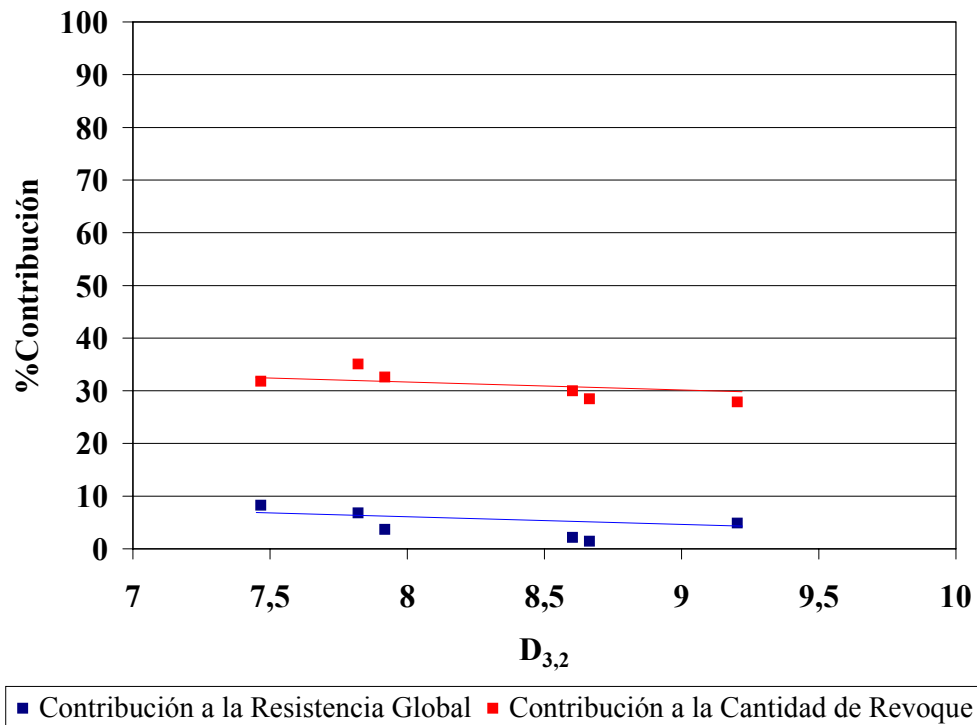
La etapa Darcyana es la que presenta una mayor contribución a la resistencia global, con porcentajes de contribución en el rango de 91% hasta 98% para las mezclas del grupo 1, observándose un comportamiento relativamente constante a medida que aumenta el tamaño  $D_{3,2}$ . En el caso de las mezclas del grupo 2 estas siguen un comportamiento similar con porcentajes que van desde 93% hasta 96% observándose que el rango de variación es menor al de las pruebas del grupo 1, apenas un 3%, comparado con 7%. Este comportamiento es consecuente con los resultados observados en los volúmenes de filtrado obtenidos ya que las pruebas del grupo 1 presentaron mayor variación que las del grupo 2.

Con respecto a la contribución porcentual de la zona Darcyana a la cantidad de revoque formado, según se observa en la figura 11.9 (A y B), esta etapa contribuye con una cantidad de revoque que se ubica entre 64% y 72% para las mezclas del

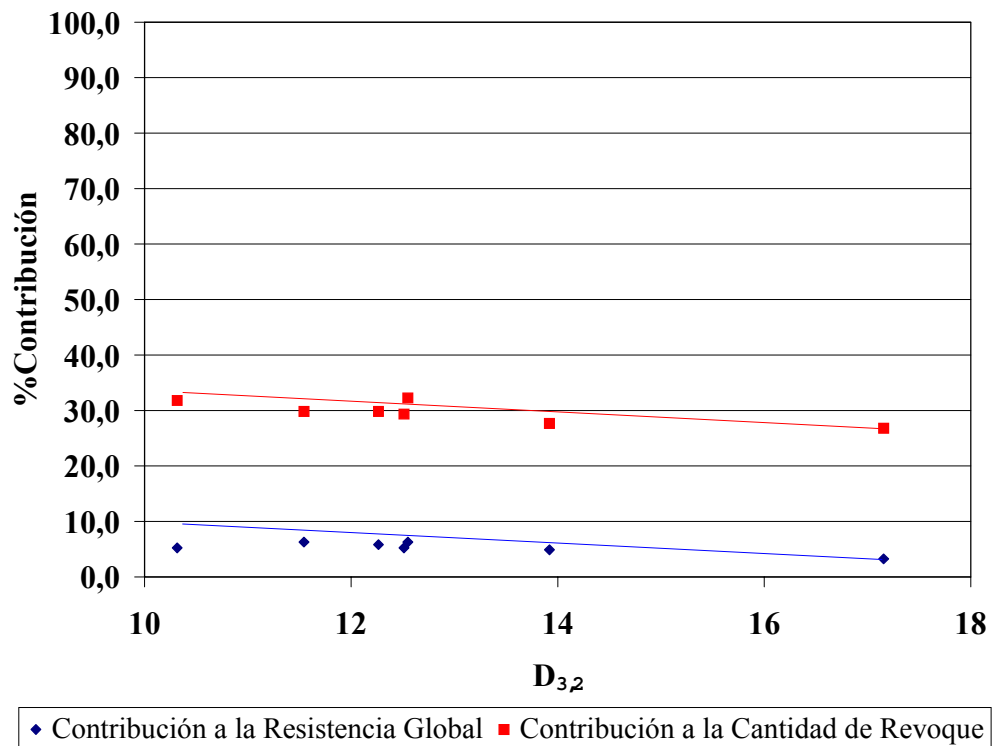
grupo 1, a pesar que la resistencia que ofrece esta cantidad de revoque es 91% hasta 98%. Las mezclas del grupo 2 se comportan de manera similar aportando entre 67% y 73% de la cantidad de revoque formado, observándose que la variación en los resultados es de un 6% para este grupo en comparación con el 7% de variación para las del grupo 1.

### 11.5.2. Etapa Incipiente.

A continuación en la figura 11.10 (A y B) se muestra la contribución de la etapa Incipiente a la resistencia global y a la cantidad de revoque para las mezclas del grupo 1 y mezclas del grupo 2 respectivamente en función de la variación del tamaño  $D_{3,2}$ .



**Figura 11.10.A) Contribución resistencia global y a la cantidad de revoque de la etapa Incipiente en Mezclas del Grupo 1**



B)

**Figura 11.10. B) Contribución resistencia global y a la cantidad de revoque de la etapa Incipiente en Mezclas del Grupo 2.**

Se puede observar en la figura 11.10(A) que la contribución porcentual de la etapa incipiente a la resistencia global y a la cantidad de revoque formado para las mezclas del grupo 1, se mantienen constantes al cambiar el tamaño  $D_{3,2}$ , obteniéndose valores que van desde 1.5% a 6.8% para la resistencia mientras que para la cantidad de revoque se tienen valores que van desde 27.9% hasta 35.1%. Observándose una relación entre la cantidad de revoque formado y la resistencia, donde se aprecia que a medida que aumenta la cantidad de revoque aumenta la resistencia.

Para el caso de las pruebas realizadas al Grupo 2, los resultados se muestran en la Figura 11.10 (B). De estos se desprende que la contribución de la etapa incipiente a la Resistencia Global se mantiene con una ligera tendencia a la baja a medida que se incrementa el  $D_{3,2}$ . Con valores que van desde 3.3% hasta 6.3%, con una diferencia de 3.0% entre el valor máximo y el mínimo.

Con respecto a la contribución de la etapa incipiente a cantidad de revoque formado se puede observar que la tendencia es similar a la que presenta la contribución a la Resistencia, es decir, ligeramente hacia la baja a medida que se aumenta el  $D_{3,2}$ . Los valores van desde 26.8% hasta 32.3% con una variación del 5.5%.

Lo que ocurre en la etapa incipiente es el taponamiento de los espacios vacíos que se encuentran en el medio filtrante, el revoque que se forma no es uniforme, por lo tanto la resistencia aumenta a medida que se sellan estos espacios, esto hace que la cantidad de material que se está depositando sobre el revoque tenga un efecto mínimo sobre la Resistencia. Mientras que en la etapa Darcyana el efecto sobre la Resistencia es mayor debido a que el revoque formado es uniforme.

## 12. CONCLUSIONES

Con base a los resultados obtenidos en el presente estudio de caracterización de revoques formados con Carbonato de Calcio Intecarb 10-15 y 30-35, mediante la adición de finos y gruesos, se concluye lo siguiente:

- 12.1. Durante el proceso de filtración de lodos de perforación sobre papel de filtro se definen claramente dos etapas: la etapa Incipiente, que se presenta en los primeros instantes de la formación del revoque, y la etapa Darcyana, que es la etapa final.
- 12.2. Las dos zonas por las cuales está compuesta la filtración (Incipiente y Darcyana) están influenciadas por factores diferentes, y presentan comportamientos distintos, pero íntimamente relacionadas..
- 12.3. Los volúmenes de filtrado en la etapa incipiente están directamente influenciados por la cantidad de partículas sellantes presentes en el pseudo lodo de perforación.
- 12.4. El Producto Permeabilidad-Solidosidad de la etapa Incipiente no muestra variaciones significativas con el aumento del tamaño  $D_{3,2}$  manteniéndose relativamente constante.
- 12.5. El Producto Permeabilidad-Solidosidad de la etapa Darcyana presenta una disminución a medida que aumenta el tamaño  $D_{3,2}$  hasta valores de  $8,5\mu\text{m}$  permaneciendo constante para valores mayores.
- 12.6. Existe un efecto de la adición de finos sobre el comportamiento de la etapa Darcyana en la formación del revoque.
- 12.7. No existe un efecto de la adición de gruesos en el Producto Permeabilidad-Solidosidad Darcyana.
- 12.8. Las mezclas cuyo tamaño  $D_{3,2}$  sea menor a  $8,5\mu\text{m}$  generan revoques con una alta permeabilidad.

- 12.9.** El tiempo incipiente obtenido para las mezclas preparadas a partir de la Base1, se ve afectado por la adición de finos y gruesos.
- 12.10.** La etapa Darcyana es la que presenta una mayor contribución a la resistencia global del revoque, llegando a valores del 98.5%, observándose un comportamiento relativamente constante a medida que aumenta el tamaño  $D_{3,2}$
- 12.11.** La contribución de la etapa Darcyana a la cantidad de revoque formado es aproximadamente 75%, manteniéndose constante a medida que aumenta el tamaño  $D_{3,2}$ .
- 12.12.** La contribución porcentual de la etapa incipiente a la resistencia global se mantiene constante al cambiar el tamaño  $D_{3,2}$ , obteniéndose valores que van desde 1.5% a 6.8%
- 12.13.** La contribución porcentual de la etapa incipiente a la cantidad de revoque se mantienen constantes al cambiar el tamaño  $D_{3,2}$ , obteniéndose valores que van desde 27.9% hasta 35.1%
- 12.14.** Existe una relación entre la cantidad de revoque formado y la resistencia al paso del fluido que ofrece este revoque, se aprecia que a medida que aumenta la cantidad de revoque aumenta la resistencia.



### **13. RECOMENDACIONES**

Con base a las observaciones realizadas durante las pruebas de filtración, así como las conclusiones a las cuales se ha llegado en este trabajo, se pueden hacer las siguientes recomendaciones:

- 13.1.** Realizar pruebas de caracterización de revoques con adición de finos llevando los valores de  $D_{3,2}$  por debajo de  $8,5\mu\text{m}$  con la finalidad de analizar el comportamiento de las mezclas.
- 13.2.** Efectuar las pruebas de filtración del pseudolodo evitando variaciones en la temperatura.
- 13.3.** Mantener agitación moderada del pseudolodo en los instantes de tiempo entre las pruebas de filtración.
- 13.4.** Diseñar las mezclas usando las curvas de Densidad de Distribución de Tamaño de partículas en vez de las curvas de Distribución Acumulada, para evitar los efectos de la bimodalidad sobre las mezclas preparadas.
- 13.5.** Realizar la limpieza del medio filtrante, una vez formado el revoque, eliminando totalmente los restos de revoque que puedan quedar en la superficie, para poder garantizar una adecuada determinación de la Resistencia del Medio.

#### **14. BIBLIOGRAFÍA.**

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Recommended practice standard procedure for testing oil-Based drilling fluids (RP 13B-2). Second edition. Washington DC, 1991.

ARIAS y UGAS. Efecto de la distribución de tamaño de partícula en la resistencia específica y porosidad de la torta. Trabajo Especial de Grado. UCV. Caracas, 1998.

BADGER Y BANCHERO, Ingeniería Química, McGraw Hill, México, 1964.

BAROID. Manual of drilling fluids technology. Volume I, Section III, 1974.

BIRD, Byron. Fenómenos de transporte. Nueva York. Editorial REVERTÉ., S.A. 1982.

CANAVOS, George. Probabilidad y estadística. Aplicaciones y métodos. Mc Grae Hill. México, 1993.

FOUST, Alan. Principios de Operaciones Unitarias. Editorial Continental C.A, México, 1984.

GARCÍA Y GIMÓN. Efecto del contenido de partículas finas en las características del revoque. Trabajo Especial de Grado. UCV. Caracas, 1999.

GRAY, George R. Composition and properties of oil well drilling fluids. Tercera edición, 1950.

HERNÁNDEZ, Anahis y Hernández Jorge. Efecto del contenido de partículas finas en las características del revoque. Trabajo especial de grado. UCV. Caracas, 2001.

MAGUAL, Alejandro y Johan Torres. Formación de revoques con esferas lisas de material sintético. Trabajo especial de grado, UCV. Caracas, 1998.

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.

M.I. Drilling Fluids Co. Drilling fluids engineering manual. Houston, 1991.

PERRY, R. Manual del Ingeniero Químico. Tomo V. Editorial McGraw Hill. 3<sup>ERA</sup> Edición. México. 1998

PESSOLANO, Gabriel. Caracterización de la etapa inicial de formación del revoque. Trabajo especial de Grado. UCV. Caracas, 2000.

PIERI Y SERRANO. 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.

ROCCARO, Vicenta. Filtración de lodo rojo. Trabajo de ascenso a profesor titular. Facultad de ingeniería. UCV. Caracas, 1997.

SALAS, Guillermo José. Petróleo. Ediciones Petroleras Fovines N° 1. Quinta Edición. 1980.

SKOOG, Douglas y Donald WEST, Fundamentos de Química Analítica. Editorial Reverté S.A.. España, 1977.

SORRENTINO, José. Monografía sobre flujo en medios porosos. Laboratorio de Separaciones Mecánicas de la UCV. Caracas, 1998.

SORRENTINO, José. Estudio de la formación de revoques de fluidos de perforación con sólidos de distintas granulometrías. Laboratorio de separaciones mecánicas de la UCV. Caracas, 1998.

SORRENTINO, José. Influencia de la distribución de tamaño de las partículas en la filtración. Laboratorio de separaciones mecánicas de la UCV. 1999

SORRENTINO y ANLAUF. Cake Filtration Technology for the Process Industry. Caracas, Venezuela. 1996.

SORRENTINO y ANLAUF. The use of particle size distribution for estimating cake permeability. Advances in Filtration and Separation, Vol. 14, pp. 917-925. Conference held during the Annual Meeting of the American Filtration and Separation Society, Myrtle Beach, March 14-17, 2000.

SORRENTINO, J y ANLAUF, H. The influence of particle size distribution on cake permeability. Proceedings of the Eightieth World Filtration Congress, Elsevier (Oxford). Conference held during the Congress, Brighthon, U.K., April 4-7,2000.

SORRENTINO, José. Método de análisis de la curva de filtración. UCV.2001.

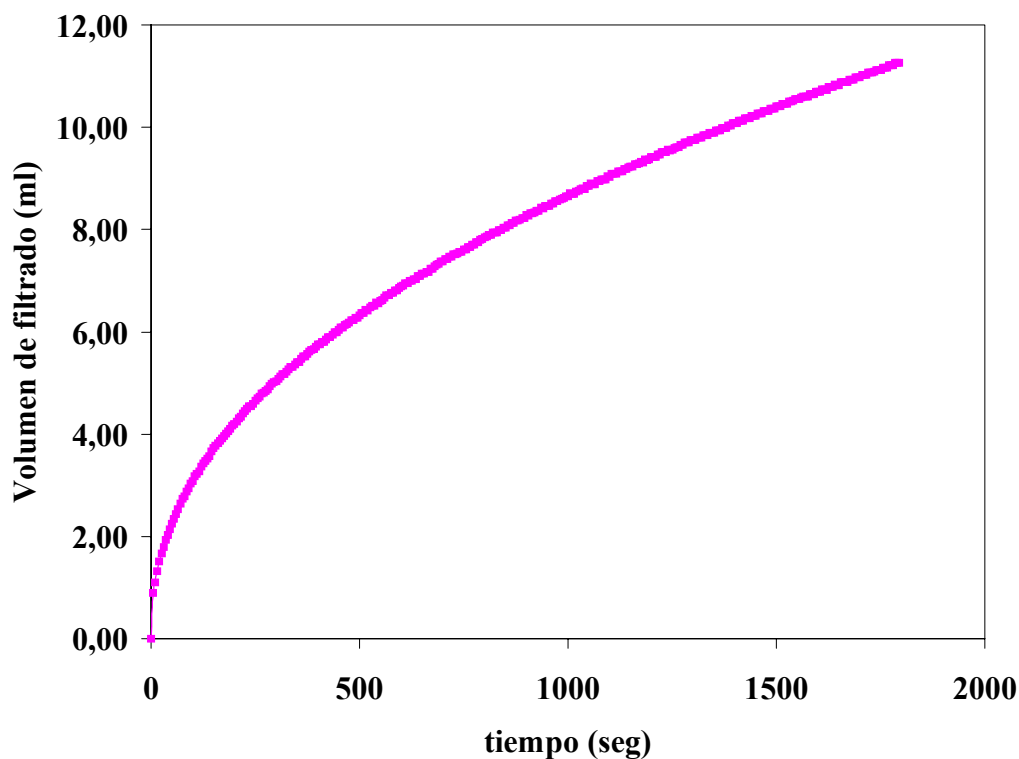
SVAROVSKY, L. Solid-Liquid Separation. 2<sup>DA</sup> edición. Butterworths, Londres. 1988.

## APÉNDICE A.1: CÁLCULOS TIPOS

Los cálculos tipos que se presentan a continuación están referidos a los datos obtenidos para la prueba de filtración # 1, realizada a la Base 2: Carbonato de Calcio Intecarb 3035.

### 1. Construcción de la curva de filtrado.

Los datos obtenidos de la filtración corresponden a la masa de filtrado a cada instante de tiempo, si se toma como densidad del filtrado la densidad del agua ( $1\text{g/cm}^3$ ), se transforman directamente en el volumen de filtrado en  $\text{cm}^3$ . Con los datos de volumen y el tiempo respectivo, se construye la curva de filtración. En la Figura A.1.1 se puede observar las curvas de filtración obtenidas para la Base 2.



**Figura A.1.1:** Volumen de filtrado en función del tiempo.

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

Esta prueba se hace luego de haber formado un revoque sobre el medio filtrante con la suspensión a analizar. Se remueve la capa de revoque y se limpia bien la superficie del filtro y luego se procede a realizar una prueba de permeación del medio filtrante. De donde se obtienen datos de masa de filtrado en función del tiempo.

### 2.1 Construcción de la gráfica $V_L$ vs $t$ .

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

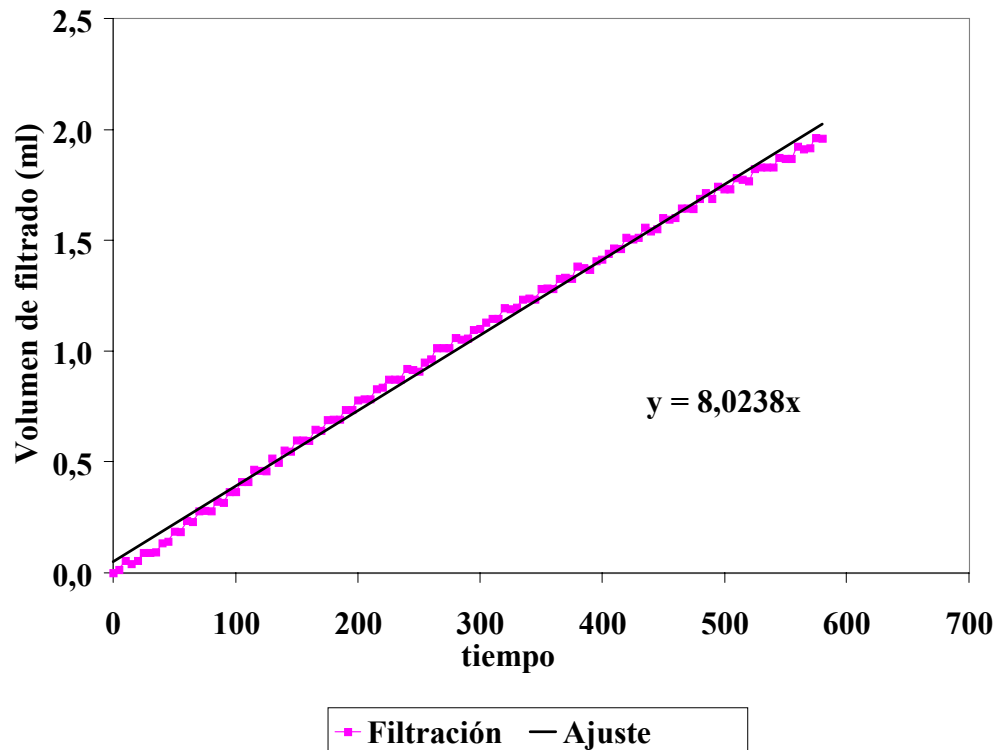


Figura A.1.2: Permeación del medio filtrante sucio.

## 2.2 Cálculo de la resistencia del medio filtrante.

Se tiene que la resistencia del medio filtrante viene dada por:

$$R_M = \frac{1}{\mu_a} \frac{A \cdot \Delta p}{\left[ \frac{dV_L}{dt} \right]_m}$$

Donde:

$\left[ \frac{dV_L}{dt} \right]_m$  = pendiente de la curva  $V_L$  vs.  $t$ .

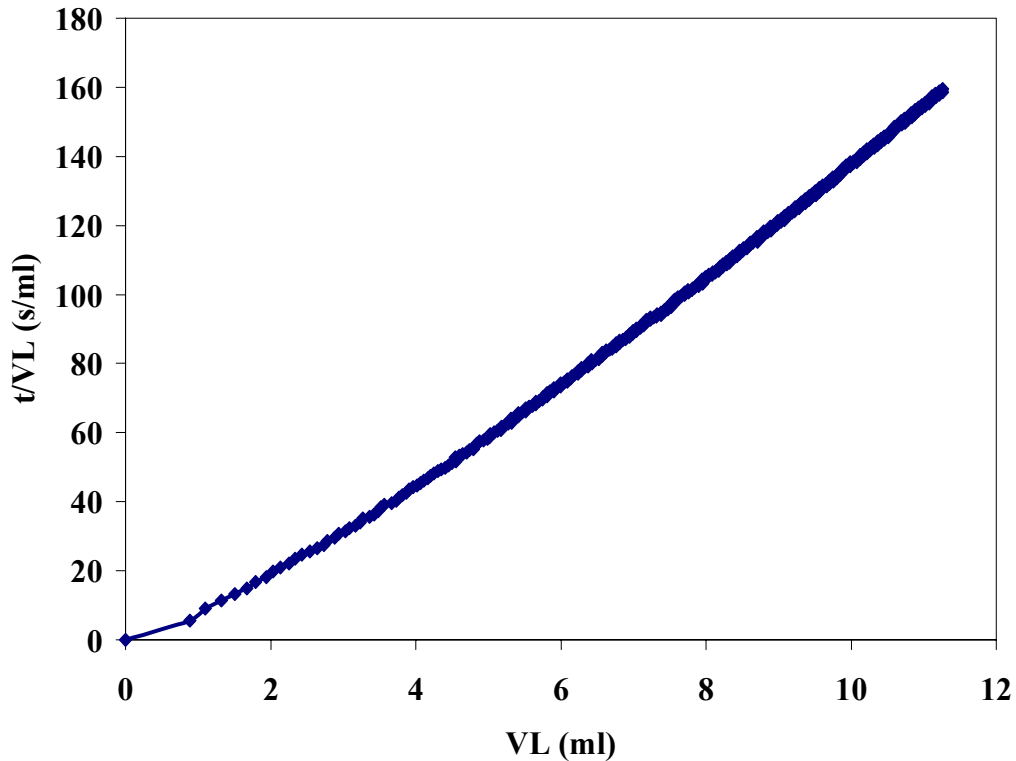
$$R_M = \frac{0.00224 m^2 \cdot 500 \text{ psi} \left( \frac{101300 Pa}{14.7 \text{ psi}} \right)}{0.001 Pa \cdot s \cdot 8.0238 \frac{cm^3}{s} \cdot 10^{-6} \frac{m^3}{cm^3}}$$

$$R_M = 9.62 * 10^{11} m^{-1}$$

Este valor de resistencia se utiliza como constante para todas las pruebas realizadas a la Base 2.

### 3. Identificación de la existencia de dos zonas en la curva de filtrado.

#### 3.1 Inspección del gráfico $t/V_L$ vs. $V_L$ .

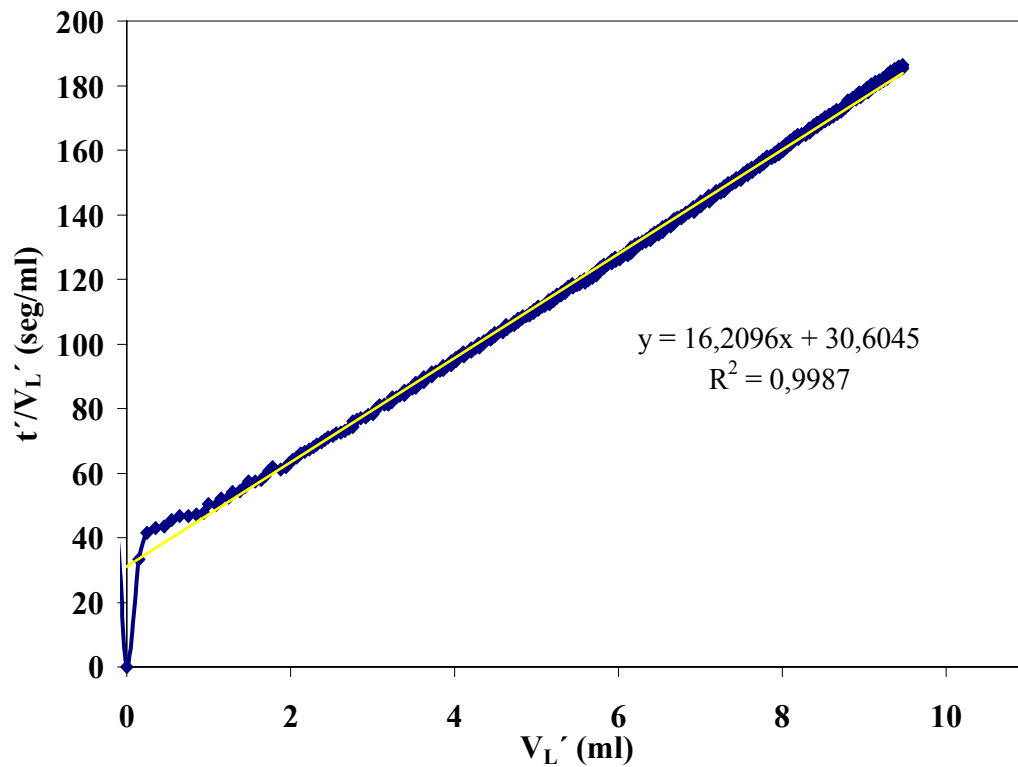


**Figura A.1.3:** Curva de Inspección de las dos zonas de la curva de filtrado

#### 3.2 Identificación de la zona Darcyana.

Esta se identifica mediante la construcción de la gráfica  $t'/V_L'$  en función de  $V_L'$ , con los datos obtenidos de la prueba de filtración del lodo, y luego se cambian los valores de  $V_{L0}$  (y su correspondiente  $t_0$ ) hasta que la mayor cantidad de los datos ajuste bien a una línea recta. De este modo se determinan  $t_0$  y  $V_{L0}$ .





**Figura A.1.4:** Gráfico  $t'/V_L'$  vs  $V_L'$  para la filtración de la Base 1.

Los valores obtenidos de  $t_o$  y  $V_{Lo}$  son:

$$t_o = 30 \text{ seg}$$

$$V_{Lo} = 1,789 \text{ ml}$$

3 Determinar la pendiente ( $a'$ ) y el punto de corte ( $b'$ ).

$$\frac{t'}{V'} = a' \cdot V' + b'$$

De la Figura A.1.4 se observa la ecuación de la recta que ajusta la mayoría de los puntos a una línea recta y los valores de la pendiente  $a'$  y el punto de corte  $b'$  son:

$$a' = 16.2096 \text{ seg} / \text{cm}^6 \text{ y } b' = 30.6045 \text{ seg} / \text{cm}^3 .$$

#### 4. Estimación de la viscosidad efectiva de la goma Xhantana.

Para este cálculo se supone que la resistencia global es igual para el caso de permeación con agua que para el momento final de la filtración.

##### 4.1 Caudal de filtrado para un tiempo t.

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

$$q_g = \frac{1}{A} \cdot \frac{dV}{dt} \Big|_{V_L=V'_L} = \frac{1}{0.00224m^2 \cdot \left( 2 \cdot 16.2096 \frac{s}{cm^6} \cdot 9.47cm^3 + 30.6045 \frac{s}{cm^3} \right)} \cdot 10^6 \frac{cm^3}{m^3}$$

$$q_g = 1.32 * 10^{-6} m / s$$

##### 4.2 Caudal de agua durante la permeación del revoque para un tiempo t.

Partiendo de los datos de la prueba de permeación del revoque, se construye la gráfica Volumen de filtrado en función del tiempo, y a partir de esta se puede determinar el caudal de agua como la pendiente de la curva de filtración dividido entre el área de filtración. En la Fig. A.1.5 se muestra el gráfico de permeación del revoque con agua.

$$q_a = \frac{1}{A} \cdot \frac{dV}{dt} \Big|_p$$

Donde:

$q_a$  = Caudal de agua ( $m^3/s$ )

$[dV_L/dt]_p$  = Pendiente de la curva  $V_L$  vs. t.

$$q_a = \frac{0.0034 \frac{cm^3}{s} \cdot 10^{-6} \frac{m^3}{cm^3}}{0.00224 m^2}$$

$$q_a = 1.52 \cdot 10^{-6} m/s$$

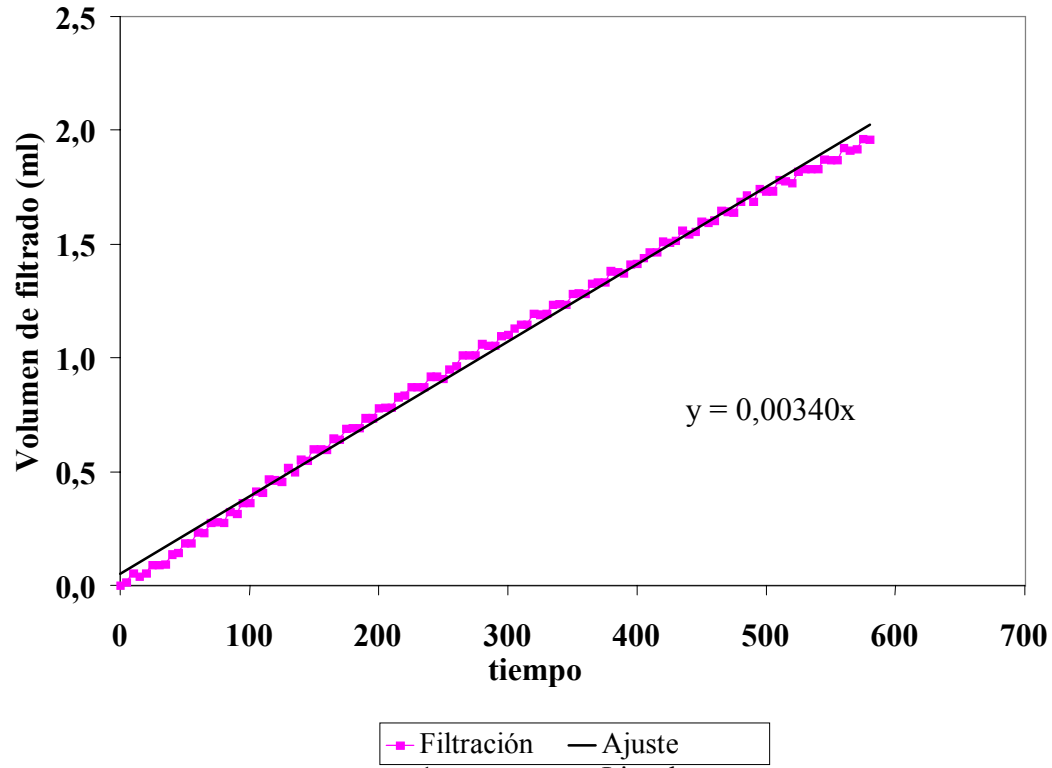


Figura A.1.5: Gráfico Volumen vs tiempo para la Permeación del revoque.

#### 4.3 Viscosidad efectiva de la goma Xhantana

$$\mu_g = \mu_a \cdot \frac{q_a}{q_g} = \mu_a \cdot \left( \frac{q_a}{A(2 \cdot a' \cdot V_L' + b')} \right)$$

$$\mu_g = 0.001 Pa \cdot s \cdot \frac{1.52 \cdot 10^{-6} m/s}{1.32 \cdot 10^{-6} m/s}$$

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

## 5. Determinación de la resistencia global.

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

$$R_{CG} = \frac{500 \text{ psi} \frac{101300 \text{ Pa}}{14.7 \text{ psi}} \cdot 0.00224 \text{ m}^2}{1.15 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}} \cdot \left( 2 \cdot 16.2096 \frac{\text{s}}{\text{cm}^6} \cdot 9.47 \text{ cm}^3 + 30.6045 \frac{\text{s}}{\text{cm}^3} \right) \cdot 10^6 \frac{\text{cm}^3}{\text{m}^3} - 9.62 \cdot 10^{11} \text{ m}^{-1}$$

$$R_{CG} = 2.27 \cdot 10^{15} \text{ m}^{-1}$$

## 6. Determinación de la resistencia incipiente.

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

$$R_{CI} = \frac{500 \text{ psi} \frac{101300 \text{ Pa}}{14.7 \text{ psi}} \cdot 0.00224 \text{ m}^2}{1.15 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}} \cdot 30.6045 \frac{\text{s}}{\text{cm}^3} \cdot 10^6 \frac{\text{cm}^3}{\text{m}^3} - 9.62 \cdot 10^{11} \text{ m}^{-1}$$

$$R_{CI} = 2.05 \cdot 10^{14} \text{ m}^{-1}$$

## 7. Determinación de la resistencia Darcyana.

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

$$R_{CD} = 2.27 \cdot 10^{15} \text{ m}^{-1} - 2.05 \cdot 10^{14} \text{ m}^{-1}$$

$$R_{CD} = 2.06 \cdot 10^{15} \text{ m}^{-1}$$

## 8. Contribución porcentual de cada zona a la resistencia global.

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

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

$$\%R_{CD} = \frac{2.06 * 10^{15} m^{-1}}{2.27 * 10^{15} m^{-1}} \cdot 100$$

$$\%R_{CD} = 90.97\%$$

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

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

$$\%R_{CI} = \frac{2.05 * 10^{14} m^{-1}}{2.27 * 10^{15} m^{-1}} \cdot 100$$

$$\%R_{CI} = 9.03\%$$

## 9. Contribución porcentual de cada zona a la cantidad de revoque.

### 9.1 Contribución porcentual de la zona darcyana a la cantidad de revoque.

$$\%m_{CD} = \frac{m_{CD}}{m_{CG}} \cdot 100$$

$$\%m_{CD} = \frac{3892gr}{5251gr} \cdot 100$$

$$\%m_{CD} = 74.10\%$$

## 9.2 Contribución porcentual de la zona incipiente a la cantidad de revoque.

$$\%m_{CI} = \frac{m_{CI}}{m_{CG}} \cdot 100$$

$$\%m_{CI} = \frac{1358gr}{5251gr} \cdot 100$$

$$\%m_{CI} = 26.90\%$$

## 10. Determinación de los parámetros de concentración.

### 10.1 Sólidosidad.

$$\varepsilon_s = \frac{M_s}{\rho_s \cdot A \cdot h_c}$$

$$\varepsilon_s = \frac{0.001176Kg}{2711 \frac{Kg}{m^3} \cdot 0.00224m^2 \cdot 0.406mm \cdot \frac{1m}{1000mm}}$$

$$\varepsilon_s = 0.478$$

### 10.2 Concentración de sólidos en la suspensión original.

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

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

$$\phi_s = 0.032$$

### **10.3 Capa.**

$$\kappa = \left[ \frac{\varepsilon_s}{\phi_s} - 1 \right]^{-1}$$

$$\kappa = \left[ \frac{0.478}{0.032} - 1 \right]^{-1}$$

$$\kappa = 0.071$$

### **10.4 Factor de corrección, $\chi_\omega$**

$$\chi_\omega = \frac{1}{1 - \frac{\phi_s}{\varepsilon_s}}$$

$$\chi_\omega = \frac{1}{1 - \frac{0.032}{0.478}}$$

$$\chi_\omega = 1.071$$

### **10.5 Relación masa de torta seca - volumen de filtrado**

$$\omega = \rho_s \cdot \phi_s \cdot X_\omega$$

$$\omega = 2.711 \text{ gr/cm}^3 \cdot 0.032 \cdot 1.071$$

$$\omega = 0.092 \text{ gr/cm}^3 = 92.00 \text{ Kg/m}^3$$

## **11. Estimación de la permeabilidad de la etapa Darcyana.**

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

Para ello se está suponiendo que la porosidad determinada al final de la filtración corresponde con la porosidad de la zona darcyana, lo cual no es cierto por: a) la masa de sólidos incluye la masa depositada en la etapa incipiente y b) la altura del revoque se mide luego de despresurizar lo que incluye la posible expansión plástica del revoque.

$$K_D = \frac{1.15 * 10^{-3} Pa \cdot s \cdot 0.071}{2 \cdot (0.00224 m^2)^2 \cdot 500 psi \frac{101300 Pa}{14.7 psi} \cdot 16.2096 \frac{s}{cm^6} \cdot 10^{12} \frac{cm^6}{m^6}} \cdot \frac{1 \mu d}{10^{18} m^2}$$

$$K_D = 1.476 * 10^{-1} \mu d$$

## 12. Estimación de la movilidad de la etapa Darcyana.

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

$$\frac{K_D}{\mu_g} = \frac{0.071}{2 \cdot (0.00224 m^2)^2 \cdot 500 psi \frac{101300 Pa}{14.7 psi} \cdot 16.2096 \frac{s}{cm^6} \cdot 10^{12} \frac{cm^6}{m^6} \cdot \frac{1000 cp}{1 Pa \cdot s}} \cdot \frac{1 \mu d}{10^{18} m^2}$$

$$\frac{K_D}{\mu_g} = 0.129 \mu d / cp = 1.29 * 10^{-1} \mu d / cp$$

## 13. Estimación de la resistencia específica de la etapa Darcyana.

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

$$\alpha_{CD} = \frac{2 \cdot (0.00224 m^2)^2 \cdot 500 psi \frac{101300 Pa}{14.7 psi} \cdot 16.2096 \frac{s}{cm^6} \cdot 10^{12} \frac{cm^6}{m^6}}{1.15 * 10^{-3} Pa \cdot s \cdot 92.00 \frac{Kg}{m^3}}$$

$$\alpha_{CD} = 5.30 * 10^{15} \frac{m^{-1}}{Kg/m^2}$$



**14. Producto permeabilidad – solidosidad de la zona Darcyana.**

$$K_D \varepsilon_S = \frac{1}{\rho_S \cdot \alpha_{CD}}$$

$$K_D \varepsilon_S = \frac{1}{2711 \frac{Kg}{m^3} \cdot 5.30 * 10^{15} \frac{m^{-1}}{Kg/m^2}} \cdot \frac{1 \mu d}{10^{18} m^2}$$

$$K_D \varepsilon_S = 7.05 * 10^{-2} \mu d$$

**15. Masa de torta seca por unidad de área de la zona Darcyana.**

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

$$m_{CD} = \frac{92 Kg / m^3 \cdot 9.470 * 10^{-6} m^3}{0.00224 m^2}$$

$$m_{CD} = 389,25 * 10^{-3} Kg / m^2 = 389,25 g / m^2$$

**16. Masa de torta seca por unidad de área global.**

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

$$m_{CG} = \frac{0.001176 Kg}{0.00224 m^2}$$

$$m_{CG} = 525.1 * 10^{-3} Kg / m^2 = 525.10 g / m^2$$

**17. Estimación de la resistencia específica global.**

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

$$\alpha_{CG} = \frac{2.268 * 10^{15} m^{-1}}{5.251 * 10^{-2} Kg / m^2}$$

$$\alpha_{CG} = 4.319 * 10^{15} \frac{m^{-1}}{Kg/m^2}$$

**18. Producto solidosidad-permeabilidad global.**

$$K_G \varepsilon_S = \frac{1}{\rho_S \cdot \alpha_{CG}}$$

$$K_G \varepsilon_S = \frac{1}{2711 Kg/m^3 \cdot 4.319 * 10^{15} \frac{m^{-1}}{Kg/m^2}} * 10^{18} \frac{\mu d}{m^2}$$

$$K_G \varepsilon_S = 8.652 * 10^{-2} \mu d$$

**19. Estimación de la resistencia especifica Incipiente.**

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

$$\alpha_{CI} = \frac{2.047 * 10^{14} m^{-1}}{525.1 * 10^{-3} Kg/m^2 - 389.2 * 10^{-3} Kg/m^2}$$

$$\alpha_{CI} = 1.506 * 10^{15} \frac{m^{-1}}{Kg/m^2}$$

**20. Producto solidosidad-permeabilidad Incipiente.**

$$K_I \varepsilon_S = \frac{1}{\rho_S \cdot \alpha_{CI}}$$

$$K_I \varepsilon_S = \frac{1}{2711 Kg/m^3 * 1.506 * 10^{15} \frac{m^{-1}}{Kg/m^2}} * 10^{18} \frac{\mu d}{m^2}$$

$$K_I \varepsilon_S = 24.8 * 10^{-2} \mu d$$

**APENDICE A.2. DISTRIBUCION DE TAMAÑO DE PARTICULAS DE LAS MEZCLAS.**

**Tabla A.2.1.** Distribución de tamaño de Partícula para las mezclas del Grupo 1.

Tamaño de Partícula [µm]	Mezclas del Grupo 1						
	BASE 1	Mezcla 1.1	Mezcla 1.2	Mezcla 1.3	Mezcla 1.4	Mezcla 1.5	Mezcla 1.6
0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,63	0,08	0,00	0,09	0,00	0,00	0,08	0,00
0,71	0,22	0,00	0,25	0,06	0,00	0,22	0,07
0,80	0,46	0,01	0,51	0,19	0,02	0,47	0,22
0,89	0,74	0,01	0,80	0,42	0,10	0,77	0,45
1,00	1,06	0,01	1,13	0,70	0,25	1,10	0,73
1,12	1,40	0,02	1,46	1,05	0,49	1,46	1,07
1,26	1,77	0,02	1,80	1,49	0,83	1,84	1,47
1,42	2,16	0,03	2,15	2,03	1,33	2,23	1,97
1,59	2,60	0,04	2,50	2,69	2,01	2,66	2,57
1,78	3,10	0,07	2,86	3,49	2,92	3,12	3,30
2,00	3,66	0,12	3,24	4,44	4,08	3,64	4,16
2,24	4,31	0,21	3,65	5,54	5,50	4,22	5,17
2,52	5,06	0,36	4,10	6,80	7,17	4,90	6,30

**Tabla A.2.1.** Distribución de tamaño de Partícula para las mezclas del Grupo 1.

(Continuación)

2,83	5,92	0,58	4,63	8,20	9,07	5,69	7,56
3,17	6,92	0,90	5,26	9,73	11,16	6,63	8,95
3,56	8,07	1,36	6,03	11,40	13,42	7,75	10,45
3,99	9,40	2,06	7,00	13,20	15,82	9,09	12,08
4,48	10,94	3,06	8,22	15,14	18,31	10,68	13,84
5,02	12,72	4,42	9,75	17,22	20,89	12,57	15,78
5,64	14,78	6,19	11,65	19,48	23,55	14,79	17,92
6,32	17,14	8,37	13,98	21,94	26,29	17,36	20,31
7,10	19,85	11,14	16,78	24,63	29,14	20,29	23,02
7,96	22,92	14,59	20,08	27,59	32,14	23,60	26,09
8,93	26,38	18,69	23,89	30,84	35,31	27,26	29,59
10,02	30,23	23,45	28,19	34,40	38,69	31,24	33,54
11,25	34,46	28,80	32,94	38,28	42,30	35,50	37,96
12,62	39,05	34,63	38,08	42,47	46,16	39,98	42,82
14,16	43,94	40,80	43,50	46,92	50,24	44,61	48,08
15,89	49,06	47,14	49,10	51,59	54,53	49,32	53,63
17,83	54,35	53,44	54,76	56,40	58,97	54,04	59,35
20,00	59,69	59,51	60,35	61,26	63,48	58,70	65,08
22,44	65,00	65,15	65,77	66,08	67,98	63,26	70,68
25,18	70,15	70,19	70,90	70,76	72,38	67,65	75,97
28,25	75,06	74,58	75,68	75,21	76,61	71,86	80,82
31,70	79,63	78,39	80,03	79,37	80,58	75,85	85,13
35,57	83,79	81,80	83,93	83,16	84,24	79,60	88,82
39,91	87,48	84,97	87,35	86,55	87,53	83,09	91,88
44,77	90,67	88,05	90,29	89,51	90,43	86,30	94,32
50,24	93,34	90,99	92,77	92,04	92,90	89,21	96,19
56,37	95,49	93,56	94,81	94,14	94,95	91,80	97,57
63,25	97,17	95,70	96,43	95,84	96,59	94,04	98,54
70,96	98,39	97,26	97,68	97,17	97,84	95,92	99,18
79,62	99,23	98,26	98,60	98,18	98,75	97,42	99,59
89,34	99,75	98,81	99,24	98,90	99,36	98,55	99,83
100,24	99,95	99,15	99,66	99,39	99,73	99,33	99,95
112,47	100,00	99,39	99,89	99,71	99,92	99,79	100,00
126,19	100,00	99,60	99,98	99,89	99,99	99,98	100,00
141,59	100,00	99,78	100,00	99,97	100,00	100,00	100,00
158,87	100,00	99,90	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
178,25	100,00	99,97	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
200,00	100,00	99,99	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
224,40	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
251,79	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
282,51	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
316,98	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
355,66	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
399,05	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
447,74	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
502,38	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

**Tabla A.2.1.** Distribución de tamaño de Partícula para las mezclas del Grupo 1.  
(Continuación)

563,68	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
632,46	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
709,63	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
796,21	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
893,37	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1002,37	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1124,68	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1261,91	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1415,89	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1588,66	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1782,50	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
2000,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

**Tabla A.2.2.** Distribución de tamaño de Partícula para las mezclas del Grupo 2.

Tamaño de Partícula [ $\mu\text{m}$ ]	Mezclas del Grupo 2						
	BASE 2	Mezcla 2.1	Mezcla 2.2	Mezcla 2.3	Mezcla 2.4	Mezcla 2.5	Mezcla 2.6
0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,63	0,08	0,02	0,06	0,08	0,00	0,05	0,05
0,71	0,20	0,05	0,16	0,21	0,06	0,15	0,15
0,80	0,39	0,11	0,31	0,41	0,18	0,31	0,30
0,89	0,60	0,18	0,49	0,63	0,35	0,49	0,48
1,00	0,84	0,28	0,69	0,86	0,56	0,71	0,68
1,12	1,10	0,40	0,89	1,10	0,80	0,94	0,90
1,26	1,37	0,54	1,11	1,35	1,09	1,21	1,14
1,42	1,67	0,72	1,35	1,61	1,43	1,50	1,41
1,59	2,00	0,94	1,62	1,89	1,87	1,84	1,73
1,78	2,37	1,21	1,92	2,21	2,41	2,23	2,10
2,00	2,78	1,53	2,25	2,60	3,09	2,67	2,55
2,24	3,23	1,87	2,60	3,05	3,90	3,16	3,05
2,52	3,73	2,21	2,97	3,60	4,87	3,70	3,62
2,83	4,26	2,51	3,35	4,26	5,98	4,29	4,24
3,17	4,84	2,59	3,72	5,03	7,22	4,92	4,90
3,56	5,45	2,59	4,10	5,92	8,60	5,59	5,60
3,99	6,11	2,59	4,49	6,95	10,08	6,31	6,33
4,48	6,82	2,59	4,90	8,11	11,66	7,09	7,10

**Tabla A.2.2.** Distribución de tamaño de Partícula para las mezclas del Grupo 2.

(Continuación)

5,02	7,59	2,59	5,37	9,41	13,31	7,94	7,93
5,64	8,46	2,62	5,93	10,84	15,03	8,90	8,84
6,32	9,44	2,82	6,64	12,42	16,80	10,00	9,86
7,10	10,58	3,30	7,58	14,13	18,63	11,26	11,06
7,96	11,91	4,16	8,80	15,98	20,52	12,75	12,48
8,93	13,49	5,52	10,39	17,98	22,49	14,49	14,20
10,02	15,35	7,47	12,41	20,15	24,55	16,53	16,28
11,25	17,55	10,10	14,93	22,50	26,73	18,90	18,77
12,62	20,12	13,45	17,98	25,07	29,08	21,61	21,72
14,16	23,09	17,52	21,57	27,87	31,61	24,69	25,14
15,89	26,49	22,27	25,68	30,95	34,37	28,11	29,04
17,83	30,32	27,60	30,27	34,32	37,39	31,87	33,39
20,00	34,57	33,40	35,26	38,03	40,69	35,93	38,14
22,44	39,20	39,50	40,56	42,06	44,28	40,25	43,23
25,18	44,16	45,75	46,08	46,43	48,17	44,78	48,58
28,25	49,40	52,00	51,70	51,10	52,35	49,48	54,10
31,70	54,83	58,12	57,33	56,02	56,78	54,30	59,70
35,57	60,34	64,00	62,86	61,12	61,40	59,18	65,28
39,91	65,83	69,54	68,22	66,28	66,14	64,06	70,74
44,77	71,18	74,69	73,32	71,41	70,89	68,88	75,98
50,24	76,28	79,40	78,09	76,36	75,54	73,58	80,87
56,37	81,00	83,63	82,45	81,01	79,97	78,07	85,30
63,25	85,28	87,35	86,36	85,25	84,06	82,27	89,20
70,96	89,01	90,55	89,75	88,97	87,73	86,11	92,49
79,62	92,17	93,22	92,61	92,14	90,90	89,52	95,13
89,34	94,72	95,38	94,93	94,70	93,52	92,44	97,13
100,24	96,69	97,05	96,73	96,67	95,60	94,83	98,52
112,47	98,11	98,27	98,06	98,11	97,16	96,71	99,40
126,19	99,05	99,10	98,97	99,06	98,27	98,08	99,87
141,59	99,63	99,64	99,54	99,64	99,01	99,02	99,98
158,87	99,89	99,88	99,87	99,89	99,47	99,60	100,00
178,25	100,00	100,00	100,00	100,00	99,75	99,89	100,00
200,00	100,00	100,00	100,00	100,00	99,90	99,99	100,00
224,40	100,00	100,00	100,00	100,00	99,97	100,00	100,00
251,79	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
282,51	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
316,98	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
355,66	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
399,05	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
447,74	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
502,38	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
563,68	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
632,46	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
709,63	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
796,21	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
893,37	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1002,37	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1124,68	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1261,91	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1415,89	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1588,66	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1782,50	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
2000,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

APENDICE A.3. CURVAS DE FILTRACIÓN.

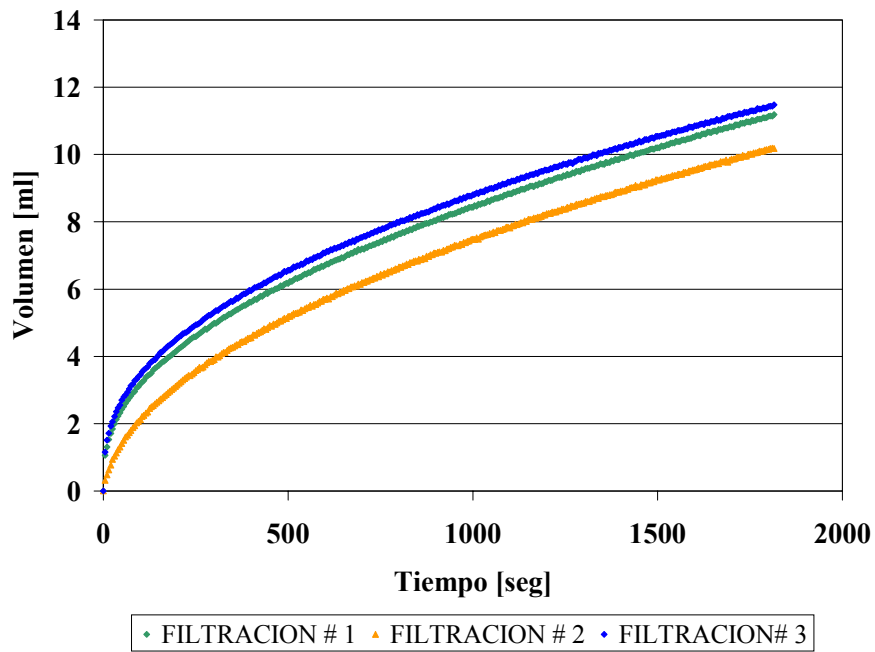


Figura A.3.1. Curva de Filtración de la Base 1.

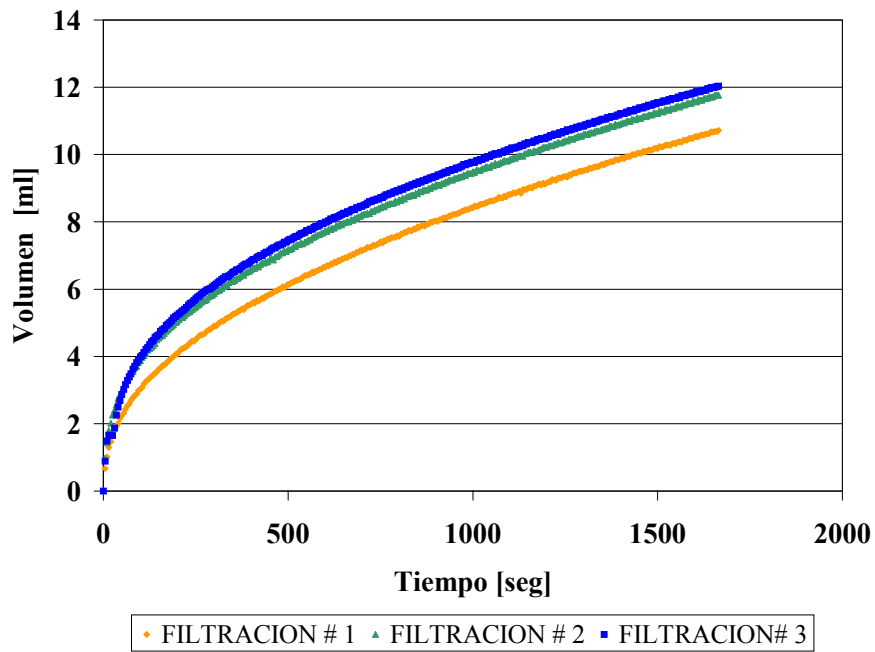


Figura A.3.2. Curva de Filtración de la Mezcla 1.2.



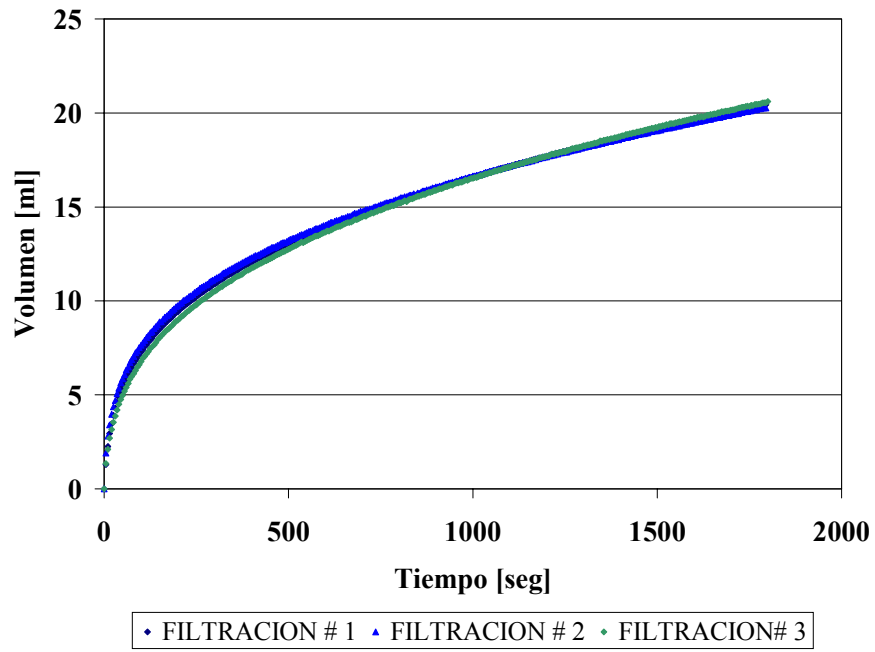


Figura A.3.3. Curva de Filtración de la Mezcla 1.3.

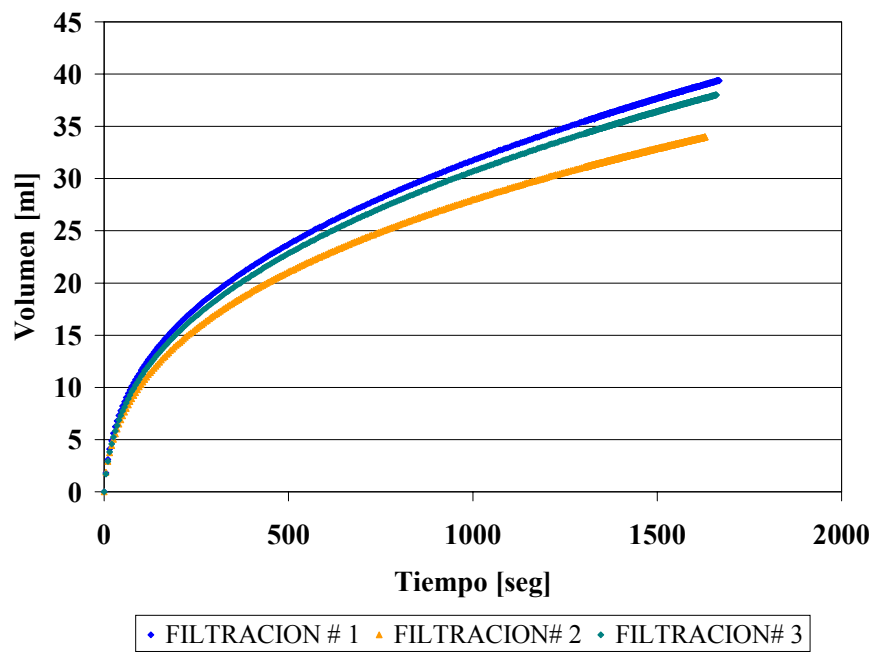


Figura A.3.4. Curva de Filtración de la Mezcla 1.4.

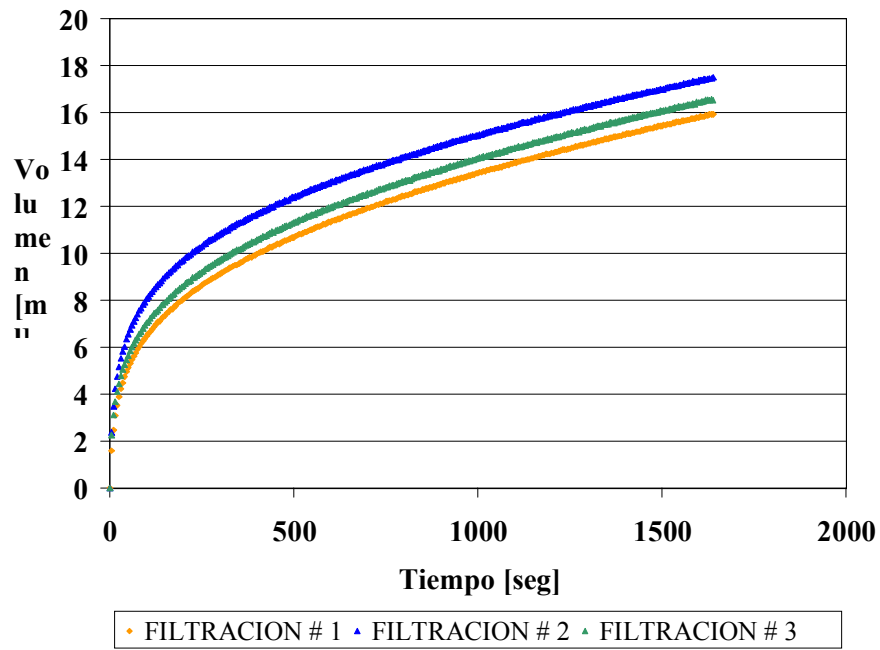


Figura A.3.5. Curva de Filtración de la Mezcla 1.5.

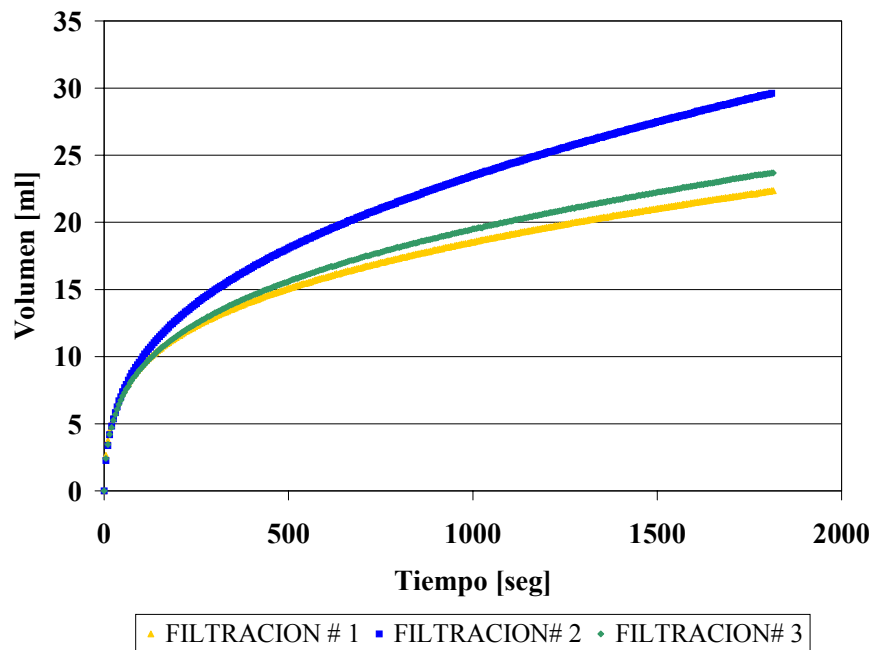


Figura A.3.6. Curva de Filtración de la Mezcla 1.6.

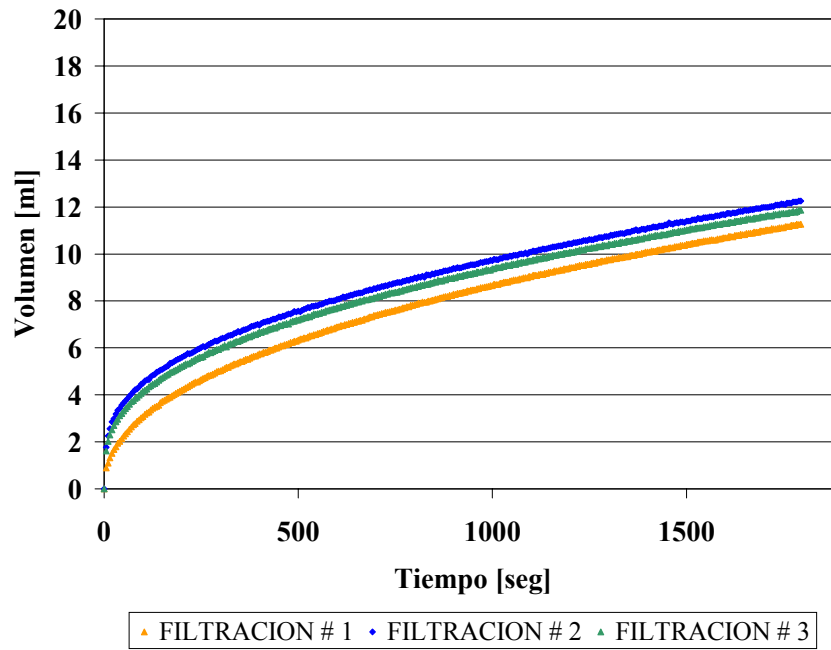


Figura A.3.7. Curva de Filtración de la Base 2.

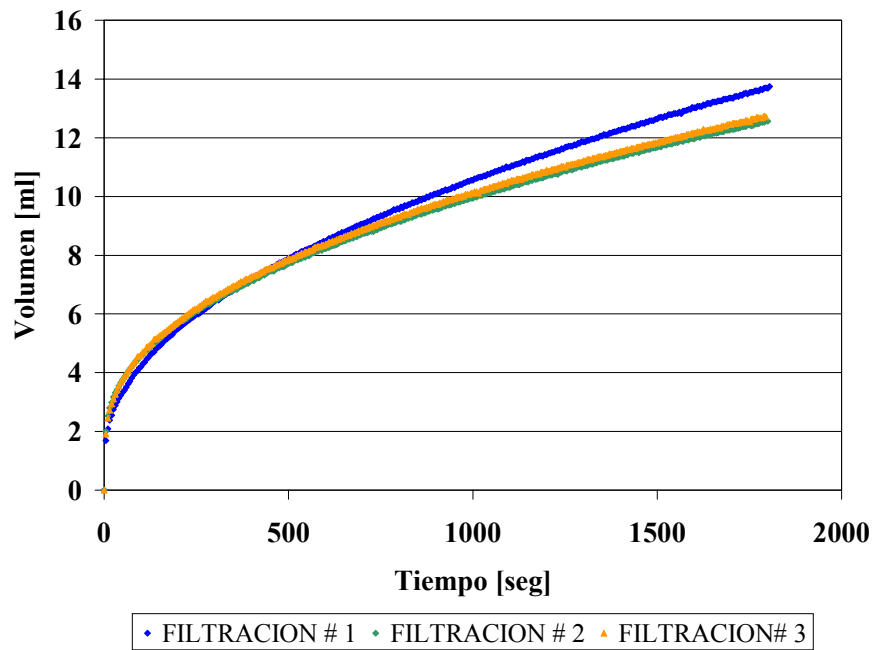


Figura A.3.8. Curva de Filtración de la Mezcla 2.1.

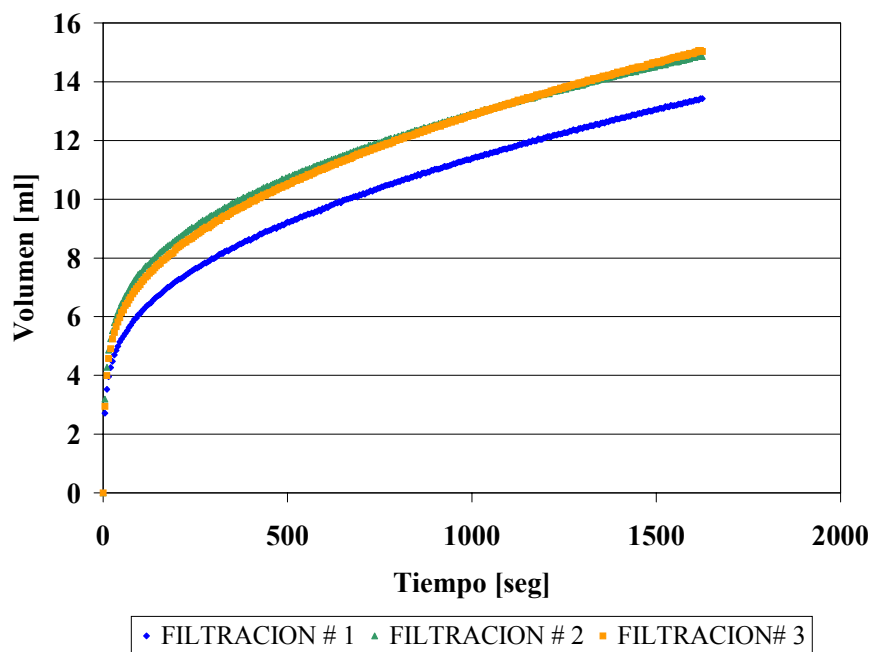


Figura A.3.9. Curva de Filtración de la Mezcla 2.2

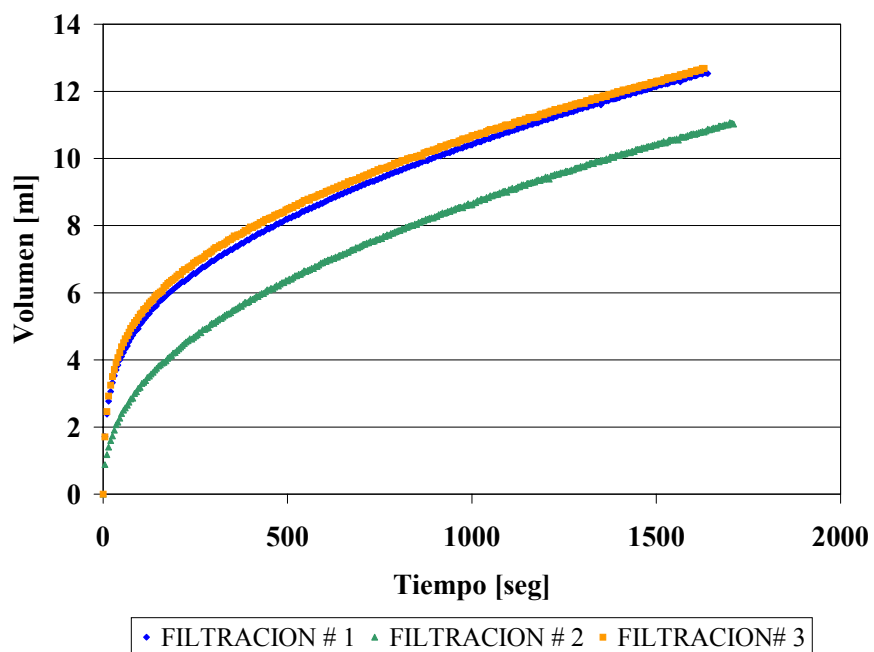


Figura A.3.10. Curva de Filtración de la Mezcla 2.3.

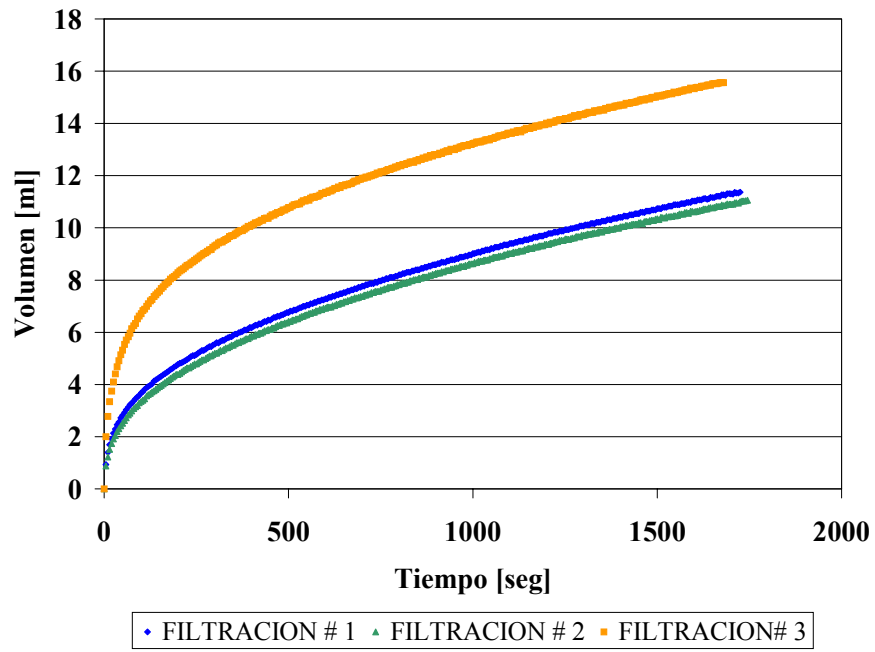


Figura A.3.11. Curva de Filtración de la Mezcla 2.4

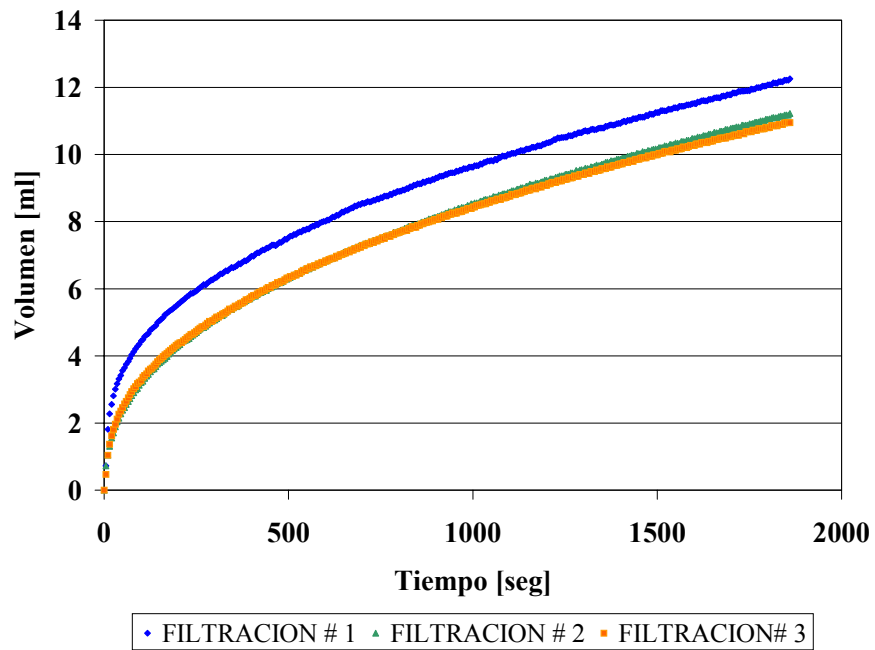
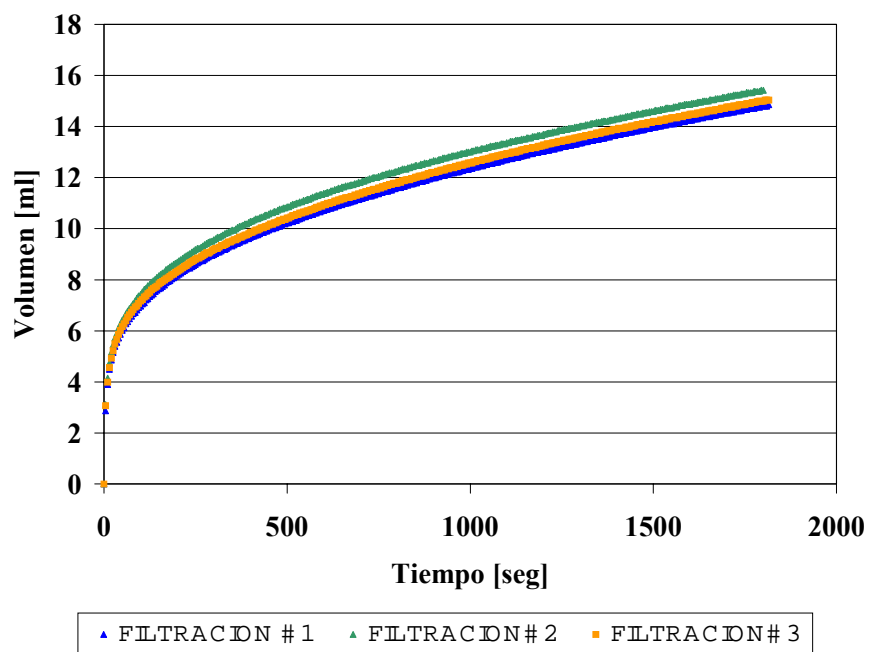


Figura A.3.12. Curva de Filtración de la Mezcla 2.5.



**Figura A.3.13.** Curva de Filtración de la Mezcla 2.6.

**APENDICE A.4 PRODUCTO PERMEABILIDAD-SOLIDOSIDAD.**

**Tabla A.4.1.** Producto Permeabilidad-Solidosidad Para las Mezclas del Grupo 1

Mezcla	D [3,2]	Producto Permeabilidad-Solidosidad		
		Incipiente $K_I * e_S$	Darcyana $K_D * e_S$	Global $K_G * e_S$
Base 1	8,602	1,342	0,071	0,096
		2,010	0,074	0,104
		1,136	0,073	0,105
Mezcla 1.2	9,203	0,636	0,075	0,093
		0,853	0,075	0,100
		0,389	0,067	0,094
Mezcla 1.3	7,820	0,915	0,118	0,182
		1,292	0,118	0,168
		0,695	0,134	0,179
Mezcla 1.4	7,466	1,829	0,403	0,536
		1,699	0,341	0,436
		2,809	0,460	0,659
Mezcla 1.5	8,664	4,325	0,089	0,157
		5,173	0,083	0,157
		4,497	0,081	0,140
Mezcla 1.6	7,918	3,088	0,119	0,181
		1,553	0,219	0,283
		1,753	0,139	0,208

**Tabla A.4.2.** Producto Permeabilidad-Solidosidad Para las Mezclas del Grupo 2

Mezcla	D [3,2]	Producto Permeabilidad-Solidosidad		
		Incipiente $K_I * e_s$	Darcyana $K_D * e_s$	Global $K_G * e_s$
Base 2	12,510	0,248	0,070	0,087
		1,590	0,073	0,101
		0,663	0,068	0,097
Mezcla 2.1	17,157	44,885	0,093	0,119
		0,654	0,073	0,098
		0,597	0,081	0,109
Mezcla 2.2	13,921	1,142	0,077	0,133
		1,539	0,074	0,140
		1,230	0,086	0,142
Mezcla 2.3	11,543	0,742	0,081	0,125
		0,420	0,073	0,096
		0,319	0,071	0,085
Mezcla 2.4	10,317	0,119	0,020	0,026
		0,552	0,066	0,093
		0,995	0,074	0,104
Mezcla 2.5	12,550	0,666	0,105	0,139
		0,415	0,071	0,091
		0,624	0,066	0,106
Mezcla 2.6	12,264	0,617	0,085	0,127
		1,170	0,078	0,138
		1,413	0,069	0,123



**APENDICE A.5. CONTRIBUCION PORCENTUAL DE CADA ZONA A LA RESISTENCIA GLOBAL Y A LA CANTIDAD DE REVOQUE.**

**Tabla A.5.1.** Contribución a la Resistencia Global, Contribución a la Cantidad de Revoque para las mezclas del Grupo 1.

Mezcla	D [3,2]	Resistencia Global		Cantidad de Revoque	
		Darcyana % R <sub>CD</sub>	Incipiente % R <sub>CI</sub>	Darcyana % m <sub>CD</sub>	Incipiente % m <sub>CI</sub>
Base 1	8,602	97,8	2,2	70,0	30,0
Mezcla 1.2	9,203	95,1	4,9	72,1	27,9
Mezcla 1.3	7,820	93,2	6,8	64,9	35,1
Mezcla 1.4	7,466	91,7	8,3	68,2	31,8
Mezcla 1.5	8,664	98,5	1,5	71,5	28,5
Mezcla 1.6	7,918	96,3	3,7	67,4	32,6

**Tabla A.5.2.** Contribución a la Resistencia Global, Contribución a la Cantidad de Revoque para las mezclas del Grupo 2.

Mezcla	D [3,2]	Resistencia Global		Cantidad de Revoque	
		Darcyana % R <sub>CD</sub>	Incipiente % R <sub>CI</sub>	Darcyana % m <sub>CD</sub>	Incipiente % m <sub>CI</sub>
Base 2	12,510	94,8	5,2	70,7	29,3
Mezcla 2.1	17,157	96,7	3,3	73,2	26,8
Mezcla 2.2	13,921	95,1	4,9	72,3	27,7
Mezcla 2.3	11,543	93,7	6,3	70,2	29,8
Mezcla 2.4	10,317	94,7	5,3	68,2	31,8
Mezcla 2.5	12,550	93,7	6,3	67,7	32,3
Mezcla 2.6	12,264	94,2	5,8	70,2	29,8