

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

### **FORMACIÓN DE REVOQUES SOBRE DISCOS POROSOS UTILIZANDO INTECARB (grados 20-25 y 40-45) CON ADICIÓN DE FINOS Y GRUESOS**

Tutores: Ing. José Angel Sorrentino  
Ing. Salvatore Valentino

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de  
Venezuela para optar al Título  
de Ingeniero Químico  
Por los Brs. Salazar C. Yoraima I.  
Valero S. Ada Y.

Caracas, Diciembre de 2001.



Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela Química, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por las Bachilleres, titulado:

**“Formación de revoques sobre discos porosos utilizando  
Intecarb 20-25, 40-45 con adición de finos y gruesos”**

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

Prof. José Papa  
Jurado

Prof. Berenice Blanco  
Jurado

Prof. José Sorrentino  
Tutor Académico

Prof. Salvatore Valentino  
Tutor Académico



Salazar C., Yoraima I.

Valero S., Ada Y.

**FORMACIÓN DE REVOQUES SOBRE DISCOS POROSOS  
UTILIZANDO INTECARB 20-25, 40-45 CON ADICIÓN DE FINOS  
Y GRUESOS**

**Tutor académico: Prof. José Sorrentino, Prof. Salvatore Valentino. Tesis.**

**Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ing. Química. Año 2001,237p.**

Palabras claves: **daño a la formación, revoque, tamaño de partícula, compresibilidad, permeabilidad, solidosidad, partículas formadoras de puente, goma Xanthana.**

**RESUMEN.** La etapa de perforación es fundamental en la productividad de un pozo petrolero, ya que puede generar *daño a la formación* reduciendo la capacidad de producción, debido a la invasión de partículas que conforman el fluido utilizado en dicha actividad.

Una manera de minimizar estos daños es a través de la generación de una capa delgada, lisa e impermeable denominada *revoque*, la cual se obtiene a partir de una suspensión de sólidos contenidos en dicho fluido(lodo).

Para la realización de este estudio se consideró la influencia del *tamaño de partícula* de los sólidos que conforma el fluido de perforación en las características de los revoques formados en el proceso de filtración, además de un estudio de *compresibilidad*. Ambas pruebas se llevaron a cabo en celdas HPHT a 30°C.

Las pruebas de compresibilidad se realizaron para 50, 100,200,300,400 y 500 psi.



Uno de los parámetros más importantes en el mencionado estudio es el producto *permeabilidad-solidosidad*. Para el caso de compresibilidad se observó una disminución de éste a medida que la diferencia de presión aplicada aumenta, excepto para valores de 500 psi, donde él crece, tal como lo observaron Pérez y Meza. Por otra parte se compararon los valores experimentales con 2 modelos empíricos-Tiller y Lewis-, arrojando como conclusión el hecho de que los revoques son compresibles en el rango de presiones estudiado.

El diseño de las mezclas se basó en el *porcentaje de partículas formadoras de puentes(%FP)*, en las cuales el producto permeabilidad-solidosidad de las extremas(menor y mayor porcentaje), varió alrededor de 3 órdenes de magnitud y presentó un aumento a medida que crece el tamaño promedio de las partículas  $D_{3,2}$ ; contrario a lo que sucede con el %FP, para el que disminuye a medida que éste aumenta.

Por otro lado se observó que el parámetro  $K_{\epsilon s}/D_{3,2}^2$ , logra establecer semejanzas con el modelo propuesto por Carman-Kozeny para tamaños grandes de partículas, es decir existe un tamaño en el cual la permeabilidad del revoque comienza a ser independiente del  $D_{3,2}$ .

También se determinó que la masa atrapada en los discos aumenta a medida que se emplean granulometrías con mayor cantidad de %FP.

Finalmente se recomienda desarrollar una metodología de análisis sobre filtraciones en discos porosos que tome en cuenta la existencia de los sólidos presentes en el medio filtrante y en el filtrado, además de precisar el comportamiento de la *goma Xanthana* (componente importante en la elaboración del lodo o fluido de perforación).



## DEDICATORIA

A **Dios y a la Virgen** por darme fuerza y constancia que una vez dí por perdidas.

A mi **Madre**, esa mujer especialmente luchadora y maravillosa que es capaz de darme hasta su vida con tal de verme feliz.

A una persona maravillosa, incondicional, que ha sido pilar fundamental en mi vida a lo largo de mi carrera y que me ha confirmado que todo esfuerzo tiene una recompensa, mi **Esposo Edgar Eduardo**.

A ti **Papá**, a quien he demostrado la capacidad que tenemos los seres humanos de triunfar en la vida.

A mi **Abuela y segunda Madre Guillermina**, de quien creo haber heredado el empuje y tesón que he necesitado durante todo este tiempo.

A mi **Abuelita Rosa**, que desde donde está estoy segura celebra este triunfo conmigo, porque también es de ella.

A quienes recuerdo todos los días de mi vida y me concedieron el Honor de representarlas en el aula de clases y me acompañaron durante mis años de estudio, mis **inolvidables amigas Nathaly, Patricia y la Gorda**.

**Los Amo**



## DEDICATORIA

A **mi mano derecha, Dios** y a **La virgen de Belén**, quienes me dieron la fortaleza y protección que tanto necesite para lograr alcanzar esta meta.

A mis **Padres** (*Maria y Juan*) los seres más especiales e importantes de mi vida . Que con su amor desde mi nacimiento me brindaron la mas grande de las protecciones y los mejores consejos, siempre con la intención de formarme como un buen ser humano. **Mami**, para mi eres y serás lo mas lindo que Dios me dio y *te amo* como a nadie en este mundo.

A mis **hermanos, mi abuela Maria y mis sobrinitos** que forman parte de mi corazón y mi vida.

A alguien muy especial que conocí pocos años, pero que esta en mi recuerdo y que por Dios necesitarla en el cielo se la llevo, **mi abue Catalina**. *Gracias* abue por darme el mejor papa del mundo.

A *mi mejor amiga*, **Marisela**, alguien que con solo escucharla me brinda paz y alegría.



## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar agradezco a **Dios y a la Virgencita** por permitirme lograrlo.

Por supuesto tengo que agradecer a mi **mami Myriam**, quien luchó junto a mí para alcanzar esta importante meta.

No puedo dejar de nombrar una vez más a **mivi**, quien es nada menos que mi **Esposo**, quien forma parte importante en mi crecimiento como persona y como profesional.

Por lo general suelo equivocarme al juzgar a las personas que apenas conozco, pero esta vez me siento satisfecha de haber contado al principio con una gran compañera y ahora amiga, quien es también autora de este gran esfuerzo, mi **amiga Ibis**.

Es imposible olvidar a mis tutores formales y no formales. Es el caso del señor **José Sorrentino**, quien fue casualmente el primer profesor que me dio clases al ingresar a la escuela; (¡y vaya que repetidas veces!) y quien es casualmente la persona que me dió el chance de culminar exitosamente mi carrera, al lado de una persona que comenzó también siendo sólo eso, un tutor, y a quien hoy día tengo que agradecerle por haberme ofrecido también su amistad, me refiero a **Salvatore Valentino**.

Por último y no menos importante debo nombrar a una persona que ha demostrado ser intachable desde todo punto de



vista y por quien guardo una especial admiración, estoy refiriéndome al **profe Lezama**, Muchas Gracias.

Quizá de una manera menos formal, pero no menos importante también debo agradecer a mis compañeros de escuela que me auparon a lo largo de todo el trayecto de mi tesis, entre ellos: al a veces insoportable pero muy querido amigo **Living** (alias Alberto), a quien le secuestré su laptop por muchos días, a una de las últimas adquisiciones en materia de amistad, quien pasó tantas noches en vela al igual que Ibis y yo, hablo de mi amiga **Moiras**.

También agradezco a mis compañeros del L.S.M: los chicos de post-grado por habernos echado el primer empujoncito, a **Alvaro** y **Odilo** por permitirnos preguntarles millones de veces entre otras cosas lo del programa de mezclas, así como a **Florimar**, a **Narciso**, quien a pesar de algunas restricciones (por llamarlo de alguna forma), siempre fue un buen ejemplo de trabajo, a los técnicos del laboratorio **Isaí y Yumaiti**, quienes a pesar de la hora y del ánimo y del clima siempre estuvieron dispuestos a ayudarnos en momentos de desesperación ante la cantidad de trabajo que aún nos quedaba por hacer.

Un agradecimiento enorme para alguien muy especial, quien me brindo mucha ayuda y apoyo, **Iraida**.

También agradezco a mi tocaya y compañera **Ada Ramírez**, quien siempre transmitió ánimo de lucha y esperanza por llegar finalmente a la meta.



Ah! también debo agradecer a la **Familia Capriles**, especialmente a los Sres. **Irma y Edgar** quienes me abrieron las puertas de su casa de manera incondicional.

Y por supuesto un agradecimiento especial a toda mi **Familia**, comenzando por mis Padres, tíos, abuela y a todas aquellas personas que estoy segura siempre creyeron en mí.

A todos **Muchísimas Gracias.**



## AGRADECIMIENTOS

A mi mejor amigo en todo momento: **Dios**, que cuando sentía temores, me bastaba con pensar en que él estaba conmigo y todo me salía bien, llenándome de fuerzas y así poder continuar.

A mi **Ángel de la Guarda** por protegerme en todo momento.

A mi **mami y mi papi**, mis dos grandes columnas, quienes se merecen el universo entero, por amarme tanto y confiar en mí en todo momento.

Es increíble que en mi corazón hayan tantos sentimientos hacia tantas personas que no se imaginan que con solo darme un abrazo me brindaban fuerzas y positivismo. Entre ellas están, mi **Profe** (Leandro Lezama) alguien que nunca olvidare porque fue como un padre para mí, escuchando todas mis locuras y aceptando de una forma muy bonita mi manera de ser. A **Salva** (Salvatore) por ser un buen tutor y gran amigo en todo momento.

A dos personitas a quienes aprecio mucho y que sin esperar nada a cambio nos brindaron (a Ada y a mí) mucha ayuda, apoyo y cariño; (**Mois y Living**) descubrir la amistad sincera en ustedes fue lo más bonito que me pasó durante la tesis. Espero recuerden los momentos que vivimos aquellas madrugadas trabajando y escuchando todos los C.D, hasta que **Alberto** (Living) decía “¡Bis quita esos C.D pavosos!!!” solo porque eran de música romántica. A **Moiras** (Mois) y Living les digo que pueden contar conmigo en todo momento y que les brindo mi amistad siempre.



Como no pueden faltar, mi gente linda del L.S.M **Adita Ramírez**, quien compartió días de trabajo arduo junto a nosotras y me dio lindas palabras de apoyo y amistad, no olvidare su pasión al hablar. A *Florimar, Chuchu, Andrés, Yumaiti, Isai, Gloria, Alvaro, Odilo* y la profesora Nólides por ser muy especiales conmigo. Al profesor Sorrentino por darme la oportunidad de realizar este importante trabajo de investigación. A los muchachos de Post-Grado, *Tibi* (una lindísima persona), *Janeth, Yosmar, Dennis, Willman*, y a mi Ken (*Mario Alayon*), gracias por decirme la Barbie del grupo y por entrenarnos como lo hicieron. A Narciso por brindarnos apoyo y ayuda.

A **Iraidita**, quien me brindo lindas palabras en todo momento y muchos abrazos cuando mas los necesite.

A mis amigas de la residencia, *Rosa virginia, Gabi, Caro, Ma Gabriela, Alexandra, Maruja, Ma Luz*; quienes estuvieron pendiente de mi avance en la tesis.

A ti **Adita**, porque además de ser una buena compañera de tesis, fuiste amiga y uno de mis principales empujes en todo momento, siempre recordare los momentos que pasamos juntas. Nunca olvides que cuentas conmigo siempre.

A mi amiga **Yerli**, un ser tan bonito que me ha brindado mucho apoyo, me ha dado fuerzas para seguir adelante, gracias por ser mi amiga Yerlita (*mi china!!*).

A mi gran amiga, **Carmen Rosa**, alguien a quien admiro mucho y que me brindo su confianza y su incondicionalidad en



todo momento. Carmen Rouse, se que eres un poquito peleoncita, y así, sabes que te quiero.

A **Virgi**, mi mejor compañera de clases, por brindarme su cariño y su mano amiga durante muchos años en mi carrera.

A **Marisela** mi mejor amiga, que como nadie sabe lo difícil que fue para mi esta lucha por lo que estaba viviendo en esos momentos. Mari, para mi eres unos de los seres más especiales que existe en el mundo.

A las personas que cuyos nombres se me escapan en este momento y que en segundos o minutos de conversación me brindaron buenos consejos y apoyo.

Por último, unas bonitas gracias a alguien muy especial para mi, que lamentablemente solo existió por tres días en Diciembre y que por brindarme tanta ternura dos días antes de mi tesis, me levante con una energía y alegría enorme el día de mi presentación, a ti, **S.B.**

A todos ***muchísimas gracias!!!!!!***



## ÍNDICE GENERAL

<b>Contenido</b>	<i>Página</i>
LISTA DE TABLAS.....	xviii
LISTA DE FIGURAS.....	xx
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xxv
1.INTRODUCCIÓN.....	1
2.PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
3.OBJETIVOS.....	7
4.MARCO TEÓRICO.....	8
4.1 Perforación Petrolera.....	8
4.2 Lodos de perforación.....	12
4.2.1 Composición de los lodos de perforación.....	13
4.2.2 Propiedades de los lodos de perforación.....	17
4.2.2.1 Densidad.....	17
4.2.2.2 Reología.....	18
4.2.2.3 Viscosidad.....	22
4.2.2.4 Fuerza de gelatinización.....	23
4.2.2.5 Propiedad de retención de pared.....	24
4.2.2.6 Contenido de arena.....	25
4.2.2.7 Valor de pH.....	25
4.3 Fundamentos de filtración.....	26
4.3.1 Ley de Darcy.....	27
4.3.2 Formación de la torta de filtración.....	31
4.3.3 Ecuación fundamental para la formación de la torta.....	35
4.3.3.1 Filtración a Presión constante.....	37
4.3.3.2 Método de formación de torta.....	40



4.3.3.2.1 Método lineal.....	40
4.3.3.2.2 Método cuadrático.....	41
4.3.3.3 Método de permeación de torta.....	41
4.3.4 Porosidad.....	42
4.3.5 Permeabilidad.....	43
4.3.6 Compresibilidad de tortas.....	46
4.3.7 Flujo a través de tortas compresibles.....	46
4.3.8 Método de cálculo para la compresibilidad de las tortas.....	48
4.4 Proceso de filtración en pozos.....	50
4.4.1 Requerimientos para la filtración.....	51
4.4.2 Tipos de filtración que ocurren en los pozos.....	51
4.5 Teoría de la doble permeabilidad.....	53
4.5.1 Formación del revoque.....	54
4.5.2 Efecto de la presión sobre el revoque.....	59
4.6 Daño a la formación por efectos de la filtración.....	60
4.6.1 Causas básicas del daño de formación.....	61
4.6.2 Daño causado por la invasión de partículas sólidas presentes en el lodo hacia la formación.....	62
4.6.3 Daño causado por invasión de filtrado de lodo.	63
4.7 Procedimiento para el análisis de los datos de la curva de filtrado .....	64
4.8 Distribución de tamaño de partícula .....	71
4.8.1 Caracterización del tamaño de partícula .....	72
4.8.2 Descripción del tamaño de partícula .....	72
4.8.3 Medidas de tendencia central .....	75
4.8.4 Métodos de medición para determinar el tamaño de partículas .....	79
4.8.4.1 Tamizado .....	79



4.8.4.2 Difracción láser .....	80
5. ANTECEDENTES.....	82
6. EQUIPO EXPERIMENTAL.....	85
6.1 Equipos de generación y medición de fracciones estrechas.....	85
6.1.1 Tamizador Oscilatorio.....	85
6.1.2 Clasificador Centrífugo.....	86
6.1.3 Tamizador Vibratorio.....	88
6.1.4 Analizador de tamaño de partícula Mastersizer 2000.....	89
6.2 Equipos de preparación y filtración del pseudo-lodo.....	91
6.2.1 Medidor de pH.....	91
6.2.2 Agitadores.....	92
6.2.3 Equipo de filtración estática HPHT.....	93
6.2.4 Balanza con desecador infrarrojo.....	95
6.2.5 Divisor de muestras PT 1000.....	97
6.2.6 Micrómetro.....	98
7. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	99
7.1 Procedimiento de obtención del material.....	99
7.1.1 Tamizado vía seca.....	99
7.1.2 Clasificador Centrífugo.....	101
7.1.3 Tamizado vía húmeda.....	103
7.2 Pruebas sobre discos porosos.....	105
7.2.1 Diseño y Simulación de mezclas.....	105
7.2.2 Preparación de mezclas.....	105
7.2.3 Medición de la distribución del tamaño de partícula.....	106
7.2.4 Preparación del lodo de perforación.....	106



---

7.2.5 Permeación del medio limpio.....	109
7.2.6 Filtración del lodo sobre discos.....	111
7.2.7 Permeación del revoque sobre discos.....	113
7.2.8 Permeación del medio sucio (discos).....	114
7.2.9 Secado de los discos.....	116
7.2.10 Lavado de los discos.....	117
7.3 Pruebas de Compresibilidad.....	118
7.3.1 Preparación de lodo de perforación .....	119
7.3.2 Filtración del lodo sobre papel.....	122
7.3.3 Permeación de medio sucio (papel).....	124
8. METODOLOGÍA Y PLAN DE EXPERIENCIAS .....	126
9. ANÁLISIS DE DATOS.....	134
10 ANÁLISIS DE DATOS DE PRUEBAS PRELIMINARES....	147
10.1 Evaluación de la permeabilidad de discos porosos .....	147
10.2 Medición de la densidad de la solución agua- goma.....	148
10.3 Selección de las presiones de trabajo en las filtraciones sobre discos porosos.....	148
10.4 Balance de masa.....	149
11. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	151
11.1 Compresibilidad.....	151
11.2 Porosidad.....	155
11.3 Permeabilidad Darcyana sobre discos porosos..	159
11.4 Permeabilidad incipiente sobre discos porosos ..	166
11.5 Permeabilidad global sobre discos porosos.....	167
11.6 Empleo del parámetro $K_{D_{65}}/D_{3,2}^2$ .....	169
11.7 Masa invasora.....	171



12.CONCLUSIONES.....	174
13.RECOMENDACIONES.....	177
14.BIBLIOGRAFÍA.....	179
APÉNDICES	
APÉNDICE A:Datos de filtración.....	182
APÉNDICE B:Resumen de Resultados.....	196
APÉNDICE C:Masa invasora y Goma Xanthana.....	207
APÉNDICE D:Cálculos tipo.....	212
APÉNDICE E:Distribución de frecuencia acumulada para las granulometrías empleadas.....	231
APÉNDICE F:Altura y Masa de los revoques.....	241
APÉNDICE G:Parámetros aplicados a la DTP de las diferentes granulometrías.....	243



## LISTA DE TABLAS

NÚMERO	TÍTULO	PÁGINA
4.1	Lista de definiciones de diámetros de esferas equivalentes	73
4.2	Lista de diámetros de círculo equivalente	74
4.3	Lista de diámetros estadísticos	75
4.4	Tipos de medias	79
9.1	Nomenclatura de mezclas diseñadas	135
9.2	Masa atrapada en los discos porosos y variación de sus resistencias	146
11.1	Parámetros de Tiller y Lewis para cada una de las bases	152
11.2	Variación de la altura de los revoques de distintas granulometrías de la fracción 40-45 en discos de 20 $\mu$ m	157
A.1	Volúmenes y tiempos de filtración	183
B.1	Resultados generales e intermedios, Base A	197
B.2	Resultados generales e intermedios, mezcla MA1	198
B.3	Resultados generales e intermedios, mezcla MA2	199
B.4	Resultados generales e intermedios, mezcla MA3	200
B.5	Resultados generales e intermedios, mezcla MA4	201



<b>NÚMERO</b>	<b>TÍTULO</b>	<b>PÁGINA</b>
B.6	Resultados generales e intermedios, Base B	202
B.7	Resultados generales e intermedios, mezcla MB1	203
B.8	Resultados generales e intermedios, mezcla MB2	204
B.9	Resultados generales e intermedios, mezcla MB3	205
B.10	Resultados generales e intermedios, mezcla MB4	206
E.1	Distribución de frecuencia acumulada para las mezclas diseñadas a partir de la base 20-25	232
E.2	Distribución de frecuencia acumulada para las mezclas diseñadas a partir de la base 40-45	235
E.3	Distribución de frecuencia acumulada para las granulometrías bases y las fracciones estrechas	238
F.1	Alturas promedio y la masa de los revoques formados sobre discos porosos	242
G.1	Parámetros característicos asociados a las distintas granulometrías	244



## LISTA DE FIGURAS

NÚMERO	TÍTULO	PÁGINA
1	Equipo de perforación rotatoria	10
2	Recorrido del lodo de perforación	11
3	Goma Xanthana	16
4	Tipos de fluidos	20
5	Reograma de un lodo de perforación	21
6	Volumen del filtrado acumulado en el tiempo	28
7	Mecanismo de formación de torta de filtración	33
8	Estructura porosa de la torta	33
9	Relación proporcional entre el volumen de la torta y el volumen de filtrado	35
10	Filtración del lodo a través de la formación	55
11	Curva de filtrado	64
12	Medidas de tendencia central para una distribución de tamaño de partícula	76
13a	Curva de densidad de distribución	77
13b	Curva de distribución de frecuencia acumulada	77
14	Tamizador Oscilatorio	86
15	Clasificador Centrifugo	87
16	Tamizador Vibratorio	89
17	Mastersizer 2000	90



<b>NÚMERO</b>	<b>TÍTULO</b>	<b>PÁGINA</b>
18	Medidor de pH	91
19	Agitador de máxima revolución Monomixer	92
20	Agitador de baja revolución	93
21	Equipo de filtración estática	94
22	Celda HPHT	95
23	Balanza con desecador infrarojo	96
24	Divisor de muestra	98
25	Hoja de cálculo del programa de elaboración de mezclas	128
26	Representación esquemática de la mezcla MB1 respecto a su base	129
27	Distribución de frecuencia acumulada de las bases y sus fracciones estrechas	135
28	Distribución de frecuencia acumulada de la base 20-25 y las mezclas diseñadas	137
29	Distribución de frecuencia acumulada de la base 40-45 y las mezclas diseñadas	137
30	Distribución de frecuencia acumulada de las bases y sus fracciones estrechas	139
31	Curva de filtración para dos pruebas de la mezcla MA2-20 a 400 psi	141
32	Curva de filtración para tres pruebas de base 20-25 a 200 psi	144



---

<b>NÚMERO</b>	<b>TÍTULO</b>	<b>PÁGINA</b>
33	Comparación de ajuste de los datos experimentales por el modelo de Lewis y el modelo de Tiller para la base 20-25	153
34	Comparación de ajuste de los datos experimentales por el modelo de Lewis y el modelo de Tiller para base 40-45	154
35	Variación de la solidosidad en función del parámetro $D_{3,2}$ para las diferentes granulometrías	156
36	Variación de la solidosidad en función del parámetro $D_{3,2}$ para las diferentes granulometrías	157
37	Variación del $D_{3,2}$ en función del parámetro %FP para las diferentes granulometrías	158
38	Variación de la permeabilidad de la zona Darcyana en función del parámetro $D_{3,2}$ para las diferentes granulometrías	161
39	Variación de la permeabilidad de la zona Darcyana en función del parámetro %FP para las diferentes granulometrías	163
40	Variación de la permeabilidad de la zona Darcyana en función del parámetro %FP/ $D_p$ para las diferentes granulometrías	165
41	Variación de la permeabilidad de la zona incipiente en función del parámetro $D_{3,2}$ para las diferentes granulometrías	166
42	Variación de la permeabilidad de la zona global en función del parámetro $D_{3,2}$ para las diferentes granulometrías	168

---



<b>NÚMERO</b>	<b>TÍTULO</b>	<b>PÁGINA</b>
43	Variación del parámetro $(K_{DES})/D_{3,2}^2$ en función del $D_{3,2}$ para las diferentes granulometrías	170
44	Variación del parámetro $(K_{DES})/D_{3,2}^2$ en función de la desviación estándar Geométrica ( $\sigma_g$ ) para las diferentes granulometrías	171
45	Variación de la masa invasora en función del $D_{3,2}$ para las diferentes granulometrías	172
46	Variación de la masa atrapada en el disco en función del $D_{3,2}$ para las diferentes granulometrías	173
A.1	Curva de filtrado mezcla MA1-10	185
A.2	Curva de filtrado mezcla MA2-10	185
A.3	Curva de filtrado A-10	186
A.4	Curva de Filtrado mezcla MA3-10	186
A.5	Curva de filtrado mezcla MA4-10	187
A.6	Curva de filtrado mezcla MA1-20	187
A.7	Curva de filtrado mezcla MA2-20	188
A.8	Curva de filtrado A-20	188
A.9	Curva de filtrado mezcla MA3-20	189
A.10	Curva de filtrado mezcla MA4-20	189
A.11	Curva de filtrado 5000 rpm	190
A.12	Curva de filtrado 7000 rpm	190
A.13	Curva de filtrado mezcla MB1-10	191
A.14	Curva de filtrado mezcla MB2-10	191
A.15	Curva de filtrado B-10	192



<b>NÚMERO</b>	<b>TÍTULO</b>	<b>PÁGINA</b>
A.16	Curva de filtrado mezcla MB3-10	192
A.17	Curva de filtrado mezcla MB4-10	193
A.18	Curva de filtrado mezcla MB1-20	193
A.19	Curva de filtrado mezcla MB2-20	194
A.20	Curva de filtrado mezcla B-20	194
A.21	Curva de filtrado mezcla MB3-20	195
A.22	Curva de filtrado mezcla MB4-10	195
D.1	Curva de filtrado para la mezcla MA2	214
D.2	Permeación del medio filtrante	214
D.3	Curva de identificación de las dos zonas del revoque	216
D.4	Curva representativa de la zona Darcyana	217



## LISTA DE SÍMBOLOS.

### **Símbolo**

A	Área transversal del lecho [L <sup>2</sup> ]
A <sub>f</sub>	Área de filtrado [L <sup>2</sup> ]
a	Pendiente de la curva t / V vs V [θ/L <sup>6</sup> ]
a'	Pendiente de la curva t'/V' vs V' [θ/L <sup>6</sup> ]
b	Punto de corte en la gráfica t / V vs V [θ/L <sup>3</sup> ]
b'	Punto de corte en la gráfica t'/V' vs V' [θ/L <sup>3</sup> ]
C	Constante de Kozeny [Adim]
D <sub>3,2</sub>	Tamaño promedio superficie volumen [L]
D*	Diámetro de la garganta del poro del yacimiento [L]
dh/dt	Diferencial de espesor de torta [L]
D	Diámetro de la partícula [L]
dV/dy	Velocidad de deformación [L <sup>3</sup> /L]
h <sub>c</sub>	Altura de la torta [L]
κ	Parámetro de la ecuación de potencia [Adim]
K	Permeabilidad [L <sup>2</sup> ]
K <sub>D&amp;S</sub>	Producto permeabilidad-solidosidad [L <sup>2</sup> ]
K <sub>D</sub>	Permeabilidad darcyana [L <sup>2</sup> ]
K <sub>I</sub>	Permeabilidad incipiente [L <sup>2</sup> ]
K <sub>G</sub>	Permeabilidad global [L <sup>2</sup> ]
K <sub>M</sub>	Permeabilidad del medio filtrante [L <sup>2</sup> ]



$K_0$	Permeabilidad específica de la torta sin tensión [ $L^2$ ]
$L_M$	Profundidad del medio [L]
$M$	Masa del filtrado [M]
$m_{CD}$	Masa de revoque depositado en la etapa darcyana por unidad de área [ $M/L^2$ ]
$m_{CI}$	Masa de revoque depositado en la etapa incipiente por unidad de área [ $M/L^2$ ]
$m_{CG}$	Masa de revoque por unidad de área [ $M/L^2$ ]
$m_S$	Masa de sólidos secos en la torta por unidad de área [ $M/L^2$ ]
$M_R$	Masa del revoque [M]
$M_S$	Masa de sólidos secos en la torta [M]
$M_{SS}$	Masa de sólidos en la suspensión original [M]
$N$	Parámetro de la ecuación de potencia [Adim]
$n$	Índice de compresión referido a la resistencia al paso de filtrado [Adim]
$p_a$	Parámetro empírico [ $M/L\theta^2$ ]
$p_s$	Presión efectiva [ $M/L\theta^2$ ]
$\Delta P$	Caída de presión [ $M/L\theta^2$ ]
$\Delta P_C$	Caída de presión a través de la torta [ $M/L\theta^2$ ]
$\Delta P_M$	Caída de presión a través del medio filtrante [ $M/L\theta^2$ ]
$Q$	Caudal de líquido [ $L^3/\theta$ ]
$q$	Velocidad de flujo instantánea [L / $\theta$ ]
$q_a$	Velocidad de flujo volumétrico de agua [L / $\theta$ ]
$q_g$	Velocidad de flujo volumétrico de goma Xhantana [L / $\theta$ ]
$r_C$	Resistencia específica de la torta [ $L^{-2}$ ]



$R_M$	Resistencia del medio filtrante [ $L^{-2}$ ]
$R_C$	Resistencia de la torta [ $L^{-1}$ ]
$R_{CD}$	Resistencia de la zona darcyana [ $L^{-1}$ ]
$R_{CI}$	Resistencia de la zona incipiente [ $L^{-1}$ ]
$R_{CG}$	Resistencia global [ $L^{-1}$ ]
$R^*$	Parámetro de sumatoria de la resistencia incipiente y la resistencia del medio [ $L^{-1}$ ]
$s$	Coefficiente de compresibilidad [Adim]
$S_v$	Área de superficie específica por unidad de volumen [ $L^2 / L^3$ ]
$t_o$	Tiempo de formación de la etapa incipiente del revoque [ $\theta$ ]
$t$	Tiempo [ $\theta$ ]
$V_L$	Volumen de filtrado [ $L^3$ ]
$V'$	Volumen de filtrado en la etapa darcyana [ $L^3$ ]
$V_o$	Volumen de filtrado en la etapa incipiente [ $L^3$ ]
$V_C$	Volumen depositado de torta [ $L^3$ ]
$V_S$	Volumen de la suspensión [ $L^3$ ]
$V_{SS}$	Volumen de sólidos en la suspensión original [ $L^3$ ]
$x$	Tamaño de partícula [ $L$ ]
$x_A$	Diámetro de tamiz [ $L$ ]
$x_a$	Diámetro de área proyectada [ $L$ ]
$\bar{x}_a$	Media aritmética [ $L$ ]
$x_c$	Diámetro perimetral [ $L$ ]



$\overline{x_c}$	Media cuadrática [L]
$x_d$	Diámetro de arrastre [L]
$x_F$	Diámetro de Feret's [L]
$x_f$	Diámetro de caída libre [L]
$\overline{x_g}$	Media geométrica [L]
$x_M$	Diámetro de Martin's [L]
$x_p$	Diámetro de área proyectada [L]
$\overline{x_q}$	Media cuadrática [L]
$x_s$	Diámetro superficial [L]
$X_{50}$	Mediana de una distribución de tamaño de partícula [L]
$x_{CH}$	Diámetro de máximo contorno [L]
$x_{SH}$	Diámetro de corte [L]
$x_{St}$	Diámetro de Stokes [L]
$x_{Sv}$	Diámetro de superficie-volumen [L]
$x_v$	Diámetro volumétrico [L]
$X_\omega$	Parámetro de corrección asociado a la concentración de sólidos $\omega$ [Adim]
%FP	Fracción de partículas formadoras de puente [Adim]



## Símbolos griegos

$\alpha_{av}$	Resistencia específica promedio de la torta [L/M ]
$\alpha_c$	Resistencia específica de la torta [L/ M]
$\alpha_{cav}$	Resistencia específica másica promedio de la torta [L/M]
$\alpha_{CD}$	Resistencia específica del revoque incipiente [L / M]
$\alpha_{CI}$	Resistencia específica del revoque darcyano [L / M]
$\alpha_{CG}$	Resistencia específica global [L / M]
$\alpha_{mo}$	Constante empírica [Adim]
$\alpha'_{mo}$	Constante empírica [Adim]
$\alpha_0$	Resistencia específica de la torta sin tensión [L/M]
$\beta$	Índice de compresibilidad referido a la fracción volumétrica de sólidos [Adim]
$\delta$	Índice de compresibilidad referido a la permeabilidad [Adim]
$\varepsilon$	Porosidad de la torta [Adim]
$\varepsilon_S$	Solidosidad de la torta [Adim]
$\varepsilon_{so}$	Solidosidad para una torta sin tensión [Adim]
$\varepsilon_{sav}$	Solidosidad promedio [Adim]
$\phi_S$	Concentración (V/V) de sólidos en la suspensión original. [Adim]
$\kappa$	Parámetro asociado a la torta y al filtrado. [Adim]
$\Delta\Pi_c$	Relación entre la caída de presión en la torta y la constante empírica $p_a$ [Adim]
$\mu$	Viscosidad [M / L $\theta$ ]



$\mu_0$	Viscosidad plástica [M/L $\theta$ ]
$\mu_g$	Viscosidad de la goma Xhantana [M / L $\theta$ ]
$\mu_a$	Viscosidad del agua [M / L $\theta$ ]
$\mu_{ap}$	Viscosidad aparente [M / L $\theta$ ]
$\rho$	Densidad del líquido [M / L $^3$ ]
$\rho_s$	Densidad del sólido [M / L $^3$ ]
$\sigma$	Desviación estándar [Adim]
$\sigma_g$	Desviación estándar geométrica [Adim]
$\tau$	Esfuerzo cortante [M / L $\theta^2$ ]
$\tau_0$	Esfuerzo mínimo cortante [M / L $\theta^2$ ]
$\omega$	Masa de torta seca por unidad de volumen de filtrado [M/ L $^3$ ]



## **INTRODUCCIÓN**

El proceso de perforación de petróleo consiste en penetrar las capas o formaciones de la corteza terrestre, utilizando una pieza de perforación rotatoria denominada mecha o barrena, desde la superficie hasta llegar al yacimiento en el que se genera un proceso de filtración gracias a que el diferencial de presión existente entre la columna de lodo y las paredes del hoyo resulta mayor que la presión capilar de la formación. Para este proceso se emplea un fluido de perforación el cual es una mezcla de sólidos, líquidos y aditivos con la función de transportar los recortes de perforación (ripio) a la superficie y mantener las paredes del pozo gracias a la formación de un revoque.

El revoque formado sobre las paredes del hoyo debe ser una capa lisa, de poco espesor, lo más impermeable y flexible posible para garantizar la productividad del pozo.

Generalmente el diseño del lodo de perforación depende de la zona a perforar, siendo la más importante la zona productora, por lo que se deben prevenir los problemas y daños en la formación por causa del paso de partículas del fluido al yacimiento (invasión de finos). Estas causas reducen la permeabilidad de la formación, provocando un efecto negativo en la productividad del pozo.

Para prevenir o minimizar dichos daños se realiza una selección de granulometría controlada de los sólidos que



conforman el lodo de perforación, con la finalidad de formar puentes en los poros del yacimiento.

El Laboratorio de Separaciones Mecánicas-U.C.V (LSM), ha desarrollado varios trabajos de investigación sobre la influencia de la distribución de tamaño de partículas en la formación de revoques sobre papel de filtro, obteniendo como conclusión que la granulometría ejerce poca influencia en la permeabilidad, contrario al modelo propuesto por Carman y Kozeny, resultando como posible causa que la goma Xanthana puede ocupar los espacios vacíos dentro del revoque.

Recientemente se realizó un estudio para evaluar la influencia de mezclas amplias de carbonato de calcio Intecarb (10-15, 20-25, 30-35, 40-45) en la formación de revoques sobre discos porosos de 10 y 20  $\mu\text{m}$  que simulan el yacimiento. En dicho estudio se emplearon varios elementos que permiten determinar la influencia del medio filtrante y la pérdida de permeabilidad del mismo, encontrándose que no es posible comparar la permeabilidad de medios filtrantes de distinto diámetro de poro a partir del porcentaje de partículas formadoras de puente y que la variación de los parámetros del producto permeabilidad solidosidad de la zona darcyana, incipiente y global son directamente proporcionales a cambios en el  $D_{3,2}$ .

A fin de comprobar la importancia de estos parámetros en la caracterización del proceso de formación de revoques sobre discos porosos, en este trabajo se realiza un estudio de la influencia de la distribución de tamaño de partículas (DTP) en las características de estos revoques sobre discos porosos Fann de 10 y 20 $\mu\text{m}$ ,



empleando mezclas monomodales con adición de finos y gruesos, tomando en cuenta el parámetro de cantidad de partículas formadoras de puentes (%FP), para así determinar la pérdida de permeabilidad de dichos discos.



## **2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Hoy en día la industria petrolera nacional juega un papel fundamental en la economía venezolana, por tanto, es necesario garantizar la máxima productividad y rentabilidad en la explotación de los yacimientos existentes.

Debido a que la productividad se ve afectada principalmente por la etapa de perforación, especialmente por el fluido utilizado en dicha actividad, es necesario garantizar que el yacimiento no sea invadido en exceso por parte de los líquidos y sólidos presentes en el fluido. Para ello se promueve la formación de una capa delgada de material sobre las paredes del yacimiento, denominada revoque. El revoque se forma por depósitos de una torta de sólidos a través de un proceso de filtración, debido a una diferencia de presión existente entre el hoyo y la formación.

La invasión de sólidos y líquidos hacia el reservorio representa uno de los posibles daños a la formación, debido a la reducción de su permeabilidad, por lo que es necesario disminuir dicha invasión, reduciendo la permeabilidad del revoque, sin enviar una cantidad excesiva de material fino al interior de los poros del yacimiento. Es importante destacar que el valor de la permeabilidad se ve poderosamente afectado por la porosidad, de acuerdo a la distribución del tamaño de las partículas que componen el fluido de perforación. Para evaluar la invasión de sólidos y fluidos al yacimiento, un método que se implementa es la formulación adecuada del lodo de perforación, de manera tal que tenga un porcentaje de partículas que guardan una relación de tamaño adecuada con el tamaño de poro del yacimiento. Este



porcentaje se denomina porcentaje de partículas formadoras de puente (%FP).

El Laboratorio de Separaciones Mecánicas (LSM) de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Central de Venezuela, ha desarrollado varios trabajos de investigación sobre la influencia de la distribución de tamaño de partículas en la formación de revoques empleando como medio filtrante, papel de filtro, obteniéndose que la granulometría ejerce poca influencia en las características del revoque; este hecho es contrario a lo que propone el modelo Carman – Kozeny, ya que se dice que el polímero Goma Xanthana ocupa espacios vacíos del volumen de torta.

Debido a la necesidad de estudiar la influencia que tiene la distribución de tamaño de partículas en la formación de revoque sobre un medio filtrante con características similares a las del yacimiento, el LSM ha recibido el respaldo de la Comisión Nacional de Investigaciones Petroleras (CONIPET), para realizar el estudio de la influencia que tiene la distribución de tamaño de partículas (DTP) de los sólidos añadidos al fluido de perforación sobre las características del revoque formado en discos porosos.

Esta investigación basa sus experiencias en el análisis y realización de pruebas de formación de revoques con lodos preparados a partir de mezclas monomodales de granulometrías controladas de carbonato de calcio comercial (Intecarb) típicamente empleado en la formación de lodos, mediante la adición de partículas finas y gruesas (fracciones 20-25 y 40-45), las cuales se añaden variando el porcentaje de partículas formadoras de



puentes, para estudiar el efecto de las mismas sobre la permeabilidad, porosidad y compresibilidad del revoque, como una aproximación a lo que sucede dentro del yacimiento, ya que los discos porosos utilizados para dichas pruebas pretenden simular la formación.



### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 General:**

- Determinar las características de revoques formados sobre discos porosos, con los cuyo material sellante lo constituyen mezclas de granulometría controlada, usando como base de comparación distintos grados de carbonato de calcio comercial. (INTECARB 20-25 y 40-45).

#### **3.2 Específicos:**

- Definir, diseñar, simular y preparar mezclas de carbonato de calcio de diferentes características, tomando como base los carbonatos Intecarb 20-25 e Intecarb 40-45, mediante adición controlada de finos y gruesos.
- Caracterizar los discos porosos utilizados mediante la determinación de su permeabilidad y su porosidad, antes y después de su uso.
- Caracterizar los revoques mediante la determinación de su permeabilidad y porosidad.
- Evaluar la influencia de los cambios de granulometría en la porosidad y en la permeabilidad del revoque, así como en la pérdida de permeabilidad del disco poroso utilizado.
- Evaluar la compresibilidad de los revoques formados.



## 4. MARCO TEÓRICO

A continuación se realiza una descripción de los tópicos más importantes que apoyan el desarrollo del presente trabajo.

### 4.1 Perforación Petrolera.

El petróleo se encuentra alojado en los espacios porosos de las rocas sedimentarias. En algunos tipos especiales de rocas, como las areniscas y las piedras calizas, los espacios porosos son numerosos y están interconectados entre sí, por lo que se dice que la roca es porosa y permeable; este conjunto de rocas recibe el nombre de reservorio, formación o yacimiento. Aunque se ha encontrado petróleo cerca de rocas sedimentarias, las cantidades acumuladas en los yacimientos en forma de trampas subterráneas son las que se explotan comercialmente (MI. Drilling Fluids Co., 1991).

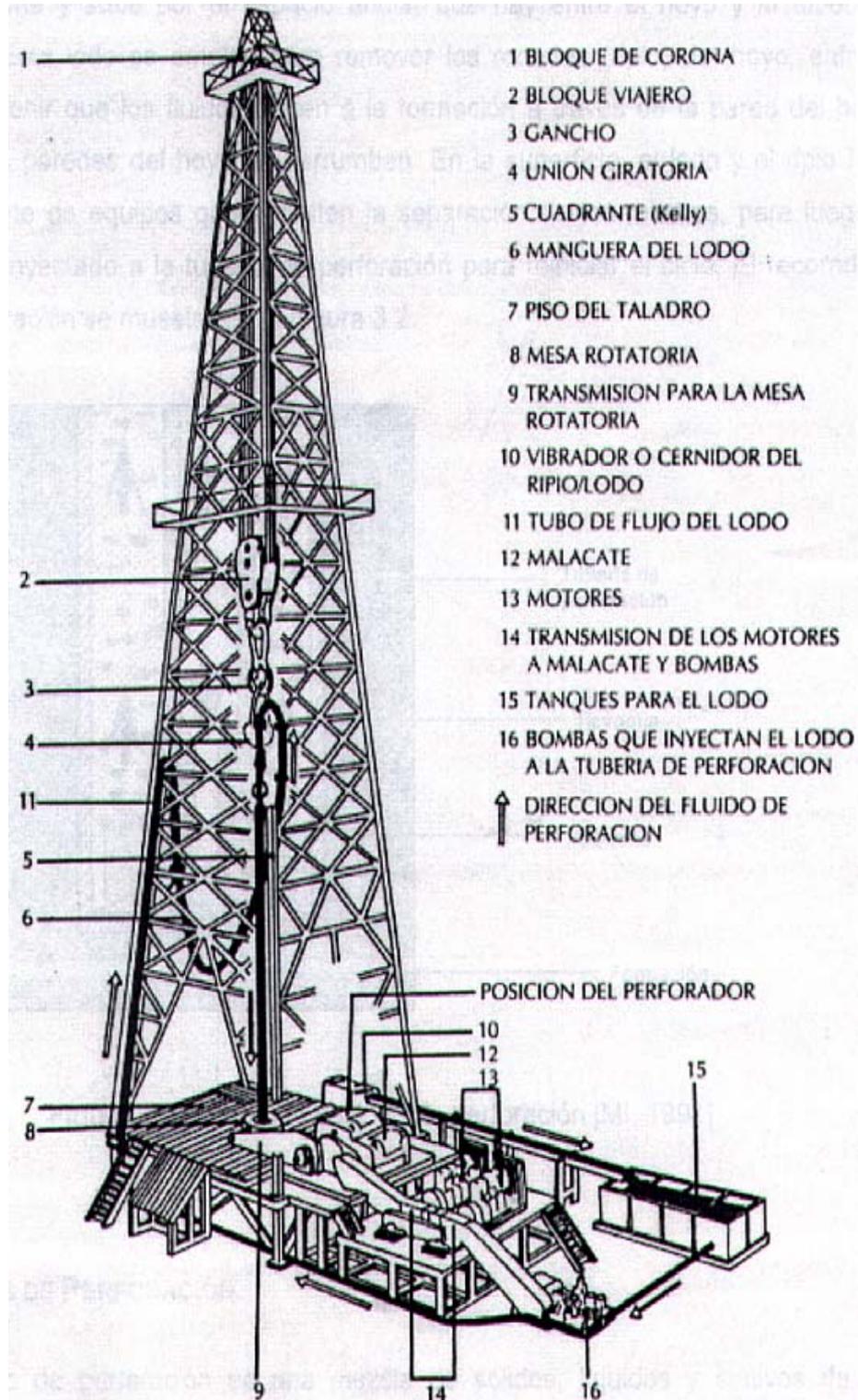
Una vez que existe la posibilidad de hallar petróleo bajo la superficie, la única forma de verificar la existencia del mismo para luego extraerlo es perforando el hoyo. La perforación de un pozo consiste en penetrar las capas (formaciones) de la corteza terrestre utilizando una pieza de perforación rotatoria denominada mecha o barrena (Salas, 1980). 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*.

Con el sistema de perforación rotatoria, el hoyo se va profundizando mediante la rotación continua de la barrena colocada en el extremo inferior de la sarta de perforación. La sarta



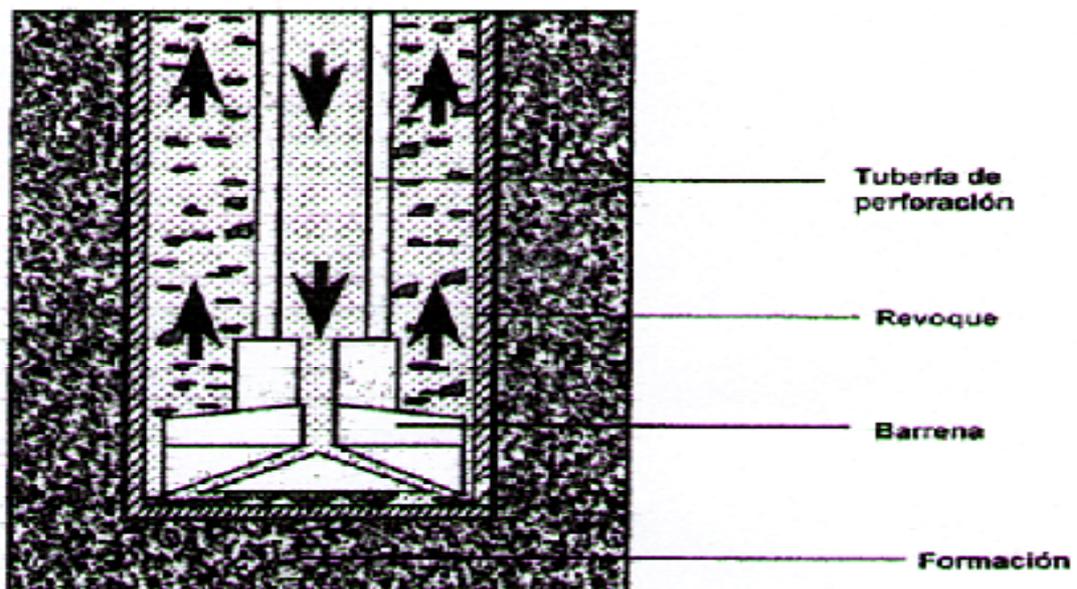
está constituida por una sección de tubos muy pesados, los cuales le imprimen la carga deseada a la barrena<sup>(Gray,1998)</sup>.

La Figura 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, la tubería de perforación, las barreras, que son unos tubos pesados y bastante gruesos, cuyo objetivo es mantener la tubería recta, y por último, la barrena o mecha, la cual tiene como función crear el hoyo mediante el fraccionamiento de la roca que se encuentra en el fondo.



**FIGURA 1. Equipo de perforación Rotatoria (Drilling practices)**

Al mismo tiempo que se perfora, se inyecta a altas presiones por el interior de los tubos un líquido denominado lodo o *fluido de perforación*, el cual sale por unos agujeros que tiene la barrena y sube por el espacio anular que hay entre el hoyo y la tubería de perforación. Este lodo se emplea para remover los recortes (ripio) del hoyo, enfriar la barrena, prevenir que los fluidos entren a la formación a través de la pared del hoyo y evitar que las paredes del hoyo se derrumben. En la superficie, el lodo y el ripio fluyen hacia una serie de equipos que permiten la separación de los mismos, para ser nuevamente inyectado a la tubería de perforación y reiniciar el ciclo. El recorrido del lodo de perforación se muestra en la Figura 2 (MI.Drilling Fluids,1991).



**FIGURA 2. Recorrido del lodo de perforación**(MI.Drilling Fluids,1991)



#### **4.2. Lodos de Perforación.**

Los lodos o fluidos de perforación son mezclas de sólidos y líquidos en proporciones estudiadas, empleados en la perforación de pozos petroleros.

Los lodos de perforación fueron introducidos con las perforaciones rotatorias en el año 1900. Inicialmente el propósito principal del lodo fue remover cortes continuamente. Con el progreso se fue sofisticando y se crearon ciertas expectativas sobre dichos lodos. Se introdujeron aditivos para casi cualquier propósito, y lo que se inició como un simple fluido se convirtió en una mezcla complicada de líquidos, sólidos y químicos.

Entre las principales funciones de los lodos de perforación se encuentran:

- Retiro de virutas y transporte del ripio que se genera por la acción del taladro, desde el fondo del pozo hacia la superficie; para así permitir su separación del lodo en la superficie.
- Prevenir la entrada de gas o agua a alta presión a las formaciones perforadas, al mantener suficiente presión hidrostática.
- Enfriamiento y lubricación de la barrena y la sarta de perforación.
- Por sus propiedades reológicas debe mantener en suspensión el ripio cuando se interrumpe temporalmente la circulación.
- Ayudar a la prevención de derrumbes en formaciones no consolidadas, por medio de la densidad y características para formar un revoque o capa de lodo.



- Reducir la cantidad de agua perdida del fluido de perforación a las formaciones perforadas, por la apropiada formación de un revoque sobre las paredes.
- Soportar, por flotación, parte del peso de la sarta de perforación y de las tuberías durante su inserción en el hoyo.
- Permitir la liberación del ripio de manera fácil cuando éste llegue a la superficie.
- Facilitar la máxima obtención de información deseada acerca de las formaciones perforadas.
- Control de la corrosión.

Un lodo de perforación debe cumplir con estas funciones sin causar ningún daño al personal de la perforación o contaminar el medio ambiente, de igual forma no debe interferir con la productividad normal de la perforación.

#### 4.2.1. Composición de los lodos de perforación<sup>(Salas,1980)</sup>.

Los lodos son fluidos donde se encuentran suspendidos sólidos y a veces líquidos y gases. Cabe destacar que un lodo de perforación satisfactorio cumple con funciones que requieren que éste tenga propiedades que no pueden adquirirse de líquidos ordinarios. En consecuencia un lodo de perforación está compuesto por:

- Una fase continua ( base líquida).
- Sólidos reactivos (fase dispersa)
- Sólidos inertes dispersos.
- Aditivos químicos.



La fase continua o 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 emulsiones de agua y aceite; por lo cual se denominan lodos base agua cuando la fase continua es el agua y lodos base aceite cuando la fase continua es el aceite. También existen fluidos de perforación 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 presentes en los estratos de la formación. La concentración de  $\text{OH}^-$  en la fase continua del lodo afecta su alcalinidad y pH. El control óptimo del pH en lodos de perforación es importante desde el punto de vista de detectar y tratar ciertos contaminantes que puedan estar presentes en el lodo, por lo tanto, el pH debe estar ajustado a determinado valor, el cual depende del tipo de lodo. Por ejemplo, para lodos base agua que contienen bentonita, el pH se debe encontrar entre 8 y 9, y cuando el lodo se contamina con cemento el pH puede aumentar hasta un valor entre 10 y 11<sup>(Gray,1998)</sup>.

La fase discontinua consiste en partículas sólidas y/o gotas de fluido suspendidas en la fase continua o líquida. Las gotas de aceite en un lodo base agua dan viscosidad al lodo y reducen la densidad. El aceite puede entrar a formar parte del lodo a partir de las formaciones perforadas o puede haberse agregado como un líquido lubricante o reductor de filtrado<sup>(Gray,1998)</sup>.

Los sólidos reactivos forman una fase dispersa formadora de gel; estos sólidos son coloidales y/o líquidos emulsificados que



gracias a su reactividad química, proporcionan la viscosidad, tixotropía y revoque de lodo deseados por medio de diversos aditivos químicos. Estos sólidos usualmente son arcillas comerciales.

En lodos base agua, el agua retenida por las partículas de arcillas empieza a formar parte de la fase discontinua del lodo, y es responsable de la efectividad de las arcillas como agentes viscosificantes(Gray,1998).

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

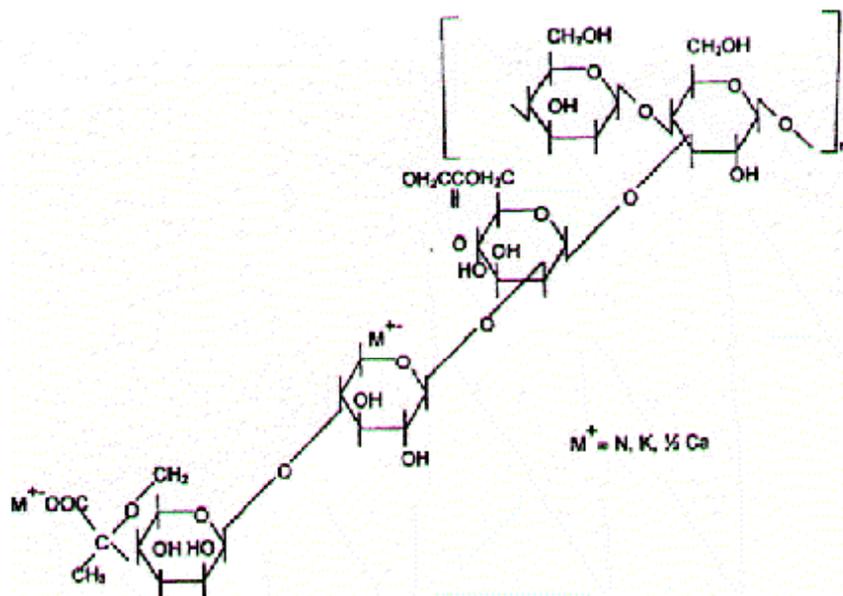
Los agentes densificantes (barita, carbonato de calcio) se agregan para incrementar la densidad del lodo, lo cual ayuda a controlar la presión de formación y crear el revoque en la pared del hoyo.

Los agentes viscosificantes (arcillas, polímeros y líquidos emulsificados) se agregan para dar viscosidad al lodo, lo que aumenta su habilidad para limpiar el hoyo. Las arcillas, polímeros, almidón, dispersantes y materiales asfálticos pueden agregarse para reducir la filtración del lodo a través de la pared del hoyo(Gray,1998).

En ocasiones se agregan agentes dispersantes químicos para mejorar la propiedad de retención de pared (la cual se detallará más adelante). Tales sustancias tienen el mismo efecto que añadir

partículas finas coloidales, ya que su acción consiste en disminuir el tamaño efectivo de las partículas mediante el rompimiento de los agregados individuales de las partículas coloidales (Salas, 1980).

Cuando se agrega un polímero en un disolvente, la solución se hace más viscosa. La forma y tamaño de la molécula de polímero afecta la viscosidad, logrando el aumento de la misma a medida que la molécula es más grande. Un ejemplo de los polímeros utilizados es la goma Xanthana (*Xanthomas campestris*), generada por microorganismos en carbohidratos. Estos polímeros son de extrema complejidad y de muy alto peso molecular. El peso molecular de la goma Xanthana se estima entre 2 y 50 millones, y su estructura aproximada es la que se muestra en la Figura 3.



**FIGURA 3. Goma Xanthana** (Seheult, 1992)



#### 4.2.2 Propiedades de los lodos de perforación.

La habilidad del fluido de realizar las funciones requeridas depende de las propiedades físicas y químicas del lodo. La viscosidad, fuerza de gelatinización y densidad del lodo son las más importantes. Igualmente son importantes las propiedades de filtración del fluido<sup>(MI Drilling Fluids, 1991)</sup>.

##### 4.2.2.1 Densidad

Es una de las propiedades más determinadas de los lodos de perforación. La densidad se refiere a la medida del peso de una unidad de volumen de lodo. Esta propiedad es muy importante ya que contribuye a la prevención de un reventón, el cual se refiere a la afluencia de los fluidos de la formación, por lo cual es necesario mantener una densidad tal que la columna de lodo en el hoyo ejerza una presión que sobrepase la presión de la formación que se perfora<sup>(Salas, 1980)</sup>.

La presión de la columna de lodo puede estar por lo menos en 200 psi, sobre el valor de la presión de poro de la formación. Además de controlar los fluidos de la formación, la presión de la columna de lodo ayuda a mantener la estabilidad del hoyo.

El incremento de la densidad del lodo aumenta el efecto boyante que ejerce sobre el ripio, ayudando al transporte del mismo a través del espacio anular, pero retardando el asentamiento en la superficie. Raramente se justifica un incremento de la densidad del lodo como un medio para mejorar la capacidad de transporte o acarreo del ripio<sup>(Gray, 1998)</sup>.



Por lo expuesto anteriormente, se tiende a emplear una densidad a un valor superior al realmente necesario para controlar los fluidos de la formación. Esto se hace con la supuesta finalidad de mantener la seguridad en el pozo; lo cual puede traer como consecuencia que aumente 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.

Este tipo de daño hace que el lodo se pierda 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.

La velocidad de penetración del lodo se reduce si se produce un aumento excesivo en la densidad del lodo; esta reducción ocurre por la presión de sobrebalance del lodo ( el diferencial entre la presión del lodo y la presión del poro cuando se taladra en rocas permeables) y por la presión absoluta de la columna de lodo cuando se taladran rocas de muy baja permeabilidad.

#### 4.2.2.2 Reología

La reología es un término amplio, que denota la deformación de los materiales, incluyendo los fluidos<sup>(Bird,1982)</sup>. Las propiedades reológicas de los lodos de perforación juegan un papel vital en la operación de perforación.

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 los fluidos pseudoplásticos<sup>(Bird, 1982)</sup>.

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

$$\tau = \mu_0 \cdot \frac{dv}{dy} + \tau_0 \quad \text{si } |\tau| > \tau_0 \quad \frac{dV}{dy} = 0 \quad \text{si } |\tau| < \tau_0 \quad (4.1)$$

$\tau_0$  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.

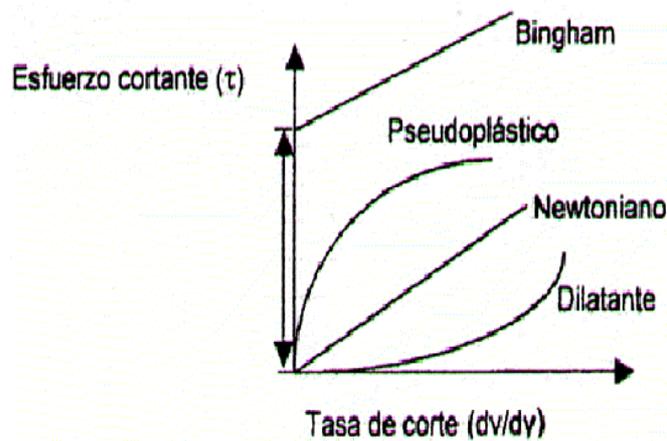
La viscosidad aparente de un fluido se define como el cociente entre el esfuerzo de corte y la tasa de corte ( $dV/dy$ ), y representa la pendiente de la recta que se traza entre un punto de la curva y el origen.

$$\mu_{ap} = \frac{\tau}{dV/dy} \quad (4.2)$$

Cuando la viscosidad aparente disminuye al aumentar el gradiente de velocidad ( $dV/dy$ ), el fluido se denomina pseudoplástico. El modelo de los fluidos pseudoplásticos se representa mediante la ley de potencias:

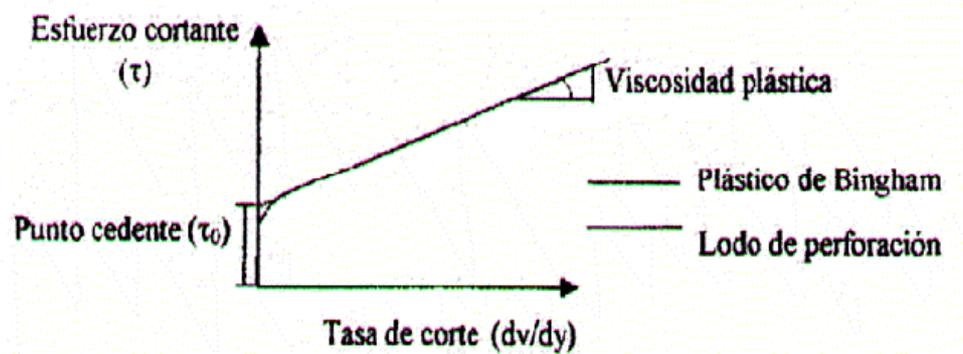
$$\tau = k \cdot \left( \frac{dv}{dy} \right)^n \quad (4.3)$$

donde  $k$  y  $n$  son parámetros de la ecuación de potencia. El valor de  $n$  define el tipo de fluido: si  $n > 1$ , el fluido es dilatante, si  $n < 1$ , es pseudoplástico, mientras que si  $n = 1$ , el fluido es newtoniano. En la figura 4, se representa el comportamiento de cada uno de estos fluidos.



**FIGURA 4. Tipos de fluidos**(Baroid,1974).

Los lodos de perforación, que consisten en una suspensión de partículas sólidas se comportan, aproximadamente, de acuerdo al modelo reológico del plástico de Bingham, que se muestra en la Figura 5. Se observa que existe un esfuerzo cortante, donde el lodo se comporta como un fluido pseudoplástico en la región donde la velocidad de corte es muy pequeña. Luego, la velocidad aumenta y la curva se comporta como una línea recta. En esta región, si se extrapola la línea recta hasta interceptarla con el eje de las ordenadas, se puede decir, que el lodo se comporta como un plástico de Bingham para efectos de simplicidad(Baroid,1974).



**FIGURA 5. Reograma de un lodo de perforación**(Baroid,1974).

El modelo del plástico de Bingham, como se muestra en la figura 5, se describe por dos parámetros, el punto cedente ( $\tau_0$ ) y la viscosidad plástica ( $\mu_0$ ), los cuales se pueden determinar midiendo el esfuerzo cortante a diferentes velocidades de corte. La pendiente 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, la fricción mecánica entre los sólidos y el líquido que los rodea(Baroid,1974).

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 5. El punto cedente es un indicador de la fuerza de atracción entre partículas y fluido mientras el lodo está en movimiento, y representa la fuerza que permite llevar el ripio fuera del hoyo(Baroid,1974).



#### 4.2.2.3 Viscosidad

El término viscosidad aplicado a cualquier fluido, representa la resistencia interna a fluir. Un fluido que tiene alta viscosidad ofrece una alta resistencia a fluir que uno de baja viscosidad.

Los fluidos ordinarios (tales como agua, petróleos, glicerina, etc.) tienen una viscosidad constante a una temperatura dada. Sin embargo, una suspensión coloidal del tipo caracterizado por ciertos fluidos de perforación no tienen una viscosidad constante a temperatura constante. La viscosidad de tales fluidos de perforación varía con la tasa de agitación. Cuando circulan a bajas tasas de flujo tienen mayor viscosidad que cuando se agitan a altas tasas. Un lodo con esta propiedad de viscosidad aparente variable se denomina tixotrópico, o que posee propiedades de gel<sup>(Salas,1980)</sup>. La tixotropía se mide mediante la fuerza de gelatinización, la cual es la medida de la atracción física y electroquímica bajo condiciones estáticas. Esta propiedad de los lodos indica que cuando no están en movimiento tienden a gelatinizarse o sea, estos lodos fluyen cuando son agitados y regresan a su estado rígido cuando dejan de moverse.

La función primordial de la viscosidad es permitir que el lodo retire apropiadamente el ripio del hoyo. Esto requiere que la viscosidad esté sobre un cierto valor mínimo para una velocidad de ascenso de circulación del lodo. El límite superior de la viscosidad del lodo se determina por la bombeabilidad del lodo. Esto es, si la viscosidad se permite que sea muy alta, no se puede mantener la circulación sin exceder la máxima presión permisible de trabajo de las bombas de circulación del lodo y las conexiones



de superficie del lodo entre las bombas y la tubería de perforación. Si se permite a la viscosidad llegar a un valor alto, el gas de las formaciones puede quedar atrapado en el lodo y no será liberado en la superficie. Se dice que los lodos están “cortados con gas”, lo cual puede generar serios problemas en el hoyo<sup>(Salas,1980)</sup>.

#### 4.2.2.4 Fuerza de gelatinización

Las propiedades de fuerza de gelatinización, tasa de gelatinización y tixotropía están bastante relacionadas con la viscosidad. La fuerza de gelatinización como su nombre lo indica es una medida, después de un período de reposo, de la resistencia de gel formado. Se determina mediante la medida después de un cierto tiempo de asentamiento, del esfuerzo (fuerza por unidad de área) requerido para producir una deformación permanente de gel.

La tasa de gelatinización se refiere a la tasa de tiempo para formar un gel. Esto es si el gel se forma lentamente después que el lodo queda en reposo, se dice que la tasa de gelatinización es baja; o, si el mismo aumento en la fuerza de gelatinización ocurre en un tiempo relativamente corto después de cesar el movimiento, se dice que la tasa de gelatinización es alta. Un lodo que exhiba propiedades gelatinizantes se denomina tixotrópico, o se dice que posee propiedades de tixotropía.

En general, es deseable que el lodo de perforación sea tixotrópico hasta cierto grado. Esto se evidencia en el hecho que durante la circulación del lodo en un hoyo la capacidad de éste para retirar el ripio depende conjuntamente de la velocidad del movimiento hacia arriba y la viscosidad aparente. Por tanto un



lodo muy tixotrópico puede canalizar a través del espacio anular entre la tubería de perforación y la formación, originando áreas muertas donde se acumulan virutas que posiblemente atascan la tubería.

#### 4.2.2.5 Propiedad de retención de pared

Se dice que un lodo tiene una buena propiedad de retención de paredes cuando forma una capa fina (revoque) e impermeable sobre las paredes del pozo. Esta capa debe ser lo más impermeable posible de modo que la tasa de filtración de agua del lodo a la formación sea baja. Con frecuencia la productividad de un pozo puede ser reducida permanentemente como resultado de filtración de agua a las formaciones, debido a un lodo con pobres propiedades de retención de pared.

Se ha demostrado con experiencias que uno de los principales factores que controlan la propiedad de retención de pared es el rango del tamaño de partículas.

Partículas de lodo relativamente grandes pueden requerirse para iniciar un puente sobre los poros. Para iniciar este puente se requieren partículas con diámetro alrededor de la mitad a tercera parte del diámetro de garganta de poro. Para reducir la filtración de agua efectivamente, el espacio entre los granos relativamente grandes debe ser obstruido con partículas más pequeñas; y entre estos granos pequeños se encuentran otros todavía más finos<sup>(Salas,1980)</sup>.



La tasa de pérdida de agua de un lodo generalmente es mayor a altas temperaturas. Lo que se puede atribuir al descenso en la viscosidad del agua que acompaña el aumento en la temperatura y al mayor grado de floculación de las partículas coloidales a elevadas temperaturas.

Si la viscosidad del lodo y la fuerza de gelatinización son altas, el revoque que se forma en la pared del pozo será muy grueso y no se liga muy fácil a la pared del hoyo.

#### 4.2.2.6 Contenido de arena

Se le llama “arena” a cualquier partícula sólida que es demasiado gruesa para pasar a través de un orificio de cinco micrones. El contenido de arena de un lodo de perforación representa un verdadero inconveniente ya que es dañino por varias razones. La abrasión de la arena causa rápido desgaste en las bombas de circulación del lodo, tubería, sarta de perforación. En excesiva proporción puede generar atascamiento del sistema de recirculación.

Debido a las desventajas del alto contenido de arena es aconsejable mantener la cantidad de arena en el lodo lo más bajo posible y no permitir que el valor exceda 5% del volumen del lodo (Salas, 1980).

#### 4.2.2.7 Valor de pH

El valor de pH es un medio de expresar la alcalinidad o acidez de un lodo de perforación. Este valor puede obtenerse



dando el logaritmo en base diez del recíproco de la concentración ión hidrógeno ( $H^+$ ). Cabe destacar que el pH de una solución varia apreciablemente con la temperatura, lo cual es de suma importancia en los lodos de perforación.

### **4.3 Fundamentos de filtración.**

La filtración es un proceso mecánico en el cual el componente sólido insoluble de una suspensión sólido-líquido se separa del componente líquido haciendo pasar a este último a través de una membrana porosa (medio de filtración) que retiene las partículas sólidas en su superficie superior o dentro de su estructura, estos dos procesos pueden ocurrir a la vez.

Los sólidos separados que forman una capa detectable en la cara superior del medio son los que conforman la *torta de filtración*. El fluido que atraviesa esa capa se llama *filtrado*. Para que se produzca la filtración debe haber una fuerza impulsora o presión diferencial.

Dadas las condiciones de filtración y el medio filtrante que se emplee, se presentan ciertas características como lo es el volumen de filtrado que se puede obtener en un tiempo determinado. Esta y otras características pueden estudiarse, pero con cierta dificultad debido a que los diferentes lodos o suspensiones varían enormemente en sus características ya que la resistencia al flujo de cualquiera de ellas es extremadamente sensible a la temperatura, método de preparación, etc.



#### 4.3.1 Ley de Darcy<sup>(Roccaro,1997)</sup>.

La ley de Darcy relaciona la caída de presión en un lecho poroso ya formado con el caudal de líquido que lo atraviesa. El caudal de líquido ( $Q$ ) que pasa a través de un lecho poroso es directamente proporcional al gradiente de presión aplicado ( $\Delta P_C$ ) y al área de flujo ( $A$ ), e inversamente proporcional a la viscosidad  $\mu$  del filtrado y el espesor del lecho.

$$Q = K \cdot \frac{A \cdot \Delta P_C}{\mu \cdot h_C} \quad (4.4)$$

donde  $K$  es una constante llamada permeabilidad de la torta y es un parámetro que indica la facilidad de flujo del líquido a través de la misma. La ecuación anterior es a menudo escrita :

$$Q = \frac{A \cdot \Delta P_C}{\mu \cdot R_M} \quad (4.5)$$

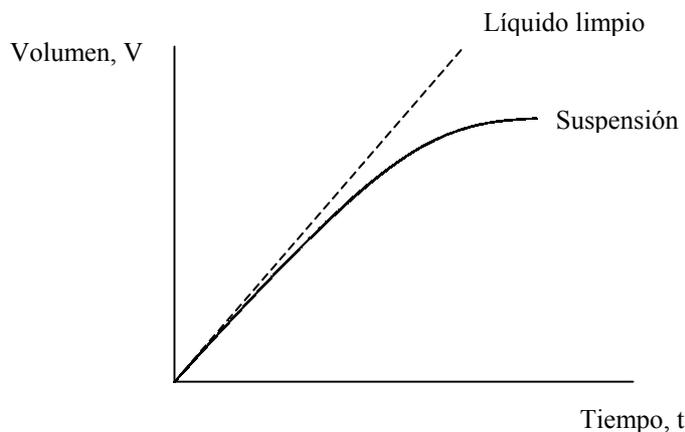
donde  $R_M$  es la resistencia del medio (y es igual a  $h_C / K$ , el espesor del lecho dividido por la permeabilidad de la torta), la cual expresa el grado de dificultad de flujo del líquido a través de la torta.

Al aplicar la ley de Darcy para el caso particular de filtración por formación de torta, son necesarias algunas suposiciones<sup>(Roccaro,1997)</sup>.

- Flujo en régimen laminar.
- El fluido se desplaza perpendicularmente a la sección de flujo en dirección opuesta a la dirección en que crece la torta.
- El gradiente de presión  $\Delta P$  es considerado sólo en la dirección de flujo.
- La fuerza impulsora debido a la columna de líquido es despreciable frente al gradiente de presión.

Por otro lado, se considera a la viscosidad constante siempre y cuando la temperatura permanezca constante durante el ciclo de filtración y que el líquido es Newtoniano<sup>(Svarosky,1990)</sup>.

Si la suspensión fuera un líquido limpio, todos los parámetros de las ecuaciones anteriores serían constantes, produciendo una proporción de flujo constante para una caída de presión constante y el volumen del filtrado acumulado aumentaría linealmente con el tiempo, como es mostrado en la Figura 6.



**FIGURA 6. Volumen del filtrado acumulado en el tiempo.**



La ecuación de Darcy puede aplicarse al caso de filtración suponiendo medio isotrópico, régimen de flujo laminar, dirección del fluido perpendicular a la sección transversal del filtro y en sentido contrario al crecimiento de la torta, gradiente de presión existente sólo en la dirección de flujo. Se desprecia la fuerza impulsora debida a la hidrostática frente al gradiente de presión aplicado.

La velocidad de filtración ( $q$ ) es directamente proporcional a la fuerza impulsora e inversamente proporcional a la resistencia del medio poroso:

$$\text{Velocidad} = \frac{\text{Fuerza impulsora}}{\text{Resistencia}}$$

Por tanto la ecuación 4.5 puede escribirse como:

$$q = \frac{Q}{A} = \frac{K \cdot \Delta P_c}{\mu \cdot h_c} \quad (4.6)$$

En un proceso de filtración por carga de una suspensión, la formación de torta en la superficie del filtro se realiza de manera gradual, a medida que se presenta una caída de presión en ella. Esto produce un aumento efectivo en la resistencia del lecho que lleva así a una caída gradual en la proporción de flujo  $Q$ . Por consiguiente, el volumen acumulativo del filtrado disminuye con el tiempo, cuando se filtra a presión constante, tal como se muestra en la Figura 6<sup>(Svarosky, 1990)</sup>.



Se puede decir que la proporción de flujo de filtrado a la presión de operación es una función del tiempo, porque el líquido se enfrenta con dos resistencias en serie, una de las cuales es la resistencia del medio ( $R_M$ ) la cual puede suponerse constante, y la otra llamada resistencia de la torta ( $R_c$ ) que aumenta con el tiempo. La resistencia del medio ( $R_M$ ) normalmente debe ser constante pero puede variar con el tiempo como resultado de un poco de penetración de sólidos en él y a veces también puede cambiar con la presión aplicada debido a la compresión de fibras en el mismo (Svarosky, 1990).

La ecuación 4.5 puede escribirse como:

$$Q = \frac{A \Delta P_c}{\mu \cdot (R_M + R_c)} \quad (4.7)$$

Sin embargo, en la práctica la suposición que se hace de que la resistencia del medio es constante raramente es cierto; porque cuando las partículas chocan con el medio se genera un poco de penetración y bloqueo inevitable del mismo.

Por último, la ley de Darcy puede expresarse de manera diferencial para relacionar la proporción de la tasa de flujo de filtrado y la caída de presión, como sigue:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{K \cdot A}{\mu} \cdot \frac{\Delta P}{h_c} \quad (4.8)$$



donde  $\Delta P$  es la caída de presión,  $h_c$  es la altura de la torta,  $\mu$  es la viscosidad del líquido,  $dV$  es el volumen de fluido que fluye en el tiempo  $dt$  y  $A$  es el área transversal del lecho.

#### 4.3.2 Formación de la torta de filtración.

La captura de los sólidos suspendidos en un líquido por un medio poroso puede clasificarse en dos categorías. La primera corresponde a los filtros de lecho profundo, los cuales están hechos con materiales granulares, y la segunda categoría es la formación de una torta por la deposición de las partículas sólidas sobre un medio permeable. La formación del revoque es en realidad una combinación de ambas, aunque ha sido básicamente estudiada como una filtración por formación de torta (Sorrentino, 1998).

Los parámetros que influyen en la formación de la torta son (Roccaro, 1997):

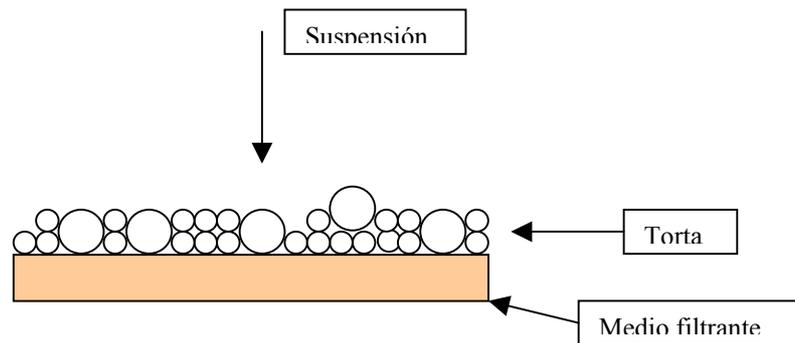
- Caída de presión,  $\Delta P$ : Puede ser constante en cuyo caso la velocidad de filtrado va disminuyendo a medida que transcurre el tiempo, o varía de acuerdo a la naturaleza de la fuerza aplicada.
- Área de filtrado,  $A_f$ : Usualmente constante con algunas excepciones, tales como la formación de tortas en filtros tubulares y/o tambor rotatorio, en los cuales el área de flujo es función del espesor de la torta.
- Viscosidad del fluido,  $\mu$ : Generalmente esta propiedad es proporcional al inverso de la temperatura; por tanto,



si la temperatura durante el proceso de filtración es constante y el líquido se comporta como un fluido Newtoniano, ésta no varía.

- Resistencia específica de la torta,  $r_c$ : Esta propiedad permanece constante para el proceso de filtración donde las tortas son incompresibles y varía cuando las tortas son compresibles; depende de la presión aplicada, del grado de consistencia de la torta y del contenido de sólidos en la suspensión.
  
- Resistencia del medio filtrante,  $R_M$ : Es generalmente constante para el mismo tipo de medio filtrante y una determinada granulometría, aunque puede variar con el tiempo como resultado de la penetración de partículas sólidas en los intersticios del mismo, y otras veces puede cambiar con la presión aplicada debido a la compresión del material fibroso que constituye el medio.

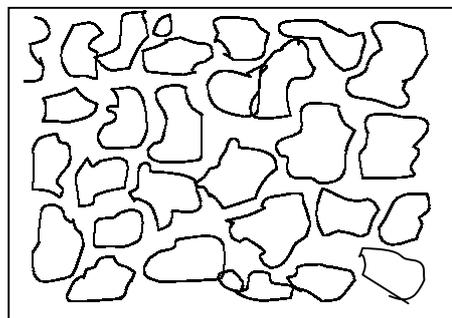
En una superficie de filtración, el medio filtrante tiene una caída de presión inicial relativamente baja y, como puede verse en la Figura 7, partículas del mismo tamaño o más grande que las aperturas crean pasajes más pequeños que dejan pasar las partículas aún más pequeñas de la suspensión. Una torta de filtración se forma de manera tal que a su vez funcione como un medio para la filtración de la suspensión que entra de manera subsecuente.



**FIGURA 7. Mecanismo de formación de torta de filtración**

Nótese que el modelo descrito y mostrado en la Figura 7 es el de la filtración tipo torta, donde las partículas y el acercamiento del líquido hacia el medio se da con un ángulo de  $90^\circ$  y ningún esfuerzo hace perturbar o prevenir la formación de la torta.

Por lo general, las partículas que conforman la torta se encuentran en contacto entre sí. En el caso de partículas muy pequeñas llamadas coloides (menos de 2 micrones), pueden estar separadas físicamente, debido a las fuerzas electrostáticas de repulsión. Por tanto existen en la torta espacios vacíos no ocupados por los sólidos y que constituyen los poros por donde fluye el líquido a través de la torta, tal como se muestra en la Figura 8:



**FIGURA 8. Estructura porosa de la torta**



Un material de concentración de sólidos de torta constante (fracción de volumen de torta ocupado por los sólidos o solidosidad  $\epsilon_s$ ), es, por consiguiente, *incompresible* y este tipo de filtración es conocido como filtración de torta incompresible. La mayoría de los siguientes conceptos también involucran a tortas compresibles, las cuales generalmente se consideran parte de esta teoría básica.

En la filtración incompresible la concentración de sólidos de la torta permanece constante, así como para cada unidad de volumen de la suspensión, el volumen de la torta de filtración se incrementa de manera uniforme y en cantidad constante. Igualmente el volumen del filtrado es uniforme y constante con respecto a cada unidad de volumen de la suspensión filtrante.

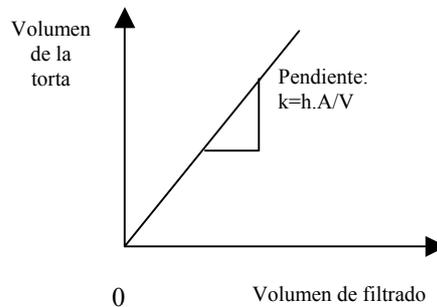
La proporción de deposición de la torta, sin embargo, no será uniforme porque cada nuevo elemento de la misma incrementa la resistencia total al paso del filtrado a través de la nueva capa de torta que se forma y eventualmente a través del medio filtrante. La relación uniforme entre el volumen de la torta y el volumen de filtrado se ilustra en la Figura 9.

La constante de proporcionalidad  $\kappa$  que relaciona lo antes dicho, puede ser usada para dar una ecuación para la profundidad de la torta, a cualquier instante en el tiempo:

$$h_c = \frac{\kappa \cdot V}{A} \quad (4.9)$$

esto puede sustituirse en la ecuación 4.8 para dar:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{A^2 \Delta P K}{\kappa V_L \mu} \quad (4.10)$$



**FIGURA 9. Relación proporcional entre el volumen de la torta y el volumen de filtrado.**

#### 4.3.3 Ecuación fundamental para la formación de la torta.

Un balance de masa, considerando un diferencial de torta de espesor  $dh$ , durante la formación de la torta, lleva a una relación entre el volumen de filtrado y la altura de la torta. Suponiendo que la masa de sólidos depositada en la torta es igual a la masa de sólidos que estaba suspendida en el líquido recogido como filtrado más la masa de sólidos que estaba en el líquido que queda atrapado en la torta, la expresión diferencial referente a la ecuación (4.9) es la siguiente:

$$dh = \kappa \cdot \frac{dV_L}{A} \quad (4.11)$$

Tomando en cuenta la masa de torta depositada por unidad de área se tiene que multiplicando el numerador y el denominador de la ecuación 4.10 por el producto del parámetro de concentración (solidosidad)  $\varepsilon_s$  y la densidad del sólido ( $\rho_s$ ), se obtiene:

$$\frac{dV}{dt} = \left( \frac{A}{\kappa V_L \varepsilon_s \rho_s} \right) \left( \frac{K \varepsilon_s \rho_s}{1} \right) \left( \frac{A \Delta P}{\mu} \right) \quad (4.12)$$

La ecuación 4.9 también puede multiplicarse por la solidosidad de la torta y la densidad para dar:

$$h_c \varepsilon_s \rho_s = \frac{\kappa V_L}{A} \varepsilon_s \rho_s \quad (4.13)$$

donde  $A h_c \varepsilon_s \rho_s$  es la masa de sólidos secos depositados en la torta; así, la ecuación anterior expresa la masa de sólidos secos por unidad de área, donde  $m_s$  puede ser expresada como:

$$m_s = \frac{M_s}{A} = \frac{\kappa V_L \varepsilon_s \rho_s}{A} \quad (4.14)$$

La permeabilidad de la torta, la fracción de volumen de torta y la densidad del sólido son constantes para una torta incompresible y pueden, por consiguiente, ser reemplazados por una sola constante llamada “resistencia específica”  $\alpha$ , la cual tiene como unidades  $m.Kg^{-1}$ :



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

Sustituyendo las ecuaciones 4.14 y 4.15 en la ecuación 4.12 se obtiene:

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

la cual es la ecuación diferencial que se usará en las siguientes descripciones matemáticas de la filtración.

La ecuación (4.16) no puede resolverse sin algún método que calcule la masa de sólidos secos depositados por unidad de área de filtro<sup>(Rushton,1996)</sup>.

#### 4.3.3.1 Filtración a presión constante<sup>(Rushton,1996)</sup>.

Para el análisis del proceso de filtración a presión constante, se introduce un nuevo parámetro de concentración ( $\omega$ ), el cual relaciona la masa de sólidos por unidad de volumen de líquido, es decir:

$$\omega = \frac{\text{Masa de sólidos}}{\text{Volumen de líquido}} \quad (4.17)$$

A menudo se supone que  $m_s$  puede obtenerse a partir de  $\omega$ , como sigue:



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

Sustituyendo las relaciones antes expuestas en la ecuación 4.12, reestructurándola e integrando como sigue se tiene que:

$$\int_0^t dt = \frac{\mu\omega\alpha}{A^2\Delta P} \int_0^{V_L} V_L dV \quad (4.19)$$

así:

$$t = \frac{\mu\omega\alpha}{A^2\Delta P} \cdot \frac{V_L^2}{2} \quad (4.20)$$

La pérdida de presión debido al flujo de filtrado a través del medio filtrante se desprecia. La caída de presión en el medio  $\Delta P_M$  puede sumarse a la caída de presión a través de la torta de filtración  $\Delta P_C$  para dar la caída de presión total:

$$\Delta P = \Delta P_C + \Delta P_M \quad (4.21)$$

Aplicando la Ley de Darcy a ambos términos:

$$\Delta P = \frac{\mu\omega\alpha}{A^2} V_L \frac{dV}{dt} + \frac{\mu}{A} \frac{L_M}{K_M} \frac{dV}{dt} \quad (4.22)$$



donde  $L_M$  y  $K_M$  son la profundidad y la permeabilidad del medio, respectivamente, si éstas permanecen constantes pueden ser reemplazadas por una sola constante conocida como la resistencia del medio  $R_M$ , con unidades  $m^{-1}$ :

$$R_M = \frac{L_M}{K_M} \quad (4.23)$$

Sustituyendo la ecuación anterior en la ecuación (4.22), integrando y reestructurando se obtiene la ecuación:

$$\frac{t}{V_L} = \frac{\mu\alpha\omega}{2A^2\Delta P}V_L + \frac{\mu R_M}{A\Delta P} \quad (4.24)$$

Esta ecuación es una línea recta donde  $t/V$  es la variable dependiente y  $V$  la variable independiente. Así mediante un gráfico de datos experimentales de  $t/V$  contra  $V$  se puede obtener la pendiente y la intercepción de la ecuación 4.24:

$$Pendiente = \frac{\mu\alpha\omega}{2A^2\Delta P} \quad (4.25)$$

$$Intercepción = \frac{\mu R_M}{A\Delta P} \quad (4.26)$$

Si la viscosidad del líquido ( $\mu$ ), el área del filtro ( $A$ ), la presión de filtración ( $\Delta P$ ) y la masa de torta seca por unidad de volumen ( $\omega$ ), de la ecuación (4.25) y (4.26), se conocen, los valores gráficos

pueden usarse para calcular la resistencia específica de la torta ( $\alpha$ ) y la resistencia del medio filtrante ( $R_M$ ).

#### 4.3.3.2 Método de Formación de torta<sup>(Marano y Rivas, 1999)</sup>.

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

$$t = a.V_L^2 + b.V_L \quad (4.27)$$

donde:

$$a = \frac{r_c \cdot K \cdot \mu}{2A^2 \cdot \Delta P} \quad (4.28)$$

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

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

##### 4.3.3.2.1 Método Lineal<sup>(Marano y Rivas, 1999)</sup>.

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



$$\frac{t}{V_L} = a.V_L + b \quad (4.30)$$

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

#### 4.3.3.2 Método cuadrático (Marano y Rivas, 1999).

Este método se basa en un ajuste por mínimos cuadrados de los datos experimentales a la ecuación 4.27, con lo que se obtienen los valores de a y b, que permiten después obtener el valor de  $r_C$  como el valor de  $R_M$ .

#### 4.3.3.3 Método de permeación de torta (Marano y Rivas).

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

$$\frac{V_L}{t} = \frac{A\Delta P}{(r_C.h_C + R_M).\mu} \quad (4.31)$$

El término de la derecha representa la pendiente de la recta descrita y permite obtener la resistencia específica, con la que es posible determinar la permeabilidad como el inverso de ésta.

#### 4.3.4 Porosidad (Baijal,1982).

En sentido general, un medio poroso es un cuerpo sólido con huecos, aunque un metal hueco cilíndrico no es clasificado como un material poroso. Por lo tanto, se puede definir un medio poroso como un cuerpo sólido el cual contiene espacios vacíos o poros que son interconectados, y son dispersos aleatoriamente o en un orden geométrico.

Existe una variedad de cuerpos porosos naturales, con amplias variaciones de tamaños de poro y con diferentes arreglos geométricos, los cuales pueden ser clasificados bajo dos criterios.

- Cuerpos porosos y permeables: Cuando los poros son interconectados en forma de canales continuos que permiten el paso del fluido.
- Cuerpos porosos e impermeables: Cuando el espacio de poro no forma canales de flujo que facilitan el paso de fluido de extremo a extremo del medio poroso.

La porosidad de la torta  $\varepsilon$  puede definirse como la fracción de espacios vacíos que se encuentran en la torta; dicha porosidad se expresa como la fracción de volumen de esos espacios.

$$\varepsilon = \frac{(V_C - V_S)}{V_C} = 1 - \frac{\frac{m_s}{\rho_s}}{A \cdot h_C} \quad (4.32)$$



Por otra parte se emplea el término solidosidad ( $\varepsilon_s$ ) anteriormente mencionado, para indicar la fracción del volumen de la torta ocupado por las partículas sólidas.

$$\varepsilon_s = 1 - \varepsilon \quad (4.33)$$

En muchos procesos de separaciones sólido-líquido el término más empleado para evaluar la concentración de sólido a menudo es la porosidad.

La porosidad depende en gran medida de la manera en la cual las partículas sólidas se empaquetan juntas para formar un medio poroso.

#### 4.3.5 Permeabilidad<sup>(Rushton, 1996)</sup>.

La permeabilidad de la torta es un parámetro que indica la facilidad de flujo de fluido a través de la misma.

Las características de la permeabilidad en el caso en que el líquido fluirá dentro de un medio poroso, incluyendo las tortas filtrantes, representan, por consiguiente, un parámetro importante que ha sido estudiado por muchos trabajos de investigación. Puede decirse que entre los factores que afectan la permeabilidad se incluyen el tamaño de partículas que constituye el medio poroso y la porosidad.



La ecuación mejor conocida para la permeabilidad es debida a Kozeny[1972]:

$$K = \frac{\varepsilon^3}{c(1-\varepsilon)^2 S_v^2} \quad (4.34)$$

donde  $S_v$  es el área de la superficie específica por unidad de volumen de las partículas y  $c$  es la constante de Kozeny que normalmente toma el valor de 5 en lecho fijo o de movimiento lento y 4,36 en movimiento rápido del lecho. Sustituyendo la ecuación 4,34 en la Ley de Darcy (ecuación 4.8) se obtiene la ecuación de Carman y Kozeny:

$$\frac{\Delta P}{h} = \mu \left( \frac{5(1-\varepsilon)^2 S_v}{\varepsilon^3} \right) \cdot \frac{dV}{dt} \cdot \frac{1}{A} \quad (4.35)$$

En la filtración normalmente es posible deducir una permeabilidad empírica de una simple prueba de laboratorio o frente a datos operacionales existentes. En la práctica, la permeabilidad de la torta filtrante es función de la porosidad, la forma de la partícula y el empaquetamiento, el tamaño de la partícula y la distribución, la tasa de flujo a la que la torta fue formada, etc. Así sólo deben usarse las relaciones teóricas para la permeabilidad como guía para estimar la permeabilidad en la ausencia de datos operacionales; las permeabilidades medibles pueden estar fácilmente uno o dos órdenes de magnitud por debajo de las estimadas por las ecuaciones anteriores. Es cierto que mientras las partículas sean más finas, y la distribución de tamaño de partícula más ancha, mayor será la desviación de la relación teórica de permeabilidad.



La presión de compresión en un punto de la torta, se define como el cociente de la fuerza de compresión debida a la fricción y el área de sección transversal de la torta.

Siempre que la estructura de la torta no se vea afectada por la presión de compresión, se dice que la misma es incompresible. Si por el contrario la estructura de la torta se hace más compacta por la acción de esta presión, se dice que la torta es compresible. Por tanto es importante mencionar que durante la compresión, la porosidad de la torta disminuye y la resistencia al flujo de líquido a través de ella se incrementa.

Así, se introduce el concepto de resistencia específica de la torta,  $r_c$ , como el inverso de la permeabilidad:

$$r_c = \frac{1}{K} \quad (4.36)$$

La resistencia específica de la torta debe ser constante para las tortas incompresibles, pero puede cambiar con el tiempo como resultado de la posible consolidación de flujo de la torta, es decir, la deposición continua de sólidos capa tras capa. Esta resistencia se diferencia de  $\alpha_c$  en las unidades que posee ( $L^{-2}$ ).

La mayoría de las tortas son compresibles y su resistencia específica cambia con la caída de presión  $\Delta P$ .



#### 4.3.6 Compresibilidad de tortas<sup>(TILLER, 1987)</sup>

Después de que la torta es producida por filtración, el líquido es entonces comprimido por el uso de presión mecánica. La estructura final de la torta caracterizada por porosidad vs. distancia, representa la condición inicial para la compresión. Asumir que la velocidad de flujo es independiente de la distancia y es una función de solo del tiempo en filtración permite el uso de ecuaciones diferenciales ordinarias para determinar las relaciones entre tiempo, volumen de filtrado, espesor de la torta, porosidad y presión. Como asumir esto no es válido cuando las tortas son comprimidas, la solución matemática del proceso de compresión requiere de una ecuación diferencial parcial.

La compresibilidad de tortas es de importante significado para el comportamiento de filtración y de compresión. Está caracterizada por los parámetros que aparecen en ecuaciones constituidas empíricamente relacionando solidosidad  $\varepsilon_s$  (fracción volumétrica de sólidos) y la resistencia específica de flujo  $\alpha_c$  para valores locales de presión efectiva. Escogiendo funciones potenciales de la presión efectiva  $p_s$ , en la forma  $\varepsilon_s = (1 + p_s/p_a)^\beta$ ,  $\alpha_c = \alpha_o(1 + p_s/p_a)^n$  y  $K = K_o(1 + p_s/p_a)^\delta$ . Cuando  $n > 1$ , el material es considerado altamente compresible.

#### 4.3.7 Flujo a través de tortas compresibles<sup>(TILLER, 1999)</sup>

Las soluciones de las ecuaciones diferenciales que gobiernan el flujo a través de sedimentos y tortas compresibles



requieren de ecuaciones consecutivas que relacionen permeabilidad ( $K$ ), resistencia específica de flujo ( $\alpha_c$ ), y solidosidad ( $\varepsilon_s$ ), con la presión efectiva,  $p_s$ . Las ecuaciones empíricamente constituidas han sido generalmente en la forma de funciones de potencia de  $p_s$ .

Se deben usar las siguientes ecuaciones:

$$(\varepsilon_s/\varepsilon_{s0})^{1/\beta} = (\alpha_c/\alpha_0)^{1/n} = (K/K_0)^{-1/\delta} = 1 + p_s/p_a \quad (4.37)$$

Donde  $\beta$ ,  $n$ ,  $\delta$  y  $p_a$  son parámetros empíricos y  $\varepsilon_{s0}$ ,  $\alpha_c$  y  $K_0$  son valores para una torta sin tensión. Los parámetros en la ecuación (4.37) están relacionados como sigue:

$$\alpha_c K \varepsilon_s = 1, \quad \delta = n + \beta \quad (4.38)$$

lo cual muestra que dos de éstos parámetros son independientes.

Debería notarse que la resistencia  $\alpha_c$  y la permeabilidad  $K$  no están en una relación recíproca.

Las magnitudes de  $n$  y  $\delta$ , determinan el grado de compresibilidad de la torta y tienen un gran efecto en el comportamiento de la misma bajo cargas. Cuando  $n$  y  $\delta$  son más grandes que la unidad, toma lugar un cambio profundo en el comportamiento, y la matriz de partículas que forman la torta o el sedimento se dice que es altamente compresible. Bajo presiones relativamente bajas, el incremento de la presión de bombeo no incrementa la velocidad de flujo ni la porosidad de la torta.

Tentativamente las tortas de filtrado se pueden clasificar a partir de los valores que tomen indistintamente los índices  $n$  o  $\delta$ , si su valor es cero la torta es incompresible, si está entre 0 y 0,25

es ligeramente incompresible, entre 0,25 y 0,6 es moderadamente compresible, entre 0,6 y 1 es altamente compresible y si es mayor a 1 es muy compresible. (TILLER Y YEN, 1987)

#### 4.3.8 Método de cálculo para la compresibilidad de las tortas

Para la presente teoría, a partir de la ley de Darcy, ha sido necesario suponer que las partículas no atraviesan el medio filtrante y que tampoco quedan atrapadas en el interior del mismo, sino que el mecanismo de deposición superficial (formación de torta) se mantiene en todo momento y las características del medio filtrante permanecen sin cambio durante el proceso. (WAKEMAN, 1985); (TILLER, 1987)

$$\varepsilon_{sav} = \frac{\varepsilon_{s0}(1-\delta)}{(1-n)} \left[ \frac{(1+\Delta\Pi_c)^{(1-n)} - 1}{(1+\Delta\Pi_c)^{(1-\delta)} - 1} \right] \quad (4.39)$$

$$K_{av} = \frac{K_0 p_a}{(1-\delta)\Delta P_c} \left[ (1+\Delta\Pi_c)^{(1-\delta)} - 1 \right] \quad (4.40)$$

$$\alpha_{av} = \alpha_0 (1-n) \frac{\Delta\Pi_c}{(1+\Delta\Pi_c)^{(1-n)} - 1} \quad (4.41)$$

Estas expresiones fueron desarrolladas por Tiller para el estudio de la compresibilidad de tortas. (TILLER, 1999)

Como consecuencia de las suposiciones realizadas, la solidosidad promedio, la resistencia específica al flujo y la permeabilidad promedio de la torta son función solamente de la



caída de presión en la torta, por lo que estas características permanecen constantes mientras la caída de presión en la torta permanezca también constante.

Empíricamente se ha encontrado que a presiones moderadas se cumple la siguiente relación (FOUST,1984):

$$\alpha_{cav} = \alpha_{mo} + b(\Delta p_c)^s \quad (4.42)$$

donde:  $\alpha_{cav}$  es la resistencia específica másica promedio de la torta,  $\alpha_{mo}$  y  $b$  son constantes empíricas y  $s$  es la compresibilidad.

La resistencia específica másica promedio de la torta se relaciona con la resistencia específica promedio de la torta por medio de la siguiente expresión (TILLER,1987):

$$\alpha_{cav} = \frac{\alpha_{av}}{\rho_s} \quad (4.43)$$

Otra relación empírica más simple, usada con más frecuencia, es la de Lewis (FOUST,1984);(PERRY,1995):

$$\alpha_{cav} = \alpha'_{mo} (\Delta p_c)^n \quad (4.44)$$

donde:  $\alpha'_{mo}$  es una constante empírica y  $n$  es el coeficiente de compresibilidad.

Esta ecuación es errónea para valores bajos de diferencia de presión en la torta, ya que predice que la resistencia específica másica promedio es igual a cero cuando la caída de presión es igual a cero. Sin embargo, la ecuación (4.44) es una relación



sencilla de usar ya que las constantes de este modelo se pueden determinar fácilmente, representando los datos experimentales de la diferencia de presión en la torta contra la resistencia específica másica promedio en papel logarítmico, hallando la mejor recta que ajuste los datos por el método de mínimos cuadrados.

#### **4.4 Proceso de filtración en pozos.**

En los procesos de perforación de pozos la filtración se produce gracias a una diferencia de presión positiva entre *el lodo y la formación*, donde en el momento de perforar la formación ésta se comporta como una malla o tamiz, donde los sólidos se depositan sobre las paredes del pozo y el filtrado invade la formación. La capa de sólidos del lodo depositada por encima del medio filtrante recibe el nombre de *revoque*.

En la perforación de pozos el proceso de filtración debe ser controlado de manera adecuada para asegurar un funcionamiento exitoso del lodo. Esto implica: controlar la velocidad de filtración, control del espesor y textura del revoque y control de las propiedades químicas del filtrado. Este tipo de control tiene como objetivo formar un revoque delgado y resistente sobre la superficie de las formaciones permeables e impedir una pérdida excesiva de filtrado.



#### 4.4.1 Requerimientos para la filtración.

Primeramente, para que la filtración tenga lugar en el pozo, debe haber una presión diferencial positiva entre el lodo y la formación, esta presión es la diferencia entre la presión hidrostática del lodo y la presión de la formación; se debe considerar positiva ya que así se tiende a forzar el filtrado hacia la formación; esta formación debe ser *permeable*, para que tenga la capacidad de permitir que el fluido pase a través de ella. La permeabilidad está relacionada con el tamaño y configuración de los pasajes que conectan entre sí los espacios porosos en la roca. En una formación impermeable no puede formarse revoque o producirse pérdida de filtrado.

#### 4.4.2 Tipos de filtración que ocurren en los pozos.

En el pozo ocurren dos tipos de filtración: dinámica y estática. La *filtración estática* tiene lugar cuando el lodo no está en movimiento. Cuando ésta se presenta el revoque se hace más grueso con el tiempo; debido a que el revoque restringe el flujo de filtrado, la tasa o velocidad de filtración disminuye con el tiempo. La *filtración dinámica* tiene lugar cuando el lodo se encuentra en circulación. Este tipo de filtración erosiona el revoque y se logra alcanzar un equilibrio cuando la deposición sobre el revoque es igual a la erosión, teniéndose así que el espesor del revoque y la tasa de filtración permanecen constantes. El revoque dinámico es más delgado que el estático, pero la pérdida de filtrado es mayor.



La filtración estática se mide por medio de dos ensayos estándar de la API: uno a baja presión y otro a alta temperatura – alta presión. El ensayo a baja presión se conoce como el ensayo API, mientras que el segundo se menciona como el ensayo HP-HT (alta presión y alta temperatura de sus siglas en inglés). La diferencia entre ambos está en que el ensayo API se realiza a 100 psi de presión y a temperatura ambiente; mientras que el ensayo HP-HT se emplea generalmente a 500 psi de presión diferencial y a una temperatura por encima de los 200 °F (93 °C).

Estos tipos de ensayos no se correlacionan directamente, ya que las sustancias químicas del lodo se comportan en forma diferente en ambas condiciones de operación de cada ensayo. En pozos de baja temperatura puede llevarse a cabo sólo el ensayo API; pero, si esta variable excede los 250 °F ambos deben llevarse a cabo. Una pérdida de filtrado de aproximadamente 15 cm<sup>3</sup> en 30 min. en el ensayo HP-HT, es generalmente un requerimiento para tener dificultades mínimas en el pozo cuando se trata un pozo de alta temperatura.

Lamentablemente los ensayos de filtración dinámica han quedado limitados al laboratorio. Resulta difícil establecer una correlación entre las pruebas dinámica y estática. Sin embargo un tratamiento apropiado del lodo para el control de la pérdida de filtrado basado en las pruebas de API y de HP-HT, generalmente produce una pérdida dinámica de filtrado dentro de un rango considerable de manera satisfactoria.



#### **4.5 Teoría de la doble permeabilidad**(LEZAMA Y OTROS,2000).

Para un análisis más completo de las características del revoque obtenido durante la prueba de filtración estática de lodos de perforación, se introduce el concepto de la doble permeabilidad. Este concepto propone que el revoque externo debe ser considerado como la suma de dos capas con diferentes permeabilidad y porosidad (existencia de dos zonas perfectamente delimitadas). La torta formada inmediatamente en la superficie es llamada “revoque incipiente” mientras que la parte más externa de la torta es denominada revoque darcyano.

Las características de la etapa incipiente se ven fuertemente influenciadas por el sustrato, por lo que conviene estudiarlas directamente sobre el núcleo poroso en el cual se usará el fluido de perforación y no sobre papel de filtro. Durante la etapa incipiente de formación del revoque se obtiene la mayor pérdida de volumen de filtrado.

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 permeación de dicha zona.



#### 4.5.1 Formación del Revoque.

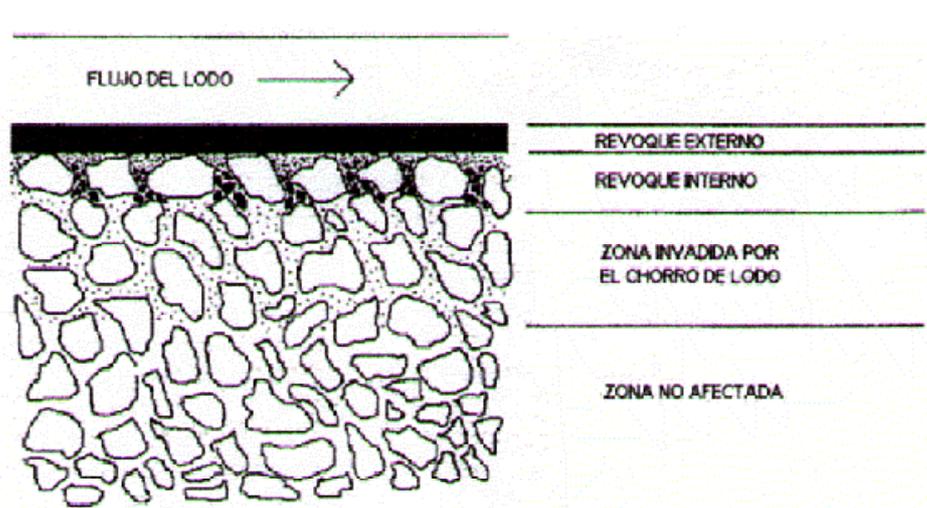
La filtración de los lodos sobre la superficie porosa del yacimiento es un fenómeno inevitable, debido a que la presión que ejerce la columna de lodo sobre las paredes del hoyo es mayor que la presión de poro de la formación. De esta manera, parte de los sólidos dispersos en el lodo se depositan sobre la pared del hoyo, formando una torta o revoque<sup>(GRAY,1998)</sup>.

Para que se forme un revoque, es esencial que el lodo contenga algunas partículas cuyo tamaño sea ligeramente menor que el de la apertura de los poros de la formación. Estas partículas, que son conocidas como “partículas formadoras de puentes”, son atrapadas en la superficie de los poros, mientras que las partículas más finas son, en principio, transportadas a una mayor profundidad en el interior de la formación; su nombre se debe al hecho de que ellas se agrupan en el interior del poro formando una estructura estable, semejante al arco de un puente.

El paso de las partículas más pequeñas se impide, progresivamente, a medida que los puentes se forman; cuando los espacios libres existentes entre las partículas que forman los puentes son lo suficientemente pequeños, solamente ocurre el paso de líquido hacia la formación, y todas las partículas sólidas son retenidas, formando el revoque. La suspensión de partículas finas que ingresa a la formación antes y durante el establecimiento de los puentes se conoce como el “chorro de lodo (“mud spurt”); el líquido que entra posterior a la formación de los puentes es el filtrado<sup>(SORRENTINO,1998)</sup>.

Como resultado del proceso antes descrito, se distinguen tres zonas en la formación permeable donde ha ocurrido la filtración del lodo de perforación, como se muestra en la figura 10:

- 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 10. Filtración del lodo a través de la formación**(GRAY,1998).



En la perforación de pozos, el “chorro de lodo” puede ser considerable (llegándose incluso a perderse la circulación del lodo en el hoyo), a menos que el lodo contenga partículas del tamaño requerido para formar los puentes en los poros de la formación, y así establecer una base sobre la cual el revoque se pueda formar. Sólo partículas de un tamaño determinado relativo al tamaño del poro pueden formar puentes. Partículas más grandes que la apertura del poro no pueden entrar en el mismo, y son arrastradas por la corriente de lodo; partículas más pequeñas que la apertura del poro invaden a la formación expuesta; pero las partículas de un cierto tamaño crítico se introducen entre 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, aproximadamente entre 1 y 2 segundos.

Respecto al tamaño crítico de partícula requerido para el proceso de formación de puentes, existen dos reglas empíricas: la regla del “1/3” y la relación “ $d^{1/2}$ ”(ABRAMS,1997).

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(Gray,1998).

A pesar de que esta regla es apoyada por varios autores, no es conveniente aplicarla 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 obstruir el poro.

La relación “ $d^{1/2}$ ” sugiere que para un proceso de formación de puentes ideal, el porcentaje en peso acumulado de los sólidos formadores de puentes debe ser directamente proporcional a la raíz cuadrada de su tamaño de partícula<sup>(Gray,1998)</sup>.

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 comprendidos desde un valor superior que sea ligeramente menor que la apertura del poro más grande de la formación a ser perforada, hasta un valor inferior que sea aproximadamente igual a un tercio de ese tamaño. Adicionalmente, debe haber partículas más pequeñas en un rango que incluya hasta el tamaño coloidal, para poder formar puentes en los poros más pequeños de la formación y para poder ocupar los intersticios entre las partículas más grandes. En todo caso, la formulación ideal del lodo es aquella que minimice tanto al “chorro de lodo” y sus sólidos suspendidos, así como al volumen de filtrado<sup>(GRAY,1998)</sup>.

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



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

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

La mejor manera de determinar el tamaño adecuado de las partículas formadoras de puentes es hacer pruebas de filtración sobre núcleos de la formación de interés. De hecho, las pruebas de filtración API<sup>(API,1991)</sup>, efectuadas sobre papel de filtro pueden reportar un volumen de filtrado despreciable, pero al ser efectuadas sobre un núcleo de la formación permeable del pozo, las pérdidas de filtrado pueden ser apreciables. Evidentemente, el proceso de formación de puentes en ambos casos es distinto, lo que se traduce en “chorros de lodo” diferentes. Cuando el “chorro de lodo” es considerable, este puede causar una obstrucción importante del medio, incrementando la caída de presión en el mismo; esto provoca que la caída de presión en el revoque disminuya, con lo que también disminuye su compactación. Todo esto se traduce en un aumento en el volumen de filtrado.

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



#### 4.5.2 Efecto de la presión sobre el revoque<sup>(RUSHTON, 1996)</sup>.

La manera más económica de quitar el líquido de una torta de filtración incompresible es filtrar a la presión más baja requerida para superar el arrastre del fluido dentro de la torta. Con el aumento de la presión no se logra una torta más seca (contenido de sólido más alto) pero podría acelerar el proceso de escurrimiento. Todas las tortas filtrantes exhiben alguna forma de compresibilidad en la práctica, ya que aumentando la presión de filtración se incrementa la concentración de sólidos en la torta. Un aumento en la concentración conlleva a una disminución en la permeabilidad del revoque, haciendo la resistencia específica mayor.

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



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

$$\Delta P_M = \frac{\mu R_M}{A} \frac{dV}{dt} \quad (4.45)$$

Así es posible calcular la caída de presión a través de la torta  $\Delta P_C$  mediante la ecuación 4.21.

Otra forma de calcular la caída de presión a través de la torta es empleando la formulación utilizada por Tiller y Lewis, la cual se describe de la siguiente forma:

$$\Delta P_c = \Delta P \left( 1 - \frac{b'}{2.a'.V' + b'} \right) \quad (4.46)$$

#### **4.6 Daño a la formación por efectos de la filtración.**

El daño a la formación puede definirse, como la reducción de la capacidad de flujo de la zona productora debido a todos aquellos procesos físicos o químicos que puedan ocurrir en el yacimiento o alrededor de éste, que ocasionen una disminución de la permeabilidad efectiva al flujo de fluidos.

Para lograr que un pozo se mantenga estable y que se minimicen los daños a la formación debe existir una compatibilidad entre el filtrado, la formación y los fluidos de la misma.



Si se produce una invasión elevada de la formación permeable por parte del filtrado, se puede depositar un revoque grueso sobre las paredes de la formación originándose un aprisionamiento, agravando los problemas de sobrepresión y succión relacionados con las maniobras; y de manera global se provoca mayor dificultad en el proceso de filtración debido a la cementación del revestimiento en la formación.

Las características permeables de la formación pueden ser bloqueadas por una reacción adversa entre el filtrado y la formación o por la entrada de los sólidos del lodo en el interior de la formación. Este daño puede reducirse al mínimo manteniendo una velocidad de filtración baja y controlando el tipo y cantidad de sólidos en el lodo.

#### 4.6.1 Causas básicas del daño a la formación. (GUÍAS DE POZOS II, 1999)

La existencia del daño a la formación se debe básicamente a las siguientes causas:

- Invasión de partículas extrañas hacia la formación
- Hidratación de arcillas de la formación.
- Desalojo y movimiento de partículas de la formación.
- Fluidos químicamente incompatibles.
- Bloqueo con emulsiones y bloqueo con agua.



El uso de fluidos de perforación (donde la presión hidrostática es mayor a la presión de formación) puede causar daño a la formación debido a:

- La migración de partículas sólidas que taponan los poros de las rocas.
- La invasión de filtrado de lodo a la formación.

4.6.2 Daño causado por la invasión de partículas sólidas presentes en el lodo hacia la formación. (GUÍAS DE POZOS II, 1999)

Los lodos convencionales se caracterizan principalmente por la cantidad de sólidos que contienen. Estas partículas materiales contenidas en el lodo de perforación (ripios, agentes humectantes, aditivos densificantes, arena, etc.), pueden a su vez invadir el espacio poroso alrededor del hoyo, debido al diferencial de presión, a medida que penetran se encuentra una menor resistencia a la invasión y dependiendo de la cantidad pueden llegar a taponar las gargantas de los poros alrededor del pozo.

Luego, cuando se induce el pozo a producción, las fuerzas de arrastre tratan de sacar dichas partículas que han penetrado a la formación (efecto de limpieza), pero el número de caminos o poros es cada vez menor hacia el hueco, y las partículas tratan de pasar a través de estos canales, los cuales van disminuyendo en número y por lo tanto tienen la tendencia de causar taponamiento.

El proceso de producción, está limitado a un área de poca extensión alrededor del pozo, es decir, no ocurre una penetración de las partículas muy profunda, pero su efecto puede ser tan



grande, como para ocasionar una reducción de la permeabilidad alrededor de un 90%, respecto a la original; influyendo negativamente en la productividad del pozo.

#### 4.6.3 Daño causado por invasión de filtrado de lodo

Todo lodo debe tener la propiedad de formar un revoque en la pared del hoyo. El revoque es el resultado del forzamiento, por diferencial de presión en una formación permeable, de los sólidos del lodo contra la cara del hoyo. Los factores que gobiernan la invasión de filtrado dentro de una formación arenosa son la distribución y tamaño de poros de la arena, distribución de tamaño de partícula de los sólidos del lodo y la habilidad plástica del mismo. (GUÍAS DE POZOS II, 1999)

Debido a la invasión de filtrado del lodo en el pozo se produce una disminución de la productividad del mismo. Por esta razón, una de las cosas que se debe tener en cuenta son los factores que favorecen la invasión del filtrado de lodo y por ende el de las partículas sólidas contenidas en el fluido de trabajo, este hecho es influenciado por (NOLDES, 1997):

- El radio de los poros de la formación, ya que mientras más grande sea el radio promedio de los poros, entonces podrán penetrar una mayor cantidad de partículas sólidas.
- Las altas densidades de los fluidos ocasionan una mayor presión, por lo tanto se induce mayor cantidad de filtrado de lodo hacia la formación.
- Presencia de fisuras y fracturas naturales en la roca de formación.

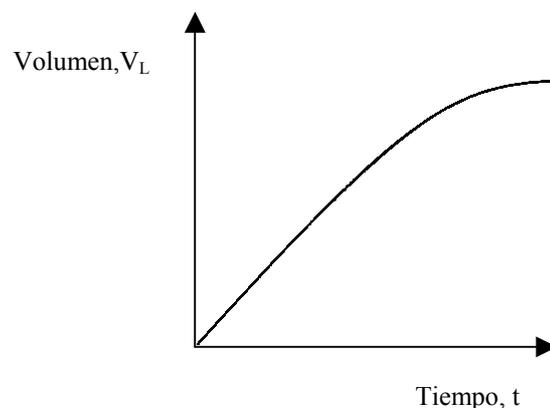
- El diámetro de las partículas contenidas en el fluido.
- Las bajas tasas de perforación, ocasionan la destrucción del revoque, esto origina un aumento de la pérdida de filtrado y por lo tanto mayor cantidad de sólidos que penetran.
- Las altas tasas de circulación de lodo ocasionan erosión en la película del revoque (desgaste), esto permite nuevamente un incremento de la invasión de filtrado.

#### **4.7 Procedimiento para el análisis de los datos de la curva de filtrado.**(SORRENTINO Y OTROS)

##### 4.7.1 Obtención de la curva de filtrado.

Al obtener los datos de filtración del revoque (masa de filtrado y tiempo), se procede a emplear la densidad del agua ( $1\text{gr}/\text{cm}^3$ ), para la obtención de los datos tiempo y volumen de filtrado.

Estos datos se representan gráficamente [ $V=f(t)$ ] obteniéndose una curva que describe el comportamiento del volumen de filtrado en el tiempo.



**FIGURA 11. Curva de filtrado**

#### 4.7.2 Identificación de la existencia de zonas (incipiente y darcyana) en la curva de filtrado empleando el método lineal.

De acuerdo a la expresión de la ley de proporción parabólica linealizada:

$$\frac{t}{V_L} = a.V_L + b \quad (4.47)$$

se procede a obtener datos de  $t/V_L$  para luego graficar  $t/V_L$  vs  $V_L$ .

#### 4.7.3 Identificación del comienzo de la zona darcyana.

- ▶ Realizar el gráfico  $t'/V'$  vs  $V'$  para  $t_0=0$  y  $V_0=0$ .

Este gráfico es idéntico al anterior ( $t/V_L$  vs  $V_L$ ), considerando que:

$$t' = t - t_0 \quad \text{y} \quad V_L' = V_L - V_0 \quad (4.48 \text{ a y } 4.48 \text{ b})$$

- ▶ Ir cambiando el valor de  $V_0$  (y su correspondiente  $t_0$ ) hasta que la mayor cantidad de los datos ajuste bien a una línea recta.

- ▶ Con el mejor ajuste de los datos, se determinan los parámetros  $t_0$  y  $V_0$ .

- ▶ El ajuste representa la expresión:  $\frac{t'}{V_L'} = a'.V_L' + b'$  (4.49)

donde la pendiente  $a' = \frac{\mu \cdot k}{2A^2 \Delta P K}$  (4.50)

y la intersección  $b' = \frac{\mu R^*}{A \Delta P}$  (4.51)

sabiendo que  $R^* = R_{Cl} + R_M$  (4.52)

#### 4.7.4 Estimación de la viscosidad efectiva de la goma Xanthana.

Derivando y reordenando la expresión parabólica :

$$t' = a' V'_L{}^2 + b' V'_L \quad (4.53)$$

se obtiene:

$$\frac{dV'_L}{dt'} = \frac{1}{2a'V'_L + b'} \quad (4.54)$$

la cual representa la variación del volumen de filtrado en el tiempo.

Suponiendo que la resistencia global es igual para el caso de permeación con agua que para el momento final de la filtración:

$$R_c = \frac{\Delta P}{\mu \cdot q} = \frac{\Delta P}{\mu_a q_a} = \frac{\Delta P}{\mu_g q_g} \Rightarrow \mu_g = \mu_a \frac{q_a}{q_g} \cdot \frac{\Delta P_g}{\Delta P_a} \quad (4.55)$$

donde:  $q_g = \frac{1}{A} \frac{dV'_L}{dt'} = \frac{1}{A(2a'V'_L + b')}$  (4.56)



$q_a$  se obtiene a partir de la pendiente del gráfico de permeación con agua del medio. Obteniéndose de dicha gráfica una ecuación lineal donde la pendiente ( $dV/dt$ ) se emplea en la siguiente ecuación:

$$q_a = \frac{1}{A} \frac{dV}{dt} \quad (4.57)$$

Calculando así  $\mu_g$ .

#### 4.7.5 Determinación de la Resistencia del medio filtrante.

Para determinar la resistencia del medio filtrante ( $R_M$ ), éste se permea con agua luego de haber formado un revoque sobre él mismo.

Con los datos  $V_L$  y  $t$  se obtiene  $dV_L/dt$ , donde:

$$R_M = \frac{1}{\mu_a} \frac{\Delta P A}{dV_L/dt} \quad (4.58)$$

Esta determinación se debe hacer para cada formulación, pero puede hacerse una sola vez y usarla como constante para esa formulación.



#### 4.7.6 Determinación de la Resistencia global de la torta.

Sustituyendo  $\frac{dV'_L}{dt'} = \frac{1}{2a'V'_L + b'}$  en la ecuación que describe la

ley de Darcy se obtiene:  $\frac{1}{A} \frac{dV'_L}{dt'} = \frac{1}{\mu_g (R_{CG} + R_M)} \Delta P$  ; luego

despejando  $R_{CG}$  se obtiene:

$$R_{CG} = \frac{A\Delta P}{\mu} (2a'V'_L + b') - R_M \quad (4.59)$$

#### 4.7.7 Determinación de la Resistencia de la etapa incipiente:

Sustituyendo la siguiente ecuación  $\frac{dV'_L}{dt} = \frac{1}{b}$  (4.60), en la ley de

Darcy se obtiene:

$$R_{CI} = \frac{\Delta P A}{\mu_g} b' - R_M \quad (4.61)$$

#### 4.7.8 Determinación de la Resistencia de la zona Darcyana.

Partiendo de que:

$$R_{CG} = R_{CI} + R_{CD} \quad (4.62)$$

se puede calcular la resistencia de la zona Darcyana, ya que se conocen los valores de las demás resistencias.



#### 4.7.9 Determinación de los parámetros de concentración $k$ y $\omega$ .

Para este cálculo es necesario conocer el valor de la solidosidad  $\varepsilon_s$ , la cual se expresa como:

$$\varepsilon_s = \frac{\text{volumen de sólidos}}{\text{volumen de sólidos} + \text{volumen de líquido}} \quad (4.63)$$

por lo que la proporción de volumen de torta depositada

$$k = \frac{V_c}{V_L} = \frac{h_c}{V_L} \cdot A = \left[ \frac{\varepsilon_s}{\phi_s} - 1 \right]^{-1} \quad (4.64)$$

$$\text{donde: } \phi_s = \frac{V_{SS}}{V_S} \quad (4.65)$$

Por otra parte la masa de torta seca viene dada por:

$$\omega = \frac{\text{masa de sólido}}{\text{volumen de líquido}} \quad (4.66)$$

$$\omega = \frac{M_c}{V_L} = \frac{m_c A}{V_L} = \frac{\rho_s \phi_s}{1 - \frac{\phi_s}{\varepsilon_s}} \quad (4.67)$$

esto permite introducir un término que simplifica la anterior ecuación, el cual se define como:



$$X_{\omega} = \frac{1}{1 - \frac{\phi_s}{\varepsilon_s}} \quad (4.68)$$

obteniéndose:

$$\omega = \rho_s \cdot \phi_s \cdot X_{\omega} \quad (4.69)$$

#### 4.7.10 Estimación de la permeabilidad Darcyana.

Viene expresada por la siguiente ecuación:

$$K_D = \frac{\mu_g (\varepsilon_s / \phi_s - 1)^{-1}}{2A^2 a' \Delta P} \quad (4.70)$$

#### 4.7.11 Estimación de la resistencia específica Darcyana.

Viene expresada por la siguiente ecuación:

$$\alpha_{CD} = \frac{2A^2 a' \Delta P}{\mu_g \omega} \quad (4.71)$$

Al conseguir  $\alpha_{CD}$  se puede obtener el valor del producto permeabilidad – solidosidad, el cual es usado con el propósito de disminuir el error experimental asociado a la medición de altura de torta usada para el cálculo de la permeabilidad o solidosidad por separado, dicho producto viene expresado por la siguiente ecuación:

$$K_D \varepsilon_s = \frac{1}{\rho_s \alpha_{CD}} \quad (4.72)$$



Así se emplean los cálculos anteriores y se puede obtener el producto permeabilidad- solidosidad de las zonas incipientes y global.

#### **4.8 Distribución de tamaño de Partícula.**

Las partículas son fragmentos de un sólido finamente dividido. Las propiedades de un sistema conformado por partículas dependen principalmente de su tamaño así como también de su forma, densidad y composición.

Por lo general, las partículas de un conjunto se encuentran en una amplia gama de tamaños, por lo que para describir un material, es necesario especificar no sólo los distintos tamaños de partículas presentes, sino también las cantidades relativas de cada tamaño. Esto constituye una distribución de tamaño de partícula y es el objeto del análisis granulométrico de un material. La mayoría de los métodos de análisis granulométrico no miden propiamente el tamaño de las partículas, sino alguna otra propiedad dependiente de éstas, a través de relaciones analíticas o empíricas que permiten expresar los resultados como un tamaño aparente.

Un 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 tanto para lograr la obtención del mejor revoque es necesario no sólo escoger cuidadosamente el tipo de materiales para controlar la pérdida de filtrado, sino también realizar estudios de la distribución de tamaño de partículas en el lodo.



#### 4.8.1 Caracterización del tamaño de partícula (Svarosky, 1990).

La caracterización de la partícula comprende la descripción de sus propiedades primarias en un sistema conformado por ellas, y es la base del trabajo en la tecnología de la partícula, la mayoría de las cuales, en la práctica, tienen forma irregular. En el caso de partículas sólidas la caracterización se realiza analizando su tamaño y su distribución.

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

#### 4.8.2 Descripción del tamaño de partícula(Svarosky, 1990).

Una partícula irregular puede describirse por un número de tamaños que dependen de qué dimensión o propiedad es medida. Existen básicamente tres grupos de tamaños: diámetros de esferas equivalentes, diámetros de círculos equivalentes y diámetros estadísticos.

El primer grupo de tamaños son los *diámetros de una esfera* cuyas propiedades (volumen, área proyectada, velocidad de sedimentación, etc.), son las mismas - ver tabla 4.1

Dentro de la clasificación de diámetros de esferas equivalentes es importante mencionar el diámetro de Sauter y el  $D_{3,2}$ .

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

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

El segundo grupo de tamaños son los *diámetros de un círculo*, que posee las mismas propiedades que el contorno proyectado de la partícula. En la tabla 4.2 se observa la lista de diámetros de círculo equivalente y la propiedad con la cual están relacionados.

El tercer grupo de tamaños son los *diámetros estadísticos* y se obtienen a partir de la medición de una dimensión lineal, por microscopía, paralela a una dirección fija. Ver Tabla 4.3.



Cada método de medición de tamaño de partícula arroja valores diferentes de éste, por lo tanto la selección pertinente debe tener relación a la propiedad o proceso que será controlado.

Por ejemplo, en los métodos de separación de sólido - líquido en los que el movimiento relativo de la partícula al fluido es el mecanismo gobernante (gravedad o sedimentación centrífuga, hidrociclones), resulta conveniente usar un método que mida el diámetro de caída libre o el diámetro de Stokes.

Para el proceso de filtración el método de diámetro superficie-volumen es el recomendado a dicho mecanismo de separación, el cual es calculado a través de la DTP, asumiendo que las partículas son esféricas, denominado  $D_{3,2}$ .

**Tabla 4.2 Lista de diámetros de círculo equivalente**

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

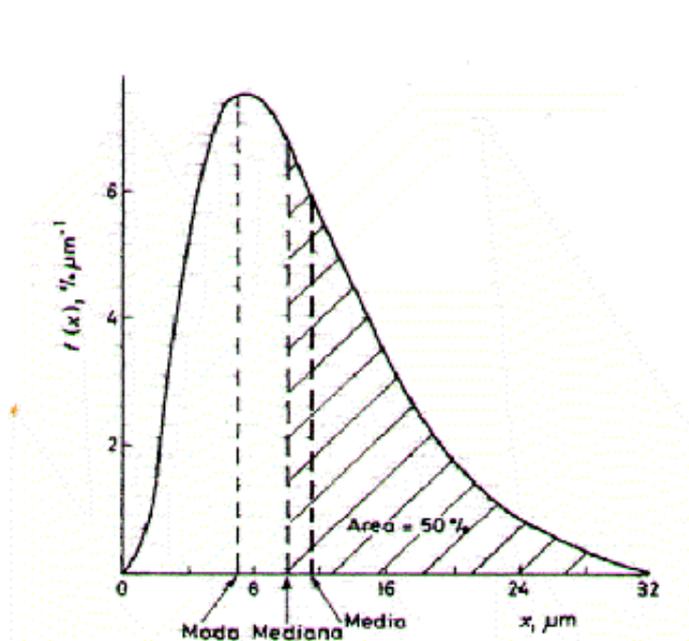
**Tabla 4.3 Lista de diámetros estadísticos**

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

#### 4.8.3 Medidas de Tendencia Central (Svarosky, 1990).

Un gran número de tamaños medios pueden definirse para una distribución de tamaño de partícula dada. El propósito de las mediciones de tendencia central es representar una población de partículas en una figura única; esto no proporciona indicación alguna acerca de la anchura de la distribución; aunque en ocasiones puede ser útil para el control de procesos. Las siguientes relaciones y definiciones están basadas en conceptos matemáticos generales, aplicados específicamente a los sistemas particulados.

La moda, la mediana y la media, son medidas importantes de tendencia central para una distribución de tamaño dada, como se muestra en la Figura 12.

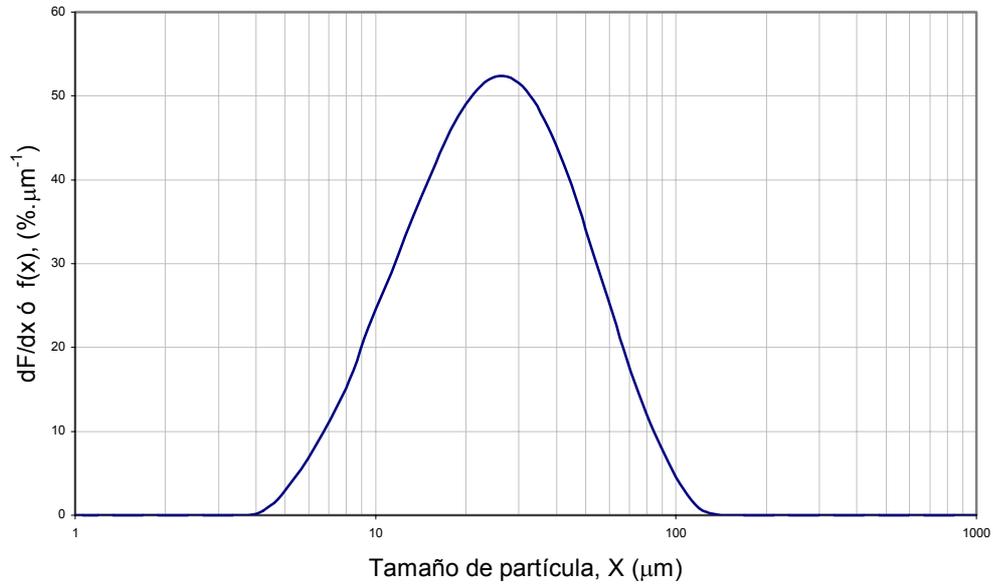


**FIGURA 12. Medidas de tendencia central para una distribución de tamaño de partícula**(Svarosky,1990).

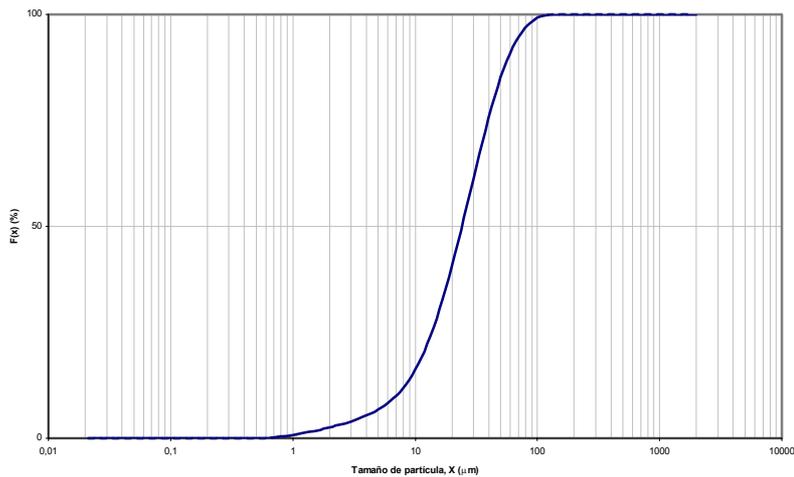
La moda corresponde al valor que se presenta con mayor frecuencia en una serie de números; en la curva de distribución de frecuencia se adjudica a la cresta de la curva. La distribución cuyo gráfico posee más de una cresta, se denomina, Distribución Multimodal; y aquellas en las que se observa sólo una cresta (figura 12) reciben el nombre de Monomodal.

La mediana corresponde al valor de tamaño cuya frecuencia es igual al 50%, divide la curva de densidad de distribución de frecuencias en dos áreas iguales (Figura 13 a), una corresponde a la muestra de partículas grandes y la otra a las partículas

pequeñas; es el centro de localización de una distribución de partículas y se denomina  $X_{50}$ .



**FIGURA 13.a. Curva de densidad de distribución.**



**FIGURA 13.b. Curva de frecuencia acumulada.**



La mediana se determina más fácilmente de la curva de porcentaje acumulado (Figura 13 b) en donde corresponde exactamente el 50%.

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

$$F(x) = \int_{x_1}^{x_2} f(x)dx \quad (4.73)$$

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

$$g(\bar{x}) = \int_0^{\infty} g(x).f(x)dx \quad (4.74)$$

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

$$\bar{x}_a = \int_0^1 x.dF = \int x.f(x).dx \quad (4.75)$$

**Tabla 4.4 Tipos de medias  $\bar{x}$  (SORRENTINO,1998).**

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

#### 4.8.4 Métodos de medición para determinar el tamaño de partículas.

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

##### 4.8.4.1 Tamizado (RODES,1998).

El tamizado seco usando tamices tejidos de alambre es un método simple y económico de análisis de tamaño conveniente para partículas de tamaño mayor a 45 $\mu$ m. El tamizado proporciona una distribución másica y un tamaño conocido como el diámetro de tamiz, el cual depende de la anchura máxima y espesor máximo de la partícula.

Los tamices modernos más comunes están en tamaños tales que la proporción al tamaño del tamiz adyacente es la raíz cuarta



de dos (45, 53, 63, 75, 90, 106  $\mu\text{m}$ ). Si se siguen los procedimientos estándares con cuidado, el tamizado resulta fiable y el análisis de tamaño obtenido es reproducible.

El tamizado por corriente de aire, en el que el polvo en el tamiz fluye por medio del aire, puede lograr un análisis para partículas por debajo de 20  $\mu\text{m}$ . El análisis de partículas aún menores (por debajo de 5  $\mu\text{m}$ ) se puede lograr mediante el tamizado húmedo, en el que la muestra de polvo se suspende en un líquido.

#### 4.8.4.2 Difracción láser (RODES,1998).

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

Para relacionar el ángulo de difracción con el tamaño de la partícula, los instrumentos se rigen por la teoría de Fraunhofer, la cual puede dar lugar a errores bajo algunas circunstancias (cuando los índices de refracción del material de la partícula y el medio de suspensión se acercan uno al otro). Los instrumentos modernos usan la teoría Mie para la interacción de la luz con la



materia, esto permite clasificar las partículas según tamaños en el rango de 0,1- 2000 $\mu\text{m}$ , siempre que los índices de refracción del material de la partícula y el medio de suspensión sean conocidos.

El método de difracción láser proporciona la distribución de volumen y el diámetro de partículas, el cual se conoce como diámetro láser. El análisis del tamaño de partícula mediante la difracción láser es muy común en la industria hoy en día y el software asociado a este método permite el despliegue de una variedad de distribuciones de tamaños y medios derivados de la distribución medida originalmente.

## 5. ANTECEDENTES

Con el propósito de colaborar y continuar con las labores a las cuales está dedicado el Laboratorio de Separaciones Mecánicas (LSM), se decidió plantear el desarrollo de este trabajo, con la finalidad de estudiar la caracterización del revoque, pero esta vez sobre un medio filtrante distinto al que se acostumbraba (papel de filtro); en este caso sobre discos porosos con características similares a las de un yacimiento.

Los aspectos más importantes de los estudios más recientes de filtración sobre papel de filtro se resumen a continuación:

- Hernández y Hernández (2001) basaron su estudio en determinar el efecto de la fracción de finos de carbonato de calcio(20-25,40-45) en revoques formados sobre papel de filtro, empleando como parámetro de selección la variación por exceso y defecto del porcentaje de partículas menores a  $5\mu\text{m}$ .

Dentro de las conclusiones más importantes obtenidas por Hernández y Hernández, se encuentran:

- La porosidad y permeabilidad de los revoques formados con la base 20-25, no presentan una tendencia clara al aumentar el porcentaje de partículas finas, de igual forma ocurre con los revoques obtenidos empleando 40-45.
- El cálculo de porosidad y permeabilidad está altamente influenciado por el error que se cometa al medir la



altura de la torta. Mas aún cuando la altura del revoque es el orden de 1 a 2 mm. Esto origina una elevada dispersión de este parámetro.

- La formación de la etapa incipiente es determinante para el desarrollo de la filtración, ya que influye sobre el volumen de filtrado y la permeabilidad del revoque.
  
- Silva (2001) realizó pruebas de formación de revoques utilizando mezclas monomodales amplias, para ello empleó un método de cálculo que permite la caracterización del revoque disminuyendo la incertidumbre en los cálculos de permeabilidad y porosidad. Esto se logró introduciendo el parámetro combinado permeabilidad-solidosidad.

Entre sus principales conclusiones se tiene:

- Se observaron dos zonas perfectamente diferenciables (incipiente y darcyana).
  
- Encontró que la etapa darcyana ofrece aproximadamente un 90% de resistencia respecto a la global.
  
- El  $D_{3,2}$  ejerce poca influencia en la permeabilidad, lo que es contrario al modelo propuesto por Carman-Kozeny. A este hecho se le atribuyó que la goma Xanthana puede estar ocupando espacios vacíos dentro del revoque.



- Meza-Pérez (2001) por su parte, estudiaron la formación de revoques sobre discos porosos utilizando mezclas amplias, llegando a establecer las siguientes conclusiones:
  - Los revoques filtrados a presiones entre 50 y 500 psi, son compresibles.
  - No es posible comparar la permeabilidad de medios filtrantes de distintos diámetro de poro, a partir del parámetro %FP.
  - El empleo del parámetro %FP/Dp para discos de 10 y 20  $\mu\text{m}$ , permite eliminar la dependencia de los resultados con respecto al medio filtrante.
  - La permeabilidad relativa darcyana (Kr) es un parámetro útil ya que permite independizar los resultados del medio filtrante y además permite su comparación con los valores predichos por Carman-Kozeny.
  - A medida que aumenta el  $D_{3,2}$ , el comportamiento de los revoques se acerca a las características predichas por la ecuación de Carman-Kozeny.
  - Al representar la solidosidad de los revoques en función del  $D_{3,2}$  y del parámetro %FP/Dp, ésta permanece constante.



## **6. EQUIPO EXPERIMENTAL**

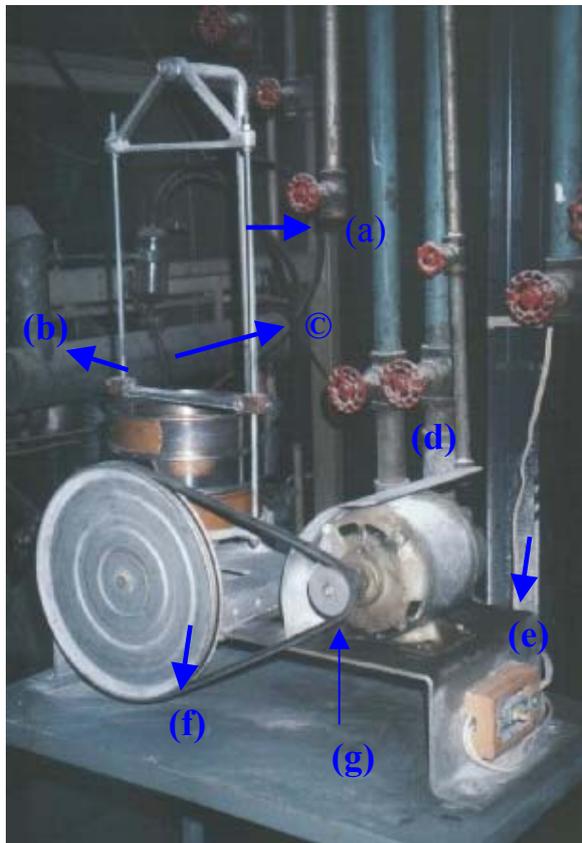
### **6.1 Equipos de generación y medición de fracciones estrechas**

Los equipos de este grupo permiten clasificar el carbonato de calcio en las diferentes fracciones estrechas y determinar la distribución de tamaño de partículas de las mismas; entre ellos están:

#### **6.1.1 Tamizador oscilatorio**

Este equipo (ver figura 14) se usa en el procedimiento de tamizado por vía seca con el fin de obtener un tamaño nominal de partículas menor a 125  $\mu\text{m}$ ; el tamizador consta de un marco metálico oscilante (a), en cuya base son colocados el juego de tamices (b) de 140 y 125  $\mu\text{m}$  con una bandeja recolectora; los tamices son asegurados mediante una barra metálica (c).

El movimiento oscilatorio lateral de (a) y (b) se debe a un motor eléctrico (d) que es accionado por un interruptor (e); el movimiento circular del motor se transmite a los tamices a través de una correa (f) que hace girar a un par de poleas (g).



**FIGURA 14. Tamizador Oscilatorio**

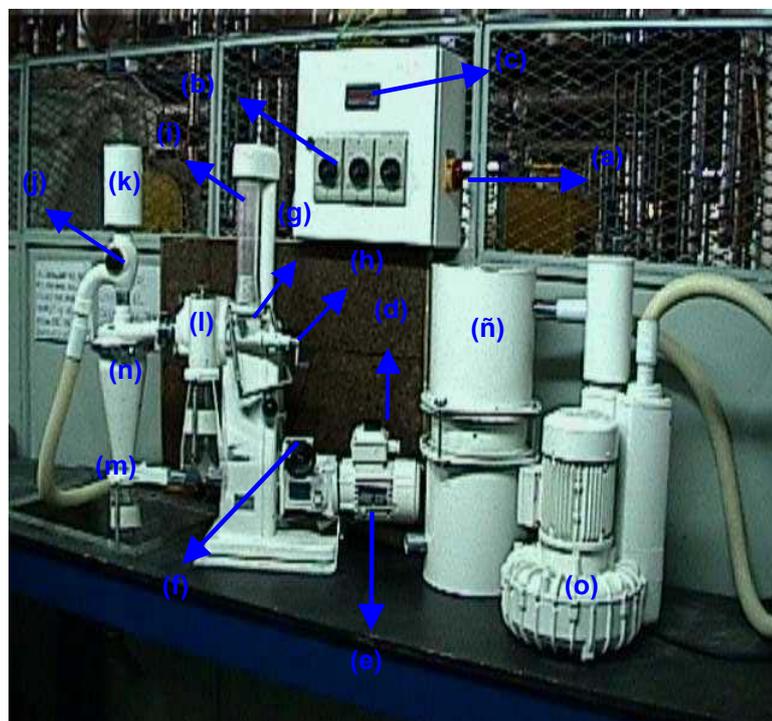
### 6.1.2 Clasificador Centrífugo

Este equipo permite la separación de fracciones estrechas en un rango comprendido entre 2,5 y 70  $\mu\text{m}$ , basado en el equilibrio de la fuerza centrífuga sobre un disco giratorio y la velocidad con la cual chocan las partículas arrastradas por un caudal de aire.

El clasificador (ver figura 15) consta de un panel de control donde se encuentra el interruptor general (a) que lo acciona, 3 perillas (b) de las cuales una permite seleccionar la opción

“clasificar” y otra la opción “soplador”, también hay un indicador (c) donde se lee la velocidad de clasificación.

Para fijar la velocidad de clasificación se cambia de posición la perilla (d) que está en la parte superior del motor (e) y haciendo girar el volante (f) se fijan las revoluciones. La alimentación al sistema se hace a través de un recipiente que es colocado en la unidad de alimentación (g) y se regula por medio de un tornillo sin fin (h) que gira gracias a un motor eléctrico o manualmente, las partículas son arrastradas por medio de un caudal de aire medido en un rotámetro (i), controlado por medio del regulador (j), conectado a un silenciador (k). Las partículas gruesas se recogen en el recipiente para gruesos (l) y las finas en el recipiente para finos (m), las cuales son recogidas mediante un ciclón (n). El flujo saliente se libera de las partículas finas al pasar por el filtro (ñ) accionado por el ventilador (o).



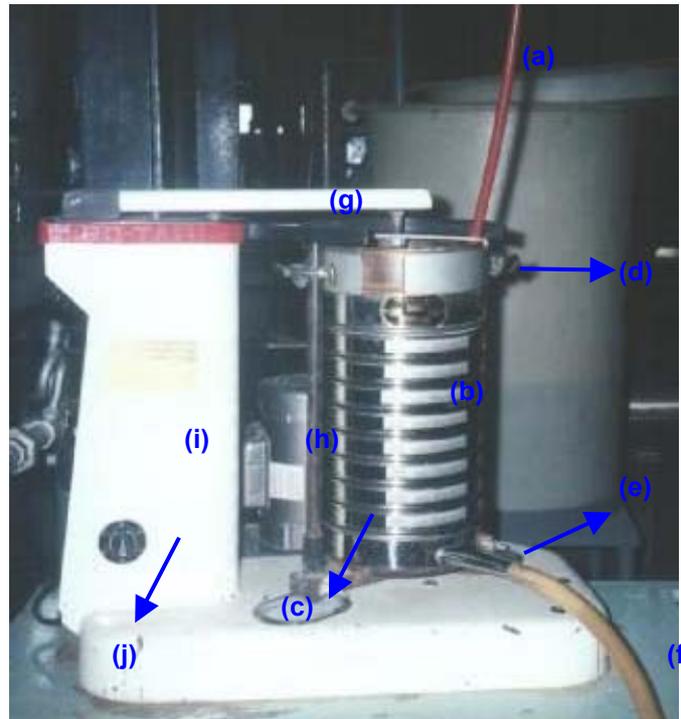
**FIGURA 15. Clasificador centrífugo**

### 6.1.3 Tamizador vibratorio

El tamizador vibratorio es usado en el tamizado vía húmeda 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 (ver figura 16) consta de:

Una manguera (a) con la cual se suministra agua por el tope al sistema de tamices (b) (constituido por 8 platos con tamaño nominal de 38, 45, 53, 63, 75, 90, 106 y 125  $\mu\text{m}$ ), los cuales reposan sobre el soporte (c); el agua fluye a través de (b) por gravedad a un caudal que debe ser ajustado previamente a 110ml/min. Los tamices se fijan al equipo mediante un plato asegurador (d) y en la parte inferior de (b) se ubica un plato de desagüe (e), por el cual el agua sale del sistema mediante la manguera (f) después de pasar por la torre de tamices.

El movimiento de este equipo permite que el brazo (g) golpee los tamices provocando vibraciones. Esto se genera cuando el motor (h) acciona los tubos verticales que se encuentran en la estructura metálica (i) y en ella se ubica un contador de tiempo (j).



**FIGURA 16. Tamizador vibratorio**

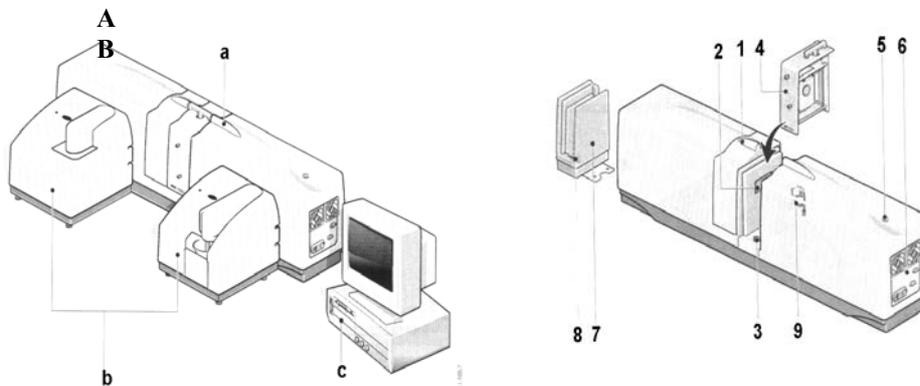
#### 6.1.4 Analizador de tamaño de partícula. Mastersizer 2000

El Mastersizer 2000 es un equipo analizador de partículas, cuyo rango de medición está entre 0.2 y 2000  $\mu\text{m}$ , basado en el principio de difracción láser. El equipo está constituido por tres secciones mostradas en la Figura 17:

- La unidad óptica **(a)**: tiene como función generar y recolectar la información necesaria para el análisis y la medición del tamaño de las partículas.
- Accesorio de dispersión **(b)**: su objetivo es preparar la muestra y posteriormente llevarla a la unidad óptica para ser medida. Está constituida por protector para el área de

la celda (1) que se usa para prevenir que partículas de polvo o sucio contaminen la celda; una ventana de protección (2) que impide que se deterioren los internos, un drenaje (3); una celda de tipo húmeda (4), un indicador de poder (5); y la terminación del panel (6) que contiene todas las salidas digitales de la unidad óptica.

- Computador **(c)**: con un software especial instalado que tiene dos funciones principales: controlar el sistema durante la medición y procesar la información para producir la distribución de tamaño de partículas.



**FIGURA 17. Mastersizer 2000**

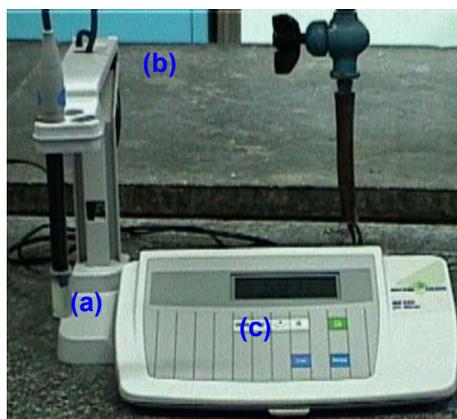
## 6.2 Equipos de preparación y filtración del pseudo lodo

Los equipos de este grupo se utilizan en la homogenización de la mezcla de los componentes del pseudo – lodo, en el proceso de filtración para obtener un buen revoque.

### 6.2.1 Medidor de pH

El pH – metro tiene una precisión de 0.01, éste se utiliza en la preparación de los pseudo – lodos con el objetivo de lograr las condiciones ópticas para el agua y la solución agua + viscosificante, de tal manera que el viscosificante logre mantener las partículas de carbonato en suspensión hasta que se realice la filtración del lodo.

Este equipo es digital y está constituido básicamente por un par de electrodos de vidrio (a) que reposan en una base (b) de plástico móvil y en un panel de control (c) donde se encuentran los botones que accionan la lectura de pH y temperatura.



**FIGURA 18. Medidor de pH.**

## 6.2.2 Agitadores

En la preparación de un pseudo – lodo se requiere dos sistemas de agitación: uno de baja revolución y otro de alta revolución, los motores de los dos trabajan con una diferencia de potencial de 110V.

### 6.2.2.1 Agitador de alta revolución

El agitador usado en un Monomixer y permite mezclar en forma homogénea el agente viscosificante con el agua, sin que se forme ningún tipo de grumos que pueden arruinar el lodo. Éste equipo tiene tres velocidades de operación, las cuales se seleccionan con la perilla (a) ubicada en el aparte superior del agitador, posee un vaso metálico (b) que al colocarlo en un soporte (c) del agitador acciona al equipo.



**FIGURA 19. Agitador de alta revolución MONOMIXER**

### 6.2.2.2 Agitador de baja revolución

Éste tiene como función eliminar las burbujas que se forman por la agitación a revoluciones altas, consta de un motor de velocidad variable cuyas revoluciones son reguladas por una perilla (a) que se encuentra en la zona superior del agitador, un mandril (b) ajustable que permite colocar varios tipos de paletas (c) de las cuales se pueden ajustar mediante una llave especial.



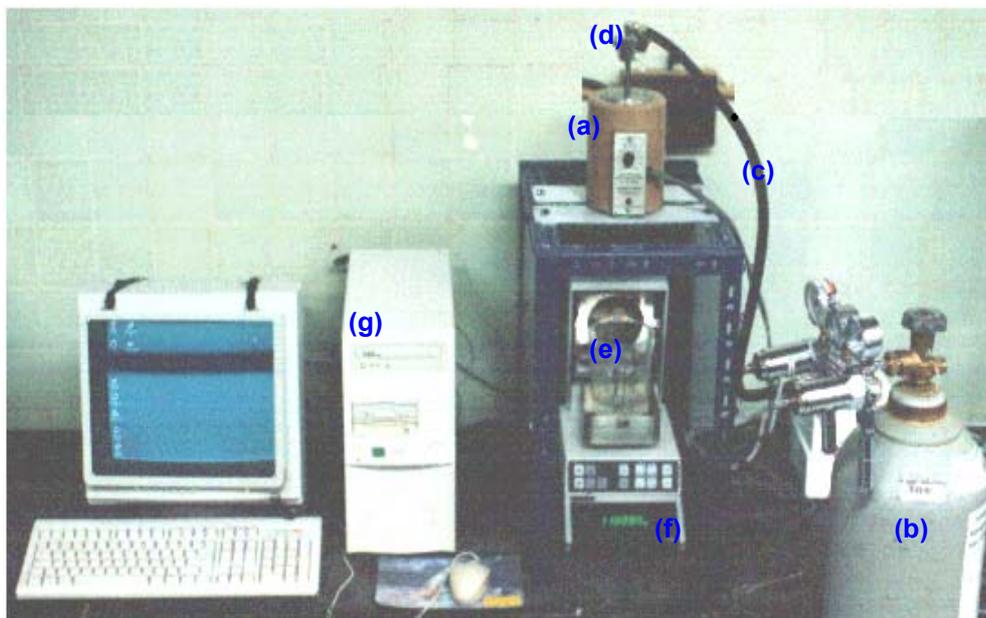
**FIGURA 20. Agitador de baja revolución**

### 6.2.3 Equipo de filtración estática HPHT

El equipo consta principalmente de una celda de filtración a alta presión y temperatura (HPHT), la cual se encuentra dentro de una camisa de calentamiento (a). La presión se inyecta a la celda

empleando una bombona de nitrógeno (b), al final de la manguera (c) que conecta la bombona al equipo se encuentra una válvula de purga (d) para aliviar la presión y así poder extraer la celda. La manguera se encuentra recubierta con una tela metálica y resiste presiones superiores a 800psi.

El volumen de filtrado proveniente de la celda se recoge en un beaker (e) colocado sobre una balanza digital (f), que registra la masa de filtrado depositada en el beaker a cada instante de la filtración y estos datos son pasados al computador (g) el cual tiene el programa Balancelink.



**FIGURA 21. Equipo de filtración estática**

La celda de la filtración (Figura 22) está formada por doce pernos (a), el cuerpo (b), una tapa superior (c), una inferior (d), un aro (e) que se utiliza como soporte de la tapa superior cuando no se utilizan discos de cerámica, una rejilla (f) y dos válvulas vástagos con sus empacaduras (g). Esta celda también permite la realización de los procedimientos de permeación, al sustituir el lodo por agua u otro líquido libre de sólidos. Los pernos se ajustan por medio de una pieza especial o palanca (h), y las válvulas se aseguran a las tapas de la celda empleando una llave (i).



**FIGURA 22. Celda HPHT**

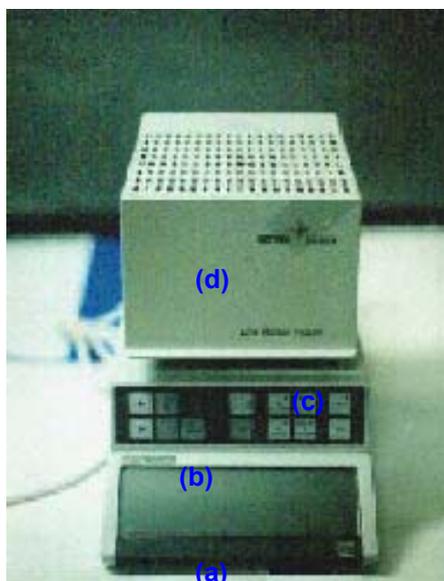
#### **6.2.4 Balanza con desecador infrarrojo**

La balanza digital con desecador infrarrojo se muestra en la Fig. 23, se utiliza para determinar el contenido de humedad presente en una muestra y la masa de la misma. Por medio de este equipo el revoque se forma durante la filtración se seca

uniformemente a una temperatura constante a una temperatura constante. La apreciación de la balanza es  $\pm 0.001$  g.

El equipo se enciende y se apaga mediante la tecla de mando principal (a), al encenderlo se puede visualizar en una pantalla (b) la masa que se está pesando, los valores de temperatura y tiempo de secado se controlan mediante el teclado al desecador (c) y además posee una unidad de desecación (d) constituida por una tapa y un platillo de aluminio que cumple las funciones de porta muestra.

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



**FIGURA 23. Balanza con desecador infrarrojo**



### **6.2.5 Divisor de muestras PT 1000**

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

- Un embudo de alimentación por el cual se alimenta la muestra que va a ser dividida.
- Un dosificador que regula la velocidad de entrada a la corona divisora, este tiene en el panel frontal los dispositivos de encendido, regulación de vibración (en porcentaje) y cronómetro de funcionamiento.
- Una corona divisora que gira a 800rpm que cumple con la función de dividir la muestra.
- Los envases recolectores en los cuales se deposita la muestra dividida, que pueden ser frascos de vidrio de 60 y 250 ml o en su defecto bolsas plásticas de diversos tamaños suministrados por el fabricante del equipo.
- La base principal del equipo en cuyo interior se encuentra el motor que impulsa la corona giratoria. La base presenta un panel frontal que tiene los dispositivos de encendido y cronómetro de funcionamiento.



**FIGURA 24. Divisor de muestra**

### 6.2.6 Micrómetro

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



## **7. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

En esta sección del trabajo se describe de manera detallada los procedimientos empleados durante el desarrollo experimental de esta investigación, la cual se divide en dos partes:

- Pruebas sobre discos porosos.
- Pruebas de compresibilidad.

Para llevar a cabo ambas pruebas fue necesario realizar un proceso de obtención del material a través de tres métodos: tamizado vía seca, aeroclasificación centrífuga y tamizado vía húmeda.

La parte referida a los discos porosos comprende dos etapas:

- Filtraciones de mezclas diseñadas a partir de fracciones estrechas.
- Recuperación de discos.

### **7.1 PROCEDIMIENTO DE OBTENCIÓN DEL MATERIAL**

#### **7.1.1 Tamizado vía seca**

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

- 7.1.1.1. Verificar que el motor se encuentre enchufado.



- 7.1.1.2. En un recipiente limpio y seco, pesar aproximadamente entre 200 a 250 gramos de la muestra a tamizar.
- 7.1.1.3. Ordenar los tamices en orden decreciente, primero el de 140 $\mu$ m, luego el de 125 $\mu$ m y, por último, la bandeja recolectora.
- 7.1.1.4. Esparcir la muestra uniforme sobre el primer tamiz (140 $\mu$ m).
- 7.1.1.5. Fijar los tamices con las barras laterales, apretando los seguros.
- 7.1.1.6. Poner en funcionamiento el tamizador accionando el interruptor.
- 7.1.1.7. Luego de aproximadamente 5 minutos, cuando se evidencien en el tamiz superior partículas gruesas retenidas, apagar el equipo y retirar los tamices.
- 7.1.1.8. Extraer la muestra de la bandeja recolectora y depositarla en un recipiente destinado para partículas menores o iguales a 125 $\mu$ m.
- 7.1.1.9. Desechar la muestra que quedó en los tamices.



7.1.1.10. Limpiar los tamices haciéndoles pasar aire a presión a través de ellos.

#### 7.1.2. **Clasificador Centrífugo**

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

7.1.2.1. Verificar que el equipo se encuentre limpio, de lo contrario llevar a cabo los pasos 7.2.17 al 7.2.22 y luego regresar al 7.2.3.

7.1.2.3 Colocar el interruptor principal en encendido y el interruptor clasificador en 1.

7.1.2.4 Llenar el recipiente de alimentación con la muestra a clasificar y colocar los tres recipientes en el equipo, el de alimentación, el de finos y el de gruesos.

7.1.2.5. Colocar en uno el interruptor del soplador.

7.1.2.6 Activar el interruptor del rotor.

7.1.2.5 Girar el volante de las revoluciones hasta conseguir la velocidad deseada.



7.1.2.6 Fijar el caudal de aire necesario para lograr la separación deseada mediante el regulador de la altura del rotámetro, utilizando para ello la curva de calibración.

7.1.2.7 Levantar el envase de la alimentación y colocarlo en su posición ajustando el tornillo que se encuentra debajo.

7.1.2.10. Verificar que el tornillo sin fin de la alimentación esté conectado con el motor que permite el paso de la alimentación.

7.1.2.11 Iniciar la clasificación conectando el enchufe del motor a la toma de corriente.

Una vez separada la muestra alimentada:

7.1.2.12 Colocar en cero la velocidad del aire.

7.1.2.13 Colocar en cero la velocidad del rotor.

7.1.2.14 Desactivar el interruptor del rotor.

7.1.2.15 Desconectar el motor.

7.1.2.16 Desactivar el interruptor del soplador.

7.1.2.17 Bajar el envase de la alimentación, y guardar las muestras recogidas en el envase de



gruesos y finos en los envases identificados para ello.  
Finalmente limpiar el equipo.

Para la limpieza del equipo:

7.1.2.18 Desmontar el ciclón.

7.1.2.19 Activar el interruptor del soplador.

7.1.2.20 Aspirar el equipo, el ciclón, todas las partes desmontables y las interiores.

7.1.2.21 Desactivar el interruptor del soplador.

7.1.2.22 La limpieza del filtro se debe realizar fuera del laboratorio, pasándole aire a presión.

7.1.2.23 Montar de nuevo el ciclón y las partes desmontadas.

7.1.2.24 Desactivar el interruptor del clasificador y el interruptor principal.

### 7.1.3. **Tamizado vía húmeda**

El procedimiento de tamizado vía húmeda permite obtener fracciones de granulometría estrecha dentro de un rango de 38-125 $\mu$ m, es como sigue:

7.1.3.1 Pesar una muestra de 150 gramos.



7.1.3.2 Diluir la muestra con agua.

7.1.3.3. Ordenar los tamices de mayor a menor apertura nominal: 38, 45, 53, 63, 75, 90, 106 y 125 $\mu$ m. Colocar en el tamizador vibratorio el plato de desagüe, luego la columna de tamices y por último el plato asegurador.

7.1.3.4. Asegurar la columna formada por medio de los sujetadores y bajar el brazo de metal.

7.1.3.5 Agregar la mezcla al plato asegurador.

7.1.3.6 Encender el equipo y ajustar un tiempo de tamizado de 12 minutos por medio de los selectores.

7.1.3.7. Cada tres minutos, agregar un caudal de agua durante un minuto de 110 ml/min.

7.1.3.8. Transcurrido el tiempo, retirar los tamices. El contenido recogido en cada uno de ellos se recolecta de acuerdo a su fracción en recipientes debidamente identificados, empleando un pequeño caudal de agua para barrer con todo el material depositado en el tamiz. No se debe raspar el tamiz con los dedos, ni con cualquier otro instrumento.

7.1.3.9 Al finalizar cada proceso de tamizado, se deben lavar los tamices empleados con abundante agua, luego se les hace pasar una corriente de aire para secarlos.



## 7.2. PRUEBAS SOBRE DISCOS POROSOS

### 7.2.1. Diseño y simulación de mezclas

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

### 7.2.2. Preparación de mezclas

La preparación de mezclas se lleva a cabo empleando el divisor de muestras PT1000, según el siguiente procedimiento:

7.2.2.1 Colocar los frascos de recolección sobre los adaptadores y ajustarlos al equipo.

7.2.2.2 Activar el interruptor principal, que se encuentra en la parte posterior izquierda del divisor.

7.2.2.3. Ajustar el tiempo de marcha requerido, que se lee en el recuadro *time*, luego presionar el botón start.

7.2.2.4 Activar el dosificador de alimentación.

7.2.2.5 Activar el dosificador a tiempo limitado, que aparezca el símbolo “-“ en el recuadro *time*.

7.2.2.6 Llenar la tolva del dosificador con la muestra a dividir.



7.2.2.7 Activar el divisor y ajustar el potenciómetro amplitud a la velocidad de dosificación deseada.

7.2.2.8 Esperar que toda la muestra haya pasado por el divisor.

7.2.2.9 Desactivar el divisor y el interruptor principal.

7.2.2.10 Vaciar los frascos de recolección en un recipiente.

7.2.2.11 Limpiar todo el equipo.

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

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

### 7.2.4 **Preparación del lodo de perforación**

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

7.2.4.1 Calibrar el pH-metro con soluciones buffers de pH 4,00 y 7,00. No apagar el pH-metro luego de su calibración.



7.2.4.2 Pesar en la balanza desecadora, 2 gramos de goma Xanthana.

7.2.4.3 Pesar 338 gramos de agua destilada en un beaker.

7.2.4.4 Medir y anotar el pH inicial del agua.

7.2.4.5 Agitar el agua usando el agitador de bajas revoluciones colocando la perilla de velocidad en 5.

7.2.4.6 Agregar los 2 gramos de goma Xanthana lentamente, de forma tal que caiga justo en el remolino que se forma en el agua. No agregar cerca del eje del agitador.

7.2.4.7 Continuar la agitación por un lapso de 5 minutos después de agregar la goma Xanthana.

7.2.4.8 Dejar reposar por 20 minutos sin agitar. No es necesario sacar el aspa de la solución.

7.2.4.9 Pesar, utilizando papel encerado, 30 gramos de carbonato de calcio de la mezcla a preparar, en la balanza desecadora.

7.2.4.10 Encender el agitador colocando el indicador en 5.

7.2.4.11 Elevar el pH de la solución hasta  $9,50 \pm 0,05$ . Para ello:



7.2.4.12 Agregar una gota de solución de KOH al 0,05 N con la pipeta o el gotero, agitando la solución simultáneamente, con el indicador en la posición 5.

7.2.4.13 Medir el pH de la solución.

7.2.4.14 Repetir los pasos 6.2.4.12 y 6.2.4.13 hasta lograr el pH deseado ( $9,50 \pm 0,050$ ).

7.2.4.15 Anotar el pH de la solución goma-agua.

7.2.4.16 Añadir el carbonato lentamente con la espátula en el borde del remolino que se forma en la solución, para evitar que se aglomere.

7.2.4.17 Agitar hasta que la mezcla esté homogénea.

7.2.4.18 Verter la mezcla en el envase del agitador de alta revolución.

7.2.4.19 Agitar en el agitador de altas revoluciones, en la posición L, por 15 minutos.

7.2.4.20 Agitar en el agitador de bajas revoluciones, en la posición 4 durante 3 minutos, con la finalidad de eliminar burbujas.

7.2.4.21 Medir el pH del lodo y registrar el valor en la tabla de datos.



7.2.4.22 Transvasar el pseudo lodo preparado a un envase de vidrio limpio y seco identificado previamente.

7.2.4.23 Anotar la hora de culminación de preparación del lodo.

7.2.4.24 Guardar el lodo en un sitio fresco, limpio, seco y oscuro por 24 horas.

7.2.4.25 Limpiar los agitadores y el pH-metro.

7.2.4.26 Lavar el envase del agitador de altas revoluciones.

7.2.4.27 Limpiar y secar todos los utensilios usados.

### 7.2.5 **Permeación del medio limpio**

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

7.2.5.1 Ajustar la temperatura de la manta de calentamiento de la celda HPHT en 30°C.

7.2.5.2 Ajustar la válvula a la tapa inferior.

7.2.5.3 Colocar la goma, luego la tapa inferior y finalmente el disco poroso.



7.2.5.4 Acoplar el cuerpo de la celda y fijar la estructura cuerpo-tapa inferior mediante los pernos usando la palanca para apretarlos.

7.2.5.5 Llenar la celda con agua destilada hasta por debajo de la goma superior.

7.2.5.6 Colocar el aro y posteriormente la tapa superior con su goma y válvula, ajustarla con los pernos.

7.2.5.7 Colocar la celda en la camisa de calentamiento.

7.2.5.8 Conectar la bombona a la celda.

7.2.5.9 Abrir la válvula de la bombona.

7.2.5.10 Regular con la válvula de aguja del manómetro una presión de 40 psi.

7.2.5.11 Abrir la válvula superior de la celda media vuelta.

7.2.5.12 Verificar que la balanza esté encendida y que la interfase de la computadora esté conectada.

7.2.5.13 Colocar el recipiente para recolectar el filtrado sobre la balanza y tararla.

7.2.5.14 Activar el programa de software de la balanza y programarla para que adquiera el valor de la masa filtrada cada segundo.



7.2.5.15 Abrir el vástago de la válvula inferior media vuelta.

7.2.5.16 Guardar los datos obtenidos en una hoja de Excel.

7.2.5.17 Esperar a que termine de salir el filtrado.

7.2.5.18 Cerrar la válvula inferior.

7.2.5.19 Cerrar la válvula de aguja.

7.2.5.20 Abrir la válvula de alivio.

7.2.5.21 Desmontar la parte superior de la celda.

## 7.2.6 **Filtración del lodo sobre discos**

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

7.2.6.1 Colocar el lodo en el agitador de baja revolución (velocidad 5) y agitarlo durante una hora.

7.2.6.2 Luego de haber realizado la prueba correspondiente a la resistencia del medio limpio, agregar aproximadamente 130 ml de lodo en la celda.

7.2.6.3 Ensamblar la parte superior de la celda, y ajustar la tapa con los pernos.



- 7.2.6.4 Colocar la celda en la camisa de calentamiento.
- 7.2.6.5 Conectar la fuente de gas con presión regulada al vástago de la válvula superior de la celda.
- 7.2.6.6 Abrir la válvula de la bombona de gas.
- 7.2.6.7 Regular con la válvula de aguja una presión de 400 psi para las mezclas de la base A y 100 psi para las de B.
- 7.2.6.8 Abrir la válvula superior de la celda.
- 7.2.6.9 Verificar que la balanza esté enchufada y conectada a la computadora. Programar el software Balancelink para que registre la masa recogida cada un segundo.
- 7.2.6.10 Colocar el recipiente para recolectar el filtrado sobre la balanza y tararla.
- 7.2.6.11 Simultáneamente, abrir el vástago de la válvula inferior media vuelta e iniciar la recolección de datos en la computadora.
- 7.2.6.12 Anotar el valor medido en la balanza para el tiempo cero.
- 7.2.6.13 Detener la filtración cuando el filtrado se haya agotado, para ello se debe cerrar la válvula inferior, luego cerrar la válvula superior y detener la recolección de datos.



7.2.6.14 Cerrar el regulador de presión, purgar la manguera que lo conecta a la válvula y desconectarlo del vástago de la válvula superior.

7.2.6.15 Abrir lentamente la válvula superior y esperar a que se libere toda la presión. Sacar la celda de la camisa.

7.2.6.16 Abrir la parte superior de la celda.

### **7.2.7 Permeación del revoque sobre discos**

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

7.2.7.1 Retirar todo el lodo que haya quedado, cuidando de no ocasionar daños al revoque.

7.2.7.2 Añadir agua destilada para realizar el lavado de la superficie.

7.2.7.3 Agregar 130 ml aproximadamente de agua destilada dentro de la celda. Cerrar la parte superior de la celda.

7.2.7.4 Colocar la celda en la camisa de calentamiento.

7.2.7.5 Regular la presión de la celda en 400 psi para las mezclas de la base A y 100 psi para las de la base B.



7.2.7.6 Repetir los pasos 6.2.6.7 al 6.2.6.12.

7.2.7.7 Detener la prueba cuando hayan transcurrido 10 minutos, para ello se debe cerrar la válvula inferior, luego la válvula superior y detener el registro de datos.

7.2.7.8 Cerrar el regulador de presión, purgar la manguera que lo conecta a la válvula y desconectarlo del vástago de la válvula superior.

7.2.7.9 Abrir la parte superior de la celda.

7.2.7.10 Recoger la torta.

7.2.7.11 Lavar la celda.

## 7.2.8 **Permeación del medio sucio (discos)**

Este procedimiento permite estimar el valor de la resistencia del medio filtrante luego de que la filtración ha sido efectuada, se realiza en la celda HPHT (High Pressure-High Temperature), los pasos seguidos fueron los siguientes:

7.2.8.1 Ajustar la temperatura de la manta de calentamiento de la celda HPHT en 30 °C.

7.2.8.2 Ajustar la válvula a la tapa inferior (no puede ser rejilla).



7.2.8.3 Colocar la goma, el disco poroso una vez que se ha retirado el revoque y finalmente la tapa inferior.

7.2.8.4 Acoplar el cuerpo de la celda y fijar la estructura cuerpo-tapa inferior mediante los pernos usando la llave para ajustarlos.

7.2.8.5 Llenar la celda con 130 ml de agua destilada.

7.2.8.6 Colocar la rejilla, la tapa superior con su goma y válvula, ajustarla con los pernos.

7.2.8.7 Colocar la celda en la camisa de calentamiento.

7.2.8.8 Conectar la bombona a la celda.

7.2.8.9 Abrir la válvula de la bombona.

7.2.8.10 Regular con la válvula de aguja del manómetro una presión de 40 psi.

7.2.8.11 Abrir la válvula superior de la celda media vuelta.

7.2.8.12 Verificar que la balanza esté encendida y que la interfase de la computadora esté conectada.

7.2.8.13 Colocar el recipiente para recolectar el filtrado sobre la balanza y tararla.



7.2.8.14 Activar el programa de software de la balanza y programarla para que adquiriera el valor de la masa de filtrado cada segundo.

7.2.8.15 Abrir el vástago de la válvula inferior media vuelta.

7.2.8.16 Guardar los datos obtenidos en una hoja de Excel.

7.2.8.17 Esperar a que filtre toda el agua.

7.2.8.18 Cerrar la válvula inferior.

7.2.8.19 Cerrar la válvula de aguja.

7.2.8.20 Abrir la válvula de alivio.

7.2.8.21 Desmontar la parte superior de la celda.

### 7.2.9 **Secado de los discos**

Este proceso se realiza con la finalidad de evitar errores en el dato asociado al peso de los discos por presencia de humedad dentro de estos. El procedimiento empleado fue el siguiente:

7.2.9.1 Conectar la balanza analítica al desecador y activar este último.

7.2.9.2 Oprimir el botón de temperatura y verificar que se encuentre en 160°C, sino es así llevarla a este valor.



7.2.9.3 Oprimir *Enter*.

7.2.9.4 Tarar la balanza.

7.2.9.5 Colocar el disco a secar, después de que ha sido permeado como medio sucio.

7.2.9.6 Cerrar el desecador.

7.2.9.7 Mantener oprimida la tecla *start* hasta que la luz del botón deje de titilar.

7.2.9.8 Esperar a que la luz vuelva a titilar.

7.2.9.9 Oprimir el botón que se encuentra encima del botón *Enter*, para leer la masa del disco. Anotar la masa.

7.2.9.10 Apagar el desecador.

7.2.9.11 Retirar el disco del desecador.

#### 7.2.10 **Lavado de los discos**

Este procedimiento se lleva a cabo con la finalidad de recuperar las propiedades iniciales de los discos ya utilizados, tales como permeabilidad y peso, siguiendo las indicaciones que se detallan:



7.2.10.1 Tomar el disco después de que esté seco e introducirlo en un beaker de 150 ml.

7.2.10.2 Agregar al beaker 50 ml de HCL al 3%*m/v*.

7.2.10.3 Esperar 30 minutos.

7.2.10.4 Una vez transcurrido el tiempo, retirar el disco de la solución y lavar con agua destilada.

7.2.10.5 Permear el disco a 400 psi con la finalidad de retirar cualquier exceso de ácido que pudiese quedar dentro del disco. Estos datos no son necesarios registrarlos en la hoja de cálculo de Excel.

7.2.10.6 Repetir los pasos 7.2.9.1 hasta 7.2.9.11 de secado de discos. Registrar el peso del mismo. Verificar que el peso sea igual al inicial (0,1% de diferencia máximo permitido).

7.2.10.7 Si ambas condiciones son cumplidas el disco puede ser usado nuevamente, de lo contrario debe ser descartado.

### **7.3 PRUEBAS DE COMPRESIBILIDAD**

Para realizar estas pruebas se llevaron a cabo los siguientes pasos:



### 7.3.1 **Preparación del lodo de perforación**

7.3.1.1 Calibrar el pH-metro con soluciones buffers de pH 4,00 y 7,00. No apagar el pH-metro luego de su calibración.

7.3.1.2 Pesar en la balanza desecadora, 2 gramos de goma Xanthana.

7.3.1.3 Pesar 338 gramos de agua destilada en un beaker.

7.3.1.4 Medir y anotar el pH inicial del agua.

7.3.1.5 Agitar el agua usando el agitador de bajas revoluciones colocando la perilla de velocidad en 5.

7.3.1.6 Agregar los 2 gramos de goma Xanthana lentamente, de forma tal que caiga justo en el remolino que se forma en el agua. No agregar cerca del eje del agitador.

7.3.1.7 Continuar la agitación por un lapso de 5 minutos después de agregar la goma Xanthana .

7.3.1.8 Dejar reposar por 20 minutos sin agitar. No es necesario sacar el aspa de la solución.



7.3.1.9 Pesar, utilizando papel encerado, 30 gramos de carbonato de calcio de la base que se va a preparar, en la balanza desecadora.

7.3.1.10 Encender el agitador colocando el indicador en 5.

7.3.1.11 Elevar el pH de la solución hasta  $9,50 \pm 0,05$ . Para ello:

7.3.1.12 Agregar una gota de solución de KOH al 0,05 N con la pipeta o el gotero, agitando la solución simultáneamente, con el indicador en la posición 5.

7.3.1.13 Medir el pH de la solución.

7.3.1.14 Repetir los pasos 6.3.1.12 y 6.3.1.13 hasta lograr el pH deseado ( $9,50 \pm 0,050$ ).

7.3.1.15 Anotar el pH de la solución goma-agua.

7.3.1.16 Añadir el carbonato lentamente con la espátula en el borde del remolino que se forma en la solución, para evitar que se aglomere.

7.3.1.17 Agitar hasta que la mezcla esté homogénea.

7.3.1.18 Verter la mezcla en el envase del agitador de alta revolución.



7.3.1.19 Agitar en el agitador de altas revoluciones, en la posición L, por 15 minutos.

7.3.1.20 Agitar en el agitador de bajas revoluciones, en la posición 4 durante 3 minutos, con la finalidad de eliminar burbujas.

7.3.1.21 Medir el pH del lodo y registrar el valor en la tabla de datos.

7.3.1.22 Transvasar el pseudo lodo preparado a un envase de vidrio limpio y seco identificado previamente.

7.3.1.23 Anotar la hora de culminación de preparación del lodo.

7.3.1.24 Guardar el lodo en un sitio fresco, limpio, seco y oscuro por 24 horas.

7.3.1.25 Limpiar los agitadores y el pH-metro.

7.3.1.26 Lavar el envase del agitador de altas revoluciones.

7.3.1.27 Limpiar y secar todos los utensilios usados.



### **7.3.2 Filtración del lodo sobre papel**

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

7.3.2.1 Colocar el lodo en el agitador de baja revolución (velocidad 5) y agitarlo durante una hora.

7.3.2.2 Ajustar la válvula a la tapa inferior.

7.3.2.3 Se coloca la tapa que contiene la rejilla una vez colocado el papel de filtro.

7.3.2.4 Acoplar el cuerpo de la celda y fijar la estructura cuerpo- tapa inferior ajustándola con los pernos.

7.3.2.5 Agregar aproximadamente 50 ml de lodo.

7.3.2.6 Ensamblar la tapa superior de la celda y ajustar la tapa con los pernos.

7.3.2.7 Colocar la celda en la camisa de calentamiento.

7.3.2.8 Conectar la fuente de gas con presión regulada al vástago de la válvula superior de la celda.

7.3.2.9 Abrir la válvula de la bombona de gas.

7.3.2.10 Regular con la válvula de aguja a la presión requerida.



7.3.2.11 Abrir la válvula superior de la celda.

7.3.2.12 Verificar que la balanza esté enchufada y conectada a la computadora. Programar el software Balancelink para que registre la masa recogida cada 5 segundos.

7.3.2.13 Colocar el recipiente para recolectar el filtrado sobre la balanza y tararla.

7.3.2.14 Simultáneamente, abrir el vástago de la válvula inferior media vuelta e iniciar la recolección de datos en la computadora.

7.3.2.15 Anotar el valor medido en la balanza para el tiempo cero.

7.3.2.16 Detener la filtración a los 30 minutos, para ello se debe cerrar la válvula inferior, luego cerrar la válvula superior y detener la recolección de datos.

7.3.2.17 Cerrar el regulador de presión, purgar la manguera que lo conecta a la válvula y desconectarlo del vástago de la válvula superior.

7.3.2.18 Abrir lentamente la válvula superior y esperar a que se libere toda la presión. Sacar la celda de la camisa.

7.3.2.19 Abrir la parte superior de la celda.



### 7.3.3 **Permeación del medio sucio (papel)**

Este procedimiento permite estimar el valor de la resistencia del medio filtrante una vez que se ha culminado la filtración. Los pasos a seguir son:

7.3.3.1 Ajustar la temperatura de la manta de calentamiento de la celda HPHT en 30 °C.

7.3.3.2 Colocar la goma, el papel sin el revoque y luego la tapa inferior.

7.3.3.3 Acoplar el cuerpo de la celda y fijar la estructura cuerpo- tapa inferior mediante los pernos usando la llave para fijarlos.

7.3.3.4 Llenar la celda con agua destilada aproximadamente 1 cm por debajo del borde donde se encuentra la goma superior.

7.3.3.5 Colocar el aro y posteriormente la tapa superior con su goma y válvula, ajustarla con los pernos.

7.3.3.6 Colocar la celda en la camisa de calentamiento.

7.3.3.7 Conectar la bombona a la celda.

7.3.3.8 Abrir la válvula de la bombona.

7.3.3.9 Regular con la válvula de aguja del manómetro a la misma presión de filtración.



7.3.3.10 Abrir la válvula superior de la celda media vuelta.

7.3.3.11 Verificar que la balanza esté encendida y que la interfase de la computadora esté conectada.

7.3.3.12 Colocar el recipiente para recolectar el filtrado sobre la balanza y tararla.

7.3.3.13 Activar el programa de software de la balanza y programarla para que adquiera el valor de la masa filtrada cada 5 segundos.

7.3.3.14 Abrir el vástago de la válvula inferior media vuelta.

7.3.3.15 Guardar los datos obtenidos en una hoja de Excel.

7.3.3.16 Esperar 10 minutos aproximadamente, para el proceso de permeación.

7.3.3.17 Cerrar la válvula inferior.

7.3.3.18 Cerrar la válvula de aguja.

7.3.3.19 Abrir la válvula de alivio.

7.3.3.20 Desmontar la parte superior de la celda.



## 8. **METODOLOGÍA Y PLAN DE EXPERIENCIAS**

Para el cumplimiento de las etapas a seguir en el desarrollo del trabajo especial de grado se llevaron a cabo las siguientes actividades:

Entrenamiento en los equipos de clasificación, en la preparación de lodos de perforación, y en el manejo de las celdas de filtración HPHT, así como en el programa de elaboración de mezclas del L.S.M.

A continuación se presentan las etapas que permitieron el cumplimiento de los objetivos del presente trabajo:

### **Etapa 1: Preparación de fracciones estrechas por tamizado y clasificación centrífuga.**

En esta fase del proceso se realizaron pruebas de tamizado de seguridad para las bases, 20-25 y 40-45, de manera de eliminar impurezas.

Luego se obtuvieron fracciones estrechas a partir de la clasificación centrífuga a 3000 rpm; la cual tiene el propósito de obtener 2 cortes de material, uno llamado fino y otro denominado grueso.

El corte de finos fue dirigido a posteriores clasificaciones a revoluciones más altas, con la intención de obtener el conjunto de fracciones estrechas finas(5000,7000,9000 y 11000 rpm). De los gruesos de la clasificación a 3000 rpm, se tomó una parte como fracción estrecha límite superior de los finos correspondiente a



3000 rpm; la otra parte se envió a un proceso de tamizado vía húmeda para obtener el conjunto de fracciones estrechas gruesas, comprendidas entre los rangos: 125-90,90-75,75-63,63-53,53-45 y 45-38  $\mu\text{m}$ .

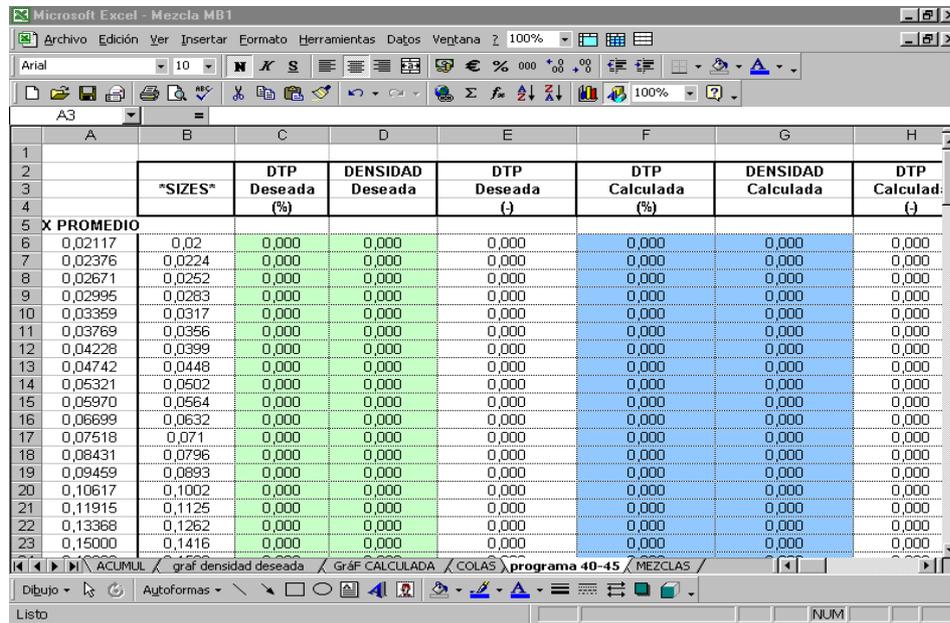
Etapa 2: Verificación de las fracciones estrechas obtenidas.

Consiste en obtener la distribución de tamaño de partícula mediante el equipo de difracción láser Mastersizer 2000.

Dicha información permite elaborar las curvas de frecuencia acumulada de las fracciones analizadas, tanto para las del proceso de tamizado vía húmeda como para las de aeroclasificación centrífuga. La disposición que guardan ambos tipos de curva permite corroborar la correcta operación de los equipos de clasificación.

Etapa 3: Diseño de mezclas.

En esta etapa se hizo uso del programa de elaboración de mezclas, el cual consta de varias hojas de cálculo, entre las que se encuentra la información asociada a la granulometría de las bases y sus fracciones estrechas(ver figura 25).



	A	B	C	D	E	F	G	H
		*SIZES*	DTP Deseada (%)	DENSIDAD Deseada	DTP Deseada (-)	DTP Calculada (%)	DENSIDAD Calculada	DTP Calculada (-)
5	<b>X PROMEDIO</b>							
6	0,02117	0,02	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
7	0,02376	0,0224	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
8	0,02671	0,0252	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
9	0,02995	0,0283	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
10	0,03359	0,0317	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
11	0,03769	0,0356	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
12	0,04228	0,0399	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
13	0,04742	0,0448	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
14	0,05321	0,0502	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
15	0,05970	0,0564	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
16	0,06699	0,0632	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
17	0,07518	0,071	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
18	0,08431	0,0796	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
19	0,09459	0,0893	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
20	0,10617	0,1002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
21	0,11915	0,1125	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
22	0,13368	0,1262	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
23	0,15000	0,1416	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

**Figura 25. Hoja de cálculo del programa de elaboración de mezclas.**

Entre la información asociada a todo el programa se encuentra una curva de densidad de distribución de la base a estudiar, en la cual se separan los puntos que conforman la cola inferior de la curva y se compara de manera simultánea con la de frecuencia acumulada, en la cual se verifica el rango de separación respecto a la base.

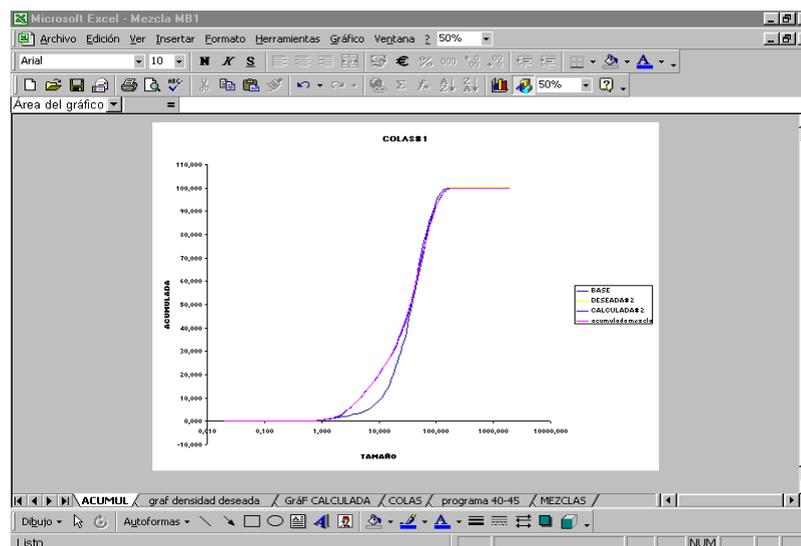
En otra hoja del mismo programa se obtiene el porcentaje de partículas formadoras de puente y el valor del  $X_{50}$  de la mezcla deseada, tratando siempre de mantener en 100% el valor del área bajo la curva modificada.

En total se diseñaron 4 mezclas para cada base, las cuales se encuentran 2 por encima del porcentaje de partículas formadoras de puente de la base y 2 por debajo de ella .

#### Etapa 4: Simulación de las mezclas diseñadas.

Una vez diseñada la mezcla, se procede a ejecutar la herramienta *solver* de la hoja de cálculo que permite establecer el mínimo error al realizarse un balance de masa, el cual utiliza la información de todo el conjunto de fracciones estrechas disponibles, tomando como criterio la menor variación posible entre la DTP diseñada y la simulada.

La separación mínima de las colas respecto a la base debe estar en un rango de 0,5 – 1% de partículas formadoras de puente, como se aprecia en la figura 26.



**FIGURA 26. Representación esquemática de la mezcla MB1 respecto a su base.**



Otro criterio usado por el programa es establecer que todas las fracciones estrechas presenten al final un porcentaje másico mayor que cero (en la medida de lo posible), con el propósito de usarlas todas al momento de preparar la mezcla diseñada.

Si al observar un gráfico de las distribuciones acumuladas de las granulometrías deseada y calculada, éstas no coinciden, entonces se regresa a la etapa 3.

#### Etapa 5: Validación de las mezclas simuladas.

Una vez realizada la simulación de las mezclas, se procede a preparar una muestra de cada una de ellas, empleando la información de fracciones másicas para cada granulometría obtenida en la etapa de simulación.

Se tomó como base una mezcla de 16 gramos con la finalidad de obtener una muestra representativa de todas las fracciones estrechas y evitar pérdidas en el divisor de muestras, la cual fue pesada en la balanza analítica, para ser analizada en el equipo de difracción láser Mastersizer 2000. Luego de obtener la DTP de la mezcla se compara con la simulada, si coinciden se puede tomar como válida, de lo contrario se debe reformular el diseño.

#### Etapa 6: Formulación de los pseudo-lodos de perforación.

Esta etapa se realiza siguiendo el procedimiento experimental señalado en la sección N° 7 del presente trabajo, correspondiente al medio filtrante que se requiera, es decir disco



poroso o papel de filtro, para las pruebas sobre discos o compresibilidad respectivamente.

#### Etapa 7: Caracterización de los discos porosos limpios.

Para esta caracterización se realizaron pruebas de permeación con agua a 30 °C y 40 psi. Esta presión de trabajo se estableció tomando como criterio que la prueba fuese lo suficientemente larga para garantizar una recopilación de datos adecuada de volumen de líquido permeado en función del tiempo.

Esta información experimental se procesa según el método de cálculo de permeación explicado en el marco teórico. A partir de este análisis se obtuvieron los valores de permeabilidad de los discos limpios. Este procedimiento se realizó para discos Fann de 10 y 20  $\mu\text{m}$ .

#### Etapa 8: Filtración de los pseudo-lodos de perforación.

En el caso de filtraciones sobre discos porosos se realizaron 2 filtraciones utilizando la celda HPHT y fijando como variables de trabajo la temperatura en 30 °C y la presión de 400 psi para las mezclas 20-25, y la misma temperatura pero presiones de 100 psi para mezclas 40-45. El criterio para seleccionar esta presión de filtración fue mediante pruebas preliminares a distintos niveles de presión, tomando aquel valor que permitiera obtener la mayor cantidad de datos de volumen de filtrado respecto al tiempo.



Con respecto a las pruebas de compresibilidad se realizaron 3 filtraciones del mismo pseudo-lodo a la misma temperatura, pero en un rango de presiones: 50,100,200 y 300 psi

Esta etapa es determinante para establecer el comportamiento del revoque, el cual se forma por 2 capas perfectamente diferenciables, una correspondiente a la zona incipiente y otra a la zona darcyana.

#### Etapa 9: Permeación del revoque y medio filtrante.

La permeación se lleva a cabo siguiendo el procedimiento señalado en la sección N° 7 del presente trabajo, según sea el medio filtrante. Para la prueba de permeación del revoque se escogió la misma presión de filtración, ya que para que se produzca el paso del agua a través de éste se requiere vencer la resistencia de él, y, para que esto ocurra debe ser igual a la de formación de la torta.

Adicionalmente, se realizó una permeación con agua del medio invadido(medio sucio) a una presión de 40 psi y una temperatura de 30°C para el caso de los discos porosos; mientras que en papel la presión fue la misma que la de permeación del medio con revoque. El criterio de selección de la presión de permeación se basó en tomar un valor que no permitiera un desplazamiento de las partículas invasoras que pudieran estar presentes en el medio y que a su vez lograra obtener una cantidad representativa de datos.



**Etapa 10: Determinación de la masa y altura del revoque.**

La masa se determinó una vez que el revoque se ha secado, tomando el peso en la balanza desecadora, y para obtener el valor de la altura se realizaron 10 mediciones en distintos puntos del revoque, para luego tomar un promedio de éstas. Esto es válido tanto para las pruebas sobre discos porosos como sobre papel.



## 9. ANÁLISIS DE DATOS

Esta sección contempla todo lo referente al manejo de los datos (apéndice A), e incluye las actividades preliminares a las experiencias realizadas en el laboratorio, lo cual permite determinar la confiabilidad de los mismos. Dicha sección se dividió en dos partes; la primera contempla el análisis relacionado a la filtración sobre discos porosos, mientras que la segunda explica lo referente a las pruebas de compresibilidad.

Los aspectos más resaltantes a considerar son los siguientes:

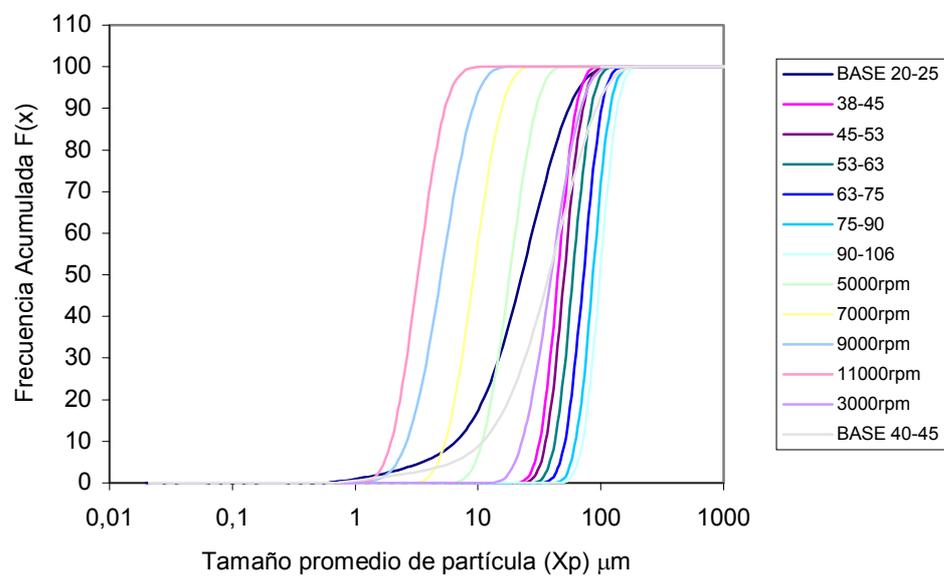
### 1. Descripción de las mezclas diseñadas.

El estudio de la caracterización del revoque se realizó construyendo mezclas a partir de dos granulometrías base, correspondiente al carbonato comercial INTECARB, grado 20-25 y 40-45, cuyos tamaños de partícula promedio son  $22.83 \mu\text{m}$  y  $35.77 \mu\text{m}$ , respectivamente; éstos indican la mediana nominal de la distribución ó el  $X_{50}$ . Para efectos de nomenclatura se decidió nombrar a las granulometrías 20-25 y 40-45 como A y B respectivamente. A continuación se mencionan las mezclas diseñadas, las cuales se especifican de acuerdo al tamaño promedio de poro del medio filtrante, es decir los correspondientes a 10 y 20  $\mu\text{m}$ . Dichas mezclas se nombraron en orden decreciente de porcentaje de partículas formadoras de puente (%FP), es decir, la mezcla MA1 es la de mayor %FP y MA4 corresponde al menor %FP, así para la base B.

**Tabla 9.1:** Nomenclatura de mezclas diseñadas

BASE A		BASE B	
10 $\mu\text{m}$	20 $\mu\text{m}$	10 $\mu\text{m}$	20 $\mu\text{m}$
MA1-10	MA1-20	MB1-10	MB1-20
MA2-10	MA2-20	MB2-10	MB2-20
A-10	A-20	B-10	B-20
MA3-10	MA3-20	MB3-10	MB3-20
MA4-10	MA4-20	MB4-10	MB4-20

En la tabla anterior se debe tener en cuenta que A-10,A-20,B-10 y B-20 corresponden a las bases empleadas.



**FIGURA 27.** Distribución de frecuencia acumulada de las bases y sus fracciones estrechas.

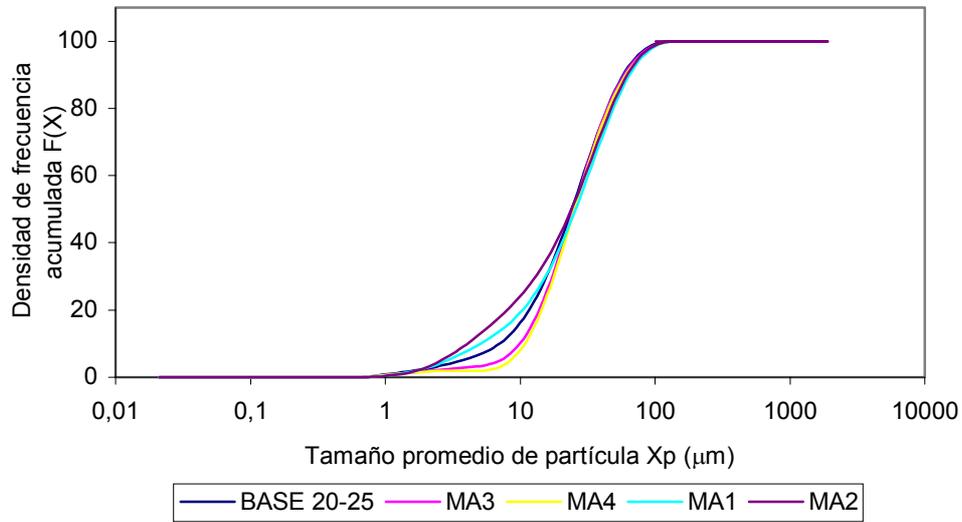


Es importante destacar que en la figura 27 se ve reflejada la correcta operación de los equipos que permitieron obtener las fracciones estrechas de A y B; ya que esto se ve a través del paralelismo que presentan entre ellas, tanto para la base A como la base B

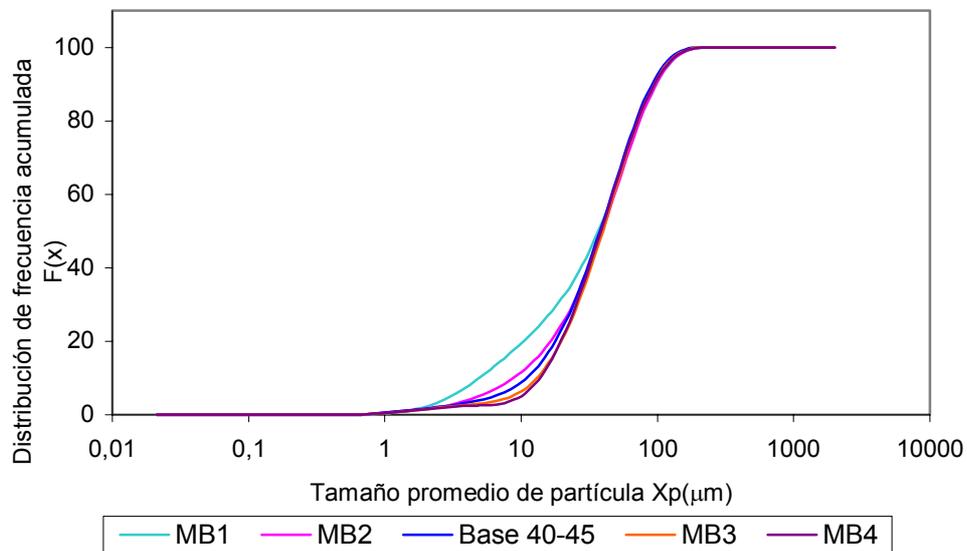
Las mezclas construidas se obtuvieron a partir de fracciones estrechas provenientes de cada base. Es importante mencionar que dichas fracciones presentan la misma distribución de tamaño de partícula, diferenciándose sólo en las cantidades obtenidas en cada caso.

El diseño o construcción de dichas mezclas se realizó tomando en cuenta que dos de estas tuvieran un porcentaje de finos menor a la base y dos se encontraran por encima de ésta, manteniéndose el  $X_{50}$  constante.

A continuación se muestran las figuras 28 y 29 correspondientes a las mezclas con sus bases.



**FIGURA 28. Distribución de frecuencia acumulada de la base 20-25 y las mezclas diseñadas.**



**FIGURA 29. Distribución de frecuencia acumulada de la base 40-45 y las mezclas diseñadas.**

Para el diseño fue necesario emplear el parámetro asociado al porcentaje de partículas formadoras de puente (%FP).



Dichos porcentajes fueron determinados a partir de la regla empírica señalada en el marco teórico, en la que se establece que el tamaño de partículas capaces de formar puentes están entre  $1/7$  y  $1/3$  del diámetro de poro del medio filtrante, en cuyo caso fueron discos porosos Fann de 10 y 20  $\mu\text{m}$ .

A pesar de la consideración antes mencionada es importante establecer que no se fijó un rango específico de porcentaje de partículas formadoras de puente, sino que se tomó en cuenta una separación en la cola inferior de la curva de frecuencia acumulada respecto a la base. Esto se muestra en las figuras 28 y 29 .

Al realizar las mezclas se verificó el %FP, a través del siguiente cálculo:

$$\%F.P = F\left(\frac{1}{3} dp\right) - F\left(\frac{1}{7} dp\right) \quad (9.1)$$

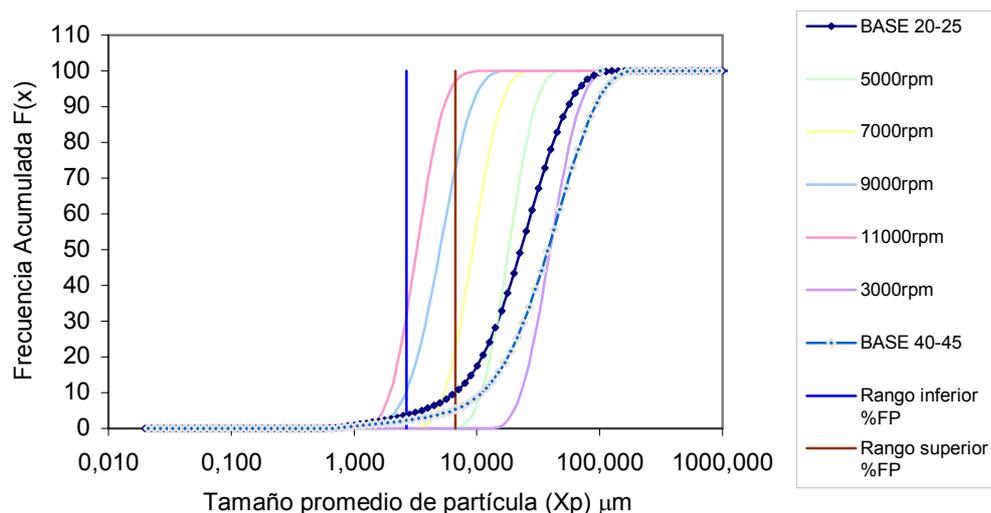
donde los términos de la derecha representan el porcentaje de la masa total de partículas correspondiente a ese tamaño de poro.

Por otra parte se decidió tomar en cuenta las fracciones de 5000 y 7000rpm, para las filtraciones sobre discos de 20  $\mu\text{m}$ , ya que estas permiten extender el rango de estudio dada su posición en la gráfica de distribución de frecuencia, tal como se observa en la figura 30, ya que éstas se encuentran en los extremos de las mezclas obtenidas; es decir el %F.P. para 5000rpm y 7000rpm son el menor y el más alto respectivamente respecto a las mezclas diseñadas, además son las únicas que se encuentran entre ambas bases cumpliendo con el %FP para 20 $\mu\text{m}$ , se seleccionaron de esta forma por el hecho de que utilizando sólo la base (20-25 ó 40-45) la

curva de la mezcla que se está diseñando tiene una limitación de forma y no permite ampliarla o separarla mucho de su correspondiente base, debido a que tanto A como B no cuentan con partículas por debajo de los  $0.63 \mu\text{m}$ , lo que no permite la extensión de la cola de finos.

Es importante destacar que para algunas mezclas base A se excluyeron las fracciones correspondientes al proceso de tamizado en húmedo y la base, y se incluyó la fracción de 3000rpm del proceso de aeroclasificación, ya que al momento del diseño dichas mezclas presentaban bimodalidades en la curva correspondiente a la densidad de distribución para la calculada por el programa. Este procedimiento se hará tantas veces como sea necesario hasta obtener el comportamiento adecuado (ausencia de bimodalidad).

En la siguiente figura se ilustran las bases (A y B) incluyendo las fracciones estrechas de 5000 y 7000rpm.



**FIGURA 30. Distribución de frecuencia acumulada de las bases y sus fracciones estrechas.**



En la figura anterior pueden observarse las fracciones estrechas entre el límite superior e inferior del %FP para filtraciones en discos porosos de 20 $\mu$ m.

## 2. Variables asociadas a la filtración del lodo de perforación.

Es necesario determinar un conjunto de variables que permitan la posterior caracterización del revoque a través de su permeabilidad y solidosidad.

Las variables tomadas en cuenta son:

- Volumen y tiempo de filtrado.
- Altura y masa del revoque.
- Verificación de la permeabilidad de los discos.
- Condiciones de trabajo (Presión, Temperatura)

Estas variables se estudiaron tanto para las pruebas sobre discos como para las de papel de filtro. Por lo tanto se dividirá en dos partes, tal como sigue.

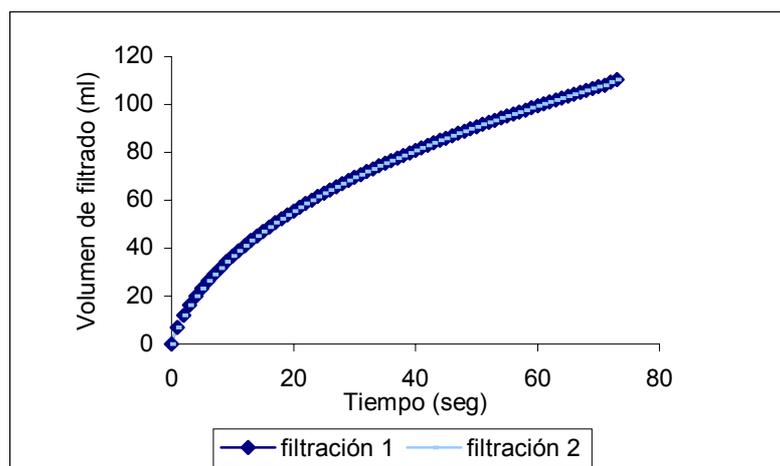
### Parte I. Discos Porosos

El *volumen de filtrado* representa el dato imprescindible para el cálculo de la permeabilidad del revoque formado.

Este volumen de filtrado se determina usando el programa Balancelink del L.S.M., el cual opera en un computador conectado a una balanza digital, lo que permite el registro en una hoja de cálculo de Excel de las masas provenientes del proceso de filtración.

Estos datos se registraron cada 1 segundo, con la finalidad de obtener una mayor cantidad de ellos, tal que permitiese el análisis y posterior caracterización de los revoques. Esta prueba se detiene en el momento en el cual el lodo ha filtrado completamente, ya que el tiempo total de filtración lo determina cada mezcla en particular, ya que varía de una a otra dado que la velocidad de filtrado se ve afectada por la cantidad de finos presentes en dicha mezcla.

En la siguiente figura se ilustra un ejemplo de dos curvas de filtración correspondiente a la mezcla MA2-20.



**FIGURA 31. Curva de filtración para dos pruebas de la mezcla MA2-20.**

Debe destacarse que en el proceso de filtración sobre discos porosos la *teoría de la doble permeabilidad* (Sorrentino,200) no posee un 100 % de validez, ya que para la mayoría de las mezclas obtenidas los tiempos correspondientes a la formación de la etapa incipiente son de 1 segundo, lo que parece indicar que no existe tal zona,



dado la baja posibilidad de tiempo de formación, véase el apéndice B.

Por otra parte para obtener el parámetro de solidosidad del revoque es necesario obtener el dato de su *altura*, secándolo primero para luego tomar diez alturas en distintas zonas de él y promediándolas, ya que éstos no son completamente regulares o uniformes. Para ello se usó un tornillo micrométrico; cuya precisión es de 0,001 mm. Previo a esto se debe tomar el *peso* en la balanza desecadora.

Con los resultados de las pruebas preliminares de filtración, se encontró que las *presiones* de trabajo deben ser de 400 y 100 psi, para A y B, respectivamente.

La *temperatura* de operación será de 30 °C (86<sup>a</sup>F) o hasta 90° F aproximadamente, también contemplada en la norma API RP-13B- 2.

Un punto aparte y no menos importante es el relacionado con la pérdida de permeabilidad del disco poroso, lo que se traduce en un aumento de su resistencia.

Para verificar las condiciones iniciales de cada disco se procedió a realizar las permeaciones del medio limpio para luego ser sometido a un proceso de lavado con ácido, tal como se detalla en la sección de análisis de datos pruebas preliminares y permearse de nuevo. La verificación consiste en comparar la resistencia del disco recuperado con la inicial del mismo, si existe



una diferencia de más de 10%, el disco debe ser descartado, sino es así el disco puede ser utilizado de nuevo sin ningún problema.

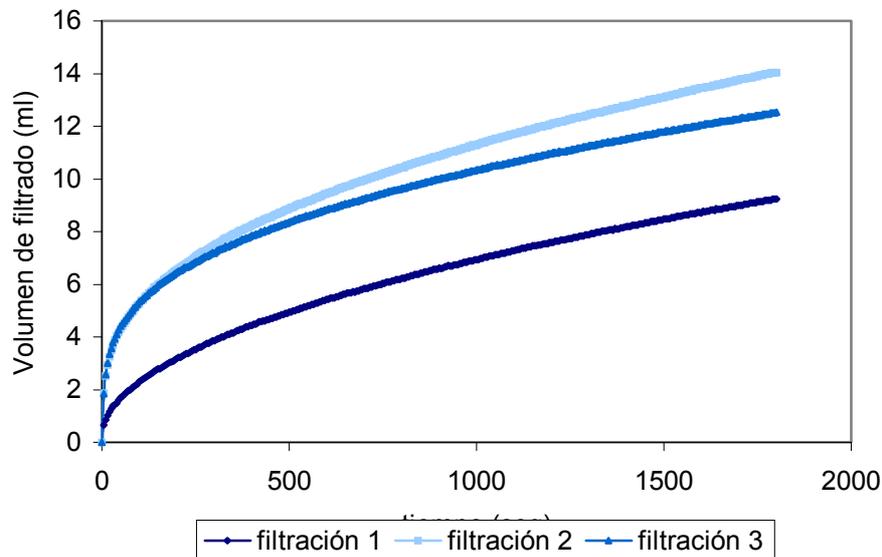
Experiencias anteriores comprobaron que los discos pueden ser recuperados hasta siete veces y luego ser reutilizados, no así la octava vez. (Pérez-Meza.2001)

En este caso no fue posible determinar con exactitud la pérdida de permeabilidad de los discos, ya que éstos no guardaban condiciones iniciales similares, es decir ya habían sido usados con anterioridad, por lo que no pudo establecerse una variación de resistencia. Por otra parte, para la mayoría de las filtraciones se usaron distintos discos, lo que dificulta aún más dicha comprobación.

## Parte II. *Papel de filtro*

Para las pruebas de compresibilidad sobre papel y las pruebas sobre discos, lo más importante es obtener el volumen de filtrado. En la figura 32 se muestran las curvas asociadas a la base 20-25 con cada una de sus filtraciones. Para cada una de las presiones de operación se realizaron el mismo número de filtraciones.

La filtración se realiza durante un tiempo de 30 minutos, tal como lo cita la norma API RP-13B-2, aún y cuando el lodo no haya filtrado completamente.



**FIGURA 32. Curva de filtración para tres pruebas de base 20-25 a 200psi.**

Para obtener la masa de filtrado se usa el mismo programa mencionado en la parte I, con la diferencia de que el tiempo de registro se hace cada cinco segundos, ya que la ubicación del beaker colector de filtrado respecto a la celda HPHT no permite un certero registro de datos dado que la distancia entre el vástago de desalojo y el beaker es relativamente larga.

Nuevamente se deja secar el revoque para obtener datos de peso y altura. Es importante destacar que el parámetro solidosidad es inversamente proporcional a la altura del revoque, por lo que cualquier error cometido en la medición de este parámetro influye considerablemente en la solidosidad.



Respecto a las presiones de trabajo el L.S.M. decidió compartir el desarrollo de este objetivo con el grupo de Pérez y Meza de la siguiente forma:

Se seleccionó un rango de presiones de 50 a 500 psi. Las presiones utilizadas en el desarrollo de las pruebas fueron: 50,100,200,300,400 y 500 psi.

### *3. Experiencias con goma Xanthana.*

En esta sección se realizaron experimentos similares pero con fines diferentes. El primero con el propósito de encontrar la viscosidad de la goma de forma experimental y compararla con la que se obtiene a través del análisis de la curva de filtrado descrito en la sección 4.7 del marco teórico; el segundo se realizó para verificar si la goma estaba invadiendo el medio filtrante (discos), a través de la pérdida de permeabilidad del medio(ver apéndice C).

Estas experiencias demostraron que existe una diferencia de un orden de magnitud al calcular el valor de viscosidad usando la ecuación 4.42 utilizada en el análisis de la curva de filtrado respecto a la experiencia que contempla sólo la solución agua-goma.

La segunda experiencia muestra un incremento de peso en los discos luego de permear, lo que corrobora el hecho de que la goma Xanthana taponar el medio; esto da como resultado una viscosidad mayor a la real porque el efecto de taponamiento hace que el caudal circulante sea menor, debido a que la resistencia que ofrece el medio poroso al flujo es mayor.



En la tabla 9.2 se presentan las variaciones de pesos para los discos usados en las pruebas de permeación de la solución agua-goma.

**Tabla 9.2:** Masa atrapada en los discos porosos y variación de sus resistencias.

DISCO	MASA INICIAL (gr)	MASA FINAL (gr)	MASA ATRAPADA DE GOMA	VARIACIÓN RESISTENCIA (%)
10 $\mu\text{m}$	42.039	42.076	0.037	19
20 $\mu\text{m}$	42.433	42.483	0.05	16



## 10. ANÁLISIS DE DATOS DE PRUEBAS PRELIMINARES

La siguiente sección contempla brevemente los resultados de experiencias previas a aquellas asociadas directamente con el trabajo; pero que de alguna manera permitieron corroborar algunos datos y variables de los resultados finales.

Dichas actividades son las siguientes:

### 10.1 *Evaluación de la permeabilidad de los discos porosos.*

Esta prueba fue realizada con la finalidad de evaluar las condiciones iniciales del medio filtrante; para ello se hicieron pruebas de permeación con agua sobre el medio, tanto para los discos de 10  $\mu\text{m}$  como para los de 20  $\mu\text{m}$ .

Previo a esto se realizó un proceso de lavado de los discos según el procedimiento sugerido por Pérez y Meza, dejándolos por un período de treinta minutos sumergidos en ácido clorhídrico al 3%<sup>m</sup>/v.

La evaluación de la permeabilidad de los discos se llevó a cabo tomando en cuenta las pendientes iniciales de cada uno; las cuales dan una idea acerca del uso al que pudieron estar sometidos anteriormente, ya que las mismas están asociadas directamente con la resistencia del medio, la cual es inversamente proporcional a la permeabilidad; así, se permitió una desviación del 10% como valor máximo para no descartar al disco, de lo contrario se repite la fase de lavado, tal como indica el



procedimiento señalado en la 7.2.10 del procedimiento experimental. Si no recupera la permeabilidad en esta segunda fase de lavado se descarta por completo.

### 10.2 *Medición de la densidad de la solución agua-goma.*

En esta fase de las pruebas se realizó la solución de goma-agua de la misma forma que se realiza para la elaboración del lodo de perforación, tal y como se muestra en el procedimiento experimental. Luego se procedió a medir la densidad de la solución utilizando para esto un picnómetro, ya que en el cálculo del parámetro de concentración ( $\phi_s$ ) se empleó la densidad del agua en sustitución de la densidad de la solución goma-agua. Dicho valor no arrojó una variación significativa respecto a los parámetros posteriores y dependientes de este último, ya que ambos valores son iguales.

$$\rho_{H_2O} = 1 \text{ gr/ml.} = \rho_{sol}$$

### 10.3 *Selección de las presiones de trabajo en las filtraciones sobre discos porosos, para cada una de las bases estudiadas.*

En este caso se realizaron pruebas de filtración, como se señala en el apéndice A, esto con la finalidad de obtener una cantidad representativa de datos de volumen de filtrado, ya que en el caso de los discos porosos el paso del filtrado se realiza en un tiempo muy corto, por lo que fue necesario ajustar la presión para la base B. En el caso de la fracción base A Pérez y Meza



determinaron que una presión de 400 psi permitía obtener puntos suficientes para el análisis.

Por otra parte, para la base B se realizaron pruebas durante el desarrollo del presente trabajo, encontrándose que se debía filtrar a una presión de 100 psi, ya que existen partículas de mayor tamaño que no ofrecen resistencia dentro del medio por lo que el paso del filtrado ocurre rápidamente.

#### 10.4 Balance de masa.

Para la estimación de la masa invasora fue necesario realizar un balance de masa, partiendo del siguiente concepto:

$$M_T = M_{\text{revoque}} + M_{\text{inv disco}} + M_{\text{filt}} \quad (10.1)$$

donde:

$M_T$ : masa total de sólidos (M)

$M_{\text{revoque}}$ : masa del revoque o torta (M)

$M_{\text{inv disco}}$ : masa interna en el disco (M)

$M_{\text{filt}}$ : masa de sólidos en el filtrado (M)

En un principio se tomó en cuenta que la masa total correspondía a la asociada al volumen final de filtrado, obteniéndose una masa del revoque mucho mayor a la original, lo que originó valores negativos de masa invasora. Esto ocurre ya que existe una fuente de error en la apreciación de dicho volumen, ya que éste se ve afectado por un chorro de aire en el momento final de filtración lo que permite reportar un valor ficticio de volumen final.



Una manera de evitar este error fue tomando en cuenta la masa asociada al volumen colocado en la celda antes de filtrar, con la finalidad de que el balance tenga validez, ya que los sólidos depositados en el revoque nunca van a ser mayores a los que inicialmente se colocaron en la celda (ver apéndice C).



## 11. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Esta sección tiene como objetivo presentar y discutir los resultados obtenidos al realizar el plan de experiencias, estableciendo los siguientes análisis:

- Evaluar la compresibilidad de los revoques formados sobre papel de filtro a partir de su influencia sobre la permeabilidad, comparándolas por medio del empleo de dos expresiones (Tiller y Lewis).
- Determinar las características de los revoques formados sobre discos porosos empleando el producto permeabilidad-solidosidad ( $K\varepsilon_s$ ) a través de la variación granulométrica del pseudo-lodo.
- Influencia de la granulometría sobre la permeabilidad de revoques formados sobre discos, usando parámetros tales como la relación volumen-superficie de partícula ( $D_{3,2}$ ) y el porcentaje o fracción de partículas formadoras de puentes (%FP).
- Evaluar la influencia del cambio en la granulometría de los lodos preparados, sobre la porosidad del revoque.
- Evaluar la influencia de los cambios de granulometría en la pérdida de permeabilidad del medio poroso.

### 11.1 Compresibilidad

Este estudio se realiza para evaluar el efecto que tienen los cambios de presión sobre un revoque a través de la variación de la permeabilidad de éste; esto se debe a la existencia de espacios libres entre las partículas que conforman dicho revoque, debido a

que un aumento en la presión ejercida sobre él pueda disminuir dichos espacios impidiendo la facilidad al flujo de lodo.

Al realizar el estudio de los parámetros obtenidos para las expresiones de Lewis y Tiller (Tiller.1999-Lewis.1995) para predecir el efecto de la compresibilidad, se obtuvo que los revoques formados para las bases 20-25 y 40-45 sobre papel de filtro, son compresibles tal como se observa en la tabla n° 11.1. Se realizaron cálculos diferentes para obtener la permeabilidad para ambas teorías.(ver apéndice E).

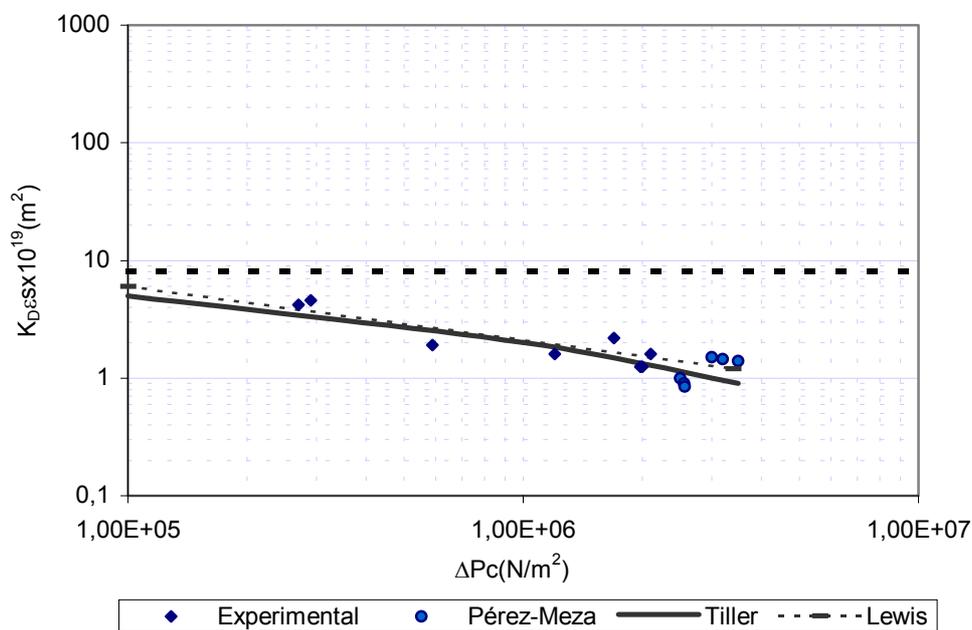
**Tabla 11.1. Parámetros de Tiller y Lewis para cada una de las bases.**

Base	TILLER			LEWIS	
	$\delta$	Pa (N/m <sup>2</sup> )	$K_{\epsilon_{S0}} \times 10^{19}(\text{m}^2)$	n	$K_{\epsilon_{S1}} \times 10^{19}(\text{m}^2)$
20-25	0,9572	1E05	8,2768	0,5136	2354,6
40-45	11,3489	1E05	286,0216	0,914	721273

Puede observarse que los índices de compresibilidad  $\delta$  y n para Tiller y Lewis respectivamente son diferentes a cero, así para el caso de Tiller para la base 20-25 los valores de  $\delta$  corresponden a tortas compresibles y para la base 40-45 los valores de  $\delta$  por ser mayor a la unidad corresponden a tortas muy compresibles. Para el caso de Lewis se observa una diferencia notable respecto a Tiller y los valores del índice de compresibilidad (n) muestran que los revoques formados para las bases en estudio son compresibles. La diferencia antes expuesta puede deberse al hecho que el modelo

de Tiller aproxima mejor los resultados experimentales sin importar la presión a la que se trabaje.

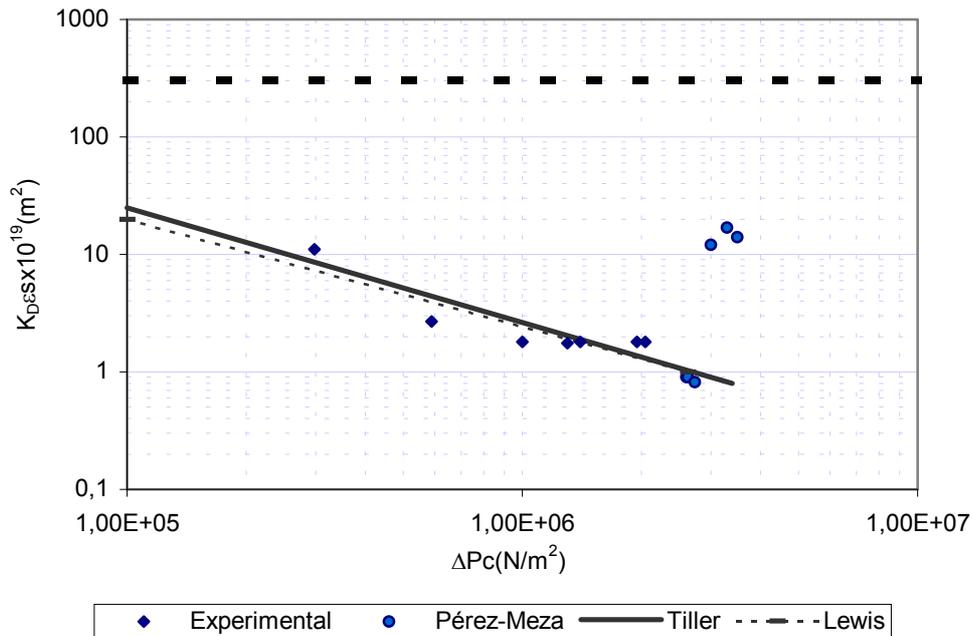
En la figura 33 puede observarse que a presiones menores a 29 psi (2E5Pa) el método de Tiller tiende a un valor constante, lo cual es correcto ya que para presiones bajas existe una resistencia al paso del fluido, aunque ésta sea mínima.



**FIGURA 33. Comparación de ajuste de los datos experimentales por el modelo de Lewis y el modelo de Tiller para la base 20-25.**

Lo contrario ocurre para el método de Lewis, el cual crece monótonamente para presiones menores a  $2 \times 10^5$  Pa (Pérez-Meza). Así puede decirse que para el estudio del comportamiento de la permeabilidad en el rango estudiado de presión pueden emplearse ambos métodos de aproximación. (Tiller y Lewis)

En el estudio de la base 40-45 puede observarse que la tendencia de Lewis es similar al comportamiento de la base 20-25, ya que a presiones menores de 29 Psi ( $2 \times 10^5$  Pa) tiende a crecer monótonamente; esto puede observarse en la figura 34.



**FIGURA 34. Comparación de ajuste de los datos experimentales por el modelo de Lewis y el modelo de Tiller para la base 40-45.**

En esta figura puede observarse también que las permeabilidades obtenidas para revoques formados a 500 Psi ( $3,45 \times 10^5$  Pa) son mayores a las obtenidas para 400 Psi ( $2,76 \times 10^5$  Pa) interrumpiendo la tendencia a la disminución de las curvas de aproximación de ambos modelos.

Si se comparan las figuras 33 y 34 puede observarse que si aumenta el tamaño promedio de las partículas de carbonato de calcio base y se trabaja a presiones mayores a los 500Psi, la



permeabilidad del revoque formado aumenta.. Lo antes expuesto puede deberse a que a presiones menores a 500 Psi la goma se comporta como un pseudo-sólido deformable quedándose atrapada en el revoque, debido al tamaño de los espacios vacíos en el revoque, disminuyendo la facilidad de flujo de la solución goma-agua. (Pérez-Meza.2001)

Otro de los estudios más importantes para caracterizar un revoque es el estudio de la permeabilidad de éste; para ello es necesario tomar en cuenta primeramente la porosidad del mismo para establecer la relación existente entre ambos parámetros.

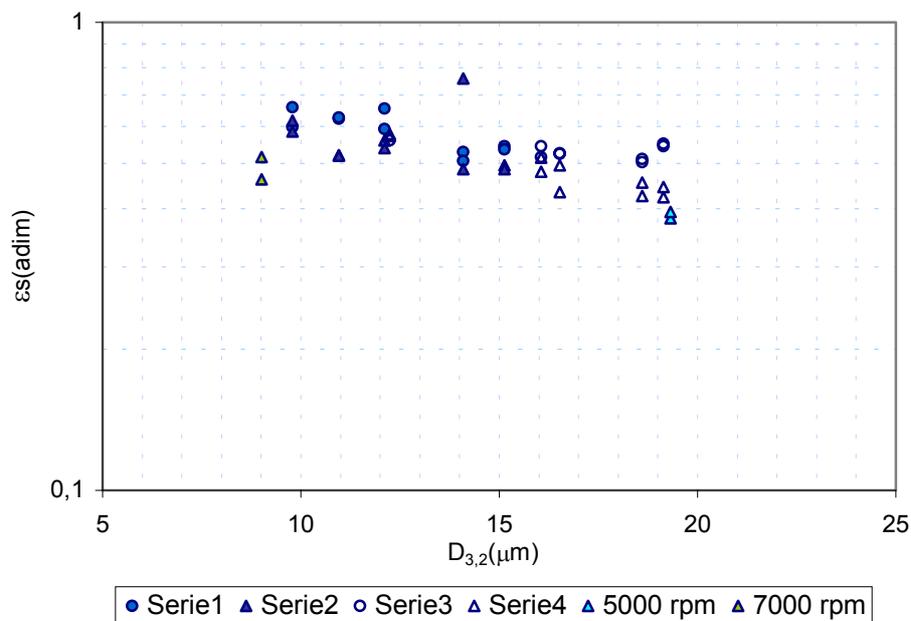
## **11.2 Porosidad.**

La porosidad ( $\varepsilon$ ) es la fracción de espacios vacíos que se encuentra en la torta y se expresa como la fracción de volumen de esos espacios, los cuales son los que permiten el paso al fluido. En este análisis el estudio de este parámetro se realiza de forma indirecta a través de la solidosidad ( $\varepsilon_s$ ) la cual indica la fracción del volumen de la torta ocupado por las partículas sólidas.

En la figura 35 se representan los valores de solidosidad de las distintas granulometrías, observándose dispersión entre ellos, pero con una ligera tendencia a la disminución a medida que el  $D_{3,2}$  se hace mayor; lo cual es lógico ya que teóricamente se dice que a medida que se emplea un mayor  $D_{3,2}$  el empaquetamiento de las partículas permite mayor cantidad de espacios vacíos en el revoque formado, es decir, aumenta la porosidad del mismo ya que las partículas más grandes se ubican en la superficie del disco

impidiendo el paso a las más pequeñas formándose así un revoque de mayor tamaño.

En ésta figura al igual que las siguientes, se muestra que la simbología rellena corresponde a la fracción 20-25 y la simbología vacía representa las filtraciones de las series de fracción 40-45. El círculo indica filtraciones sobre discos de  $10\mu\text{m}$  y los triángulos filtraciones sobre discos de  $20\mu\text{m}$ . Las simbologías de las filtraciones de 5000 y 7000rpm, aún y cuando están rellenas corresponden a ambas fracciones.



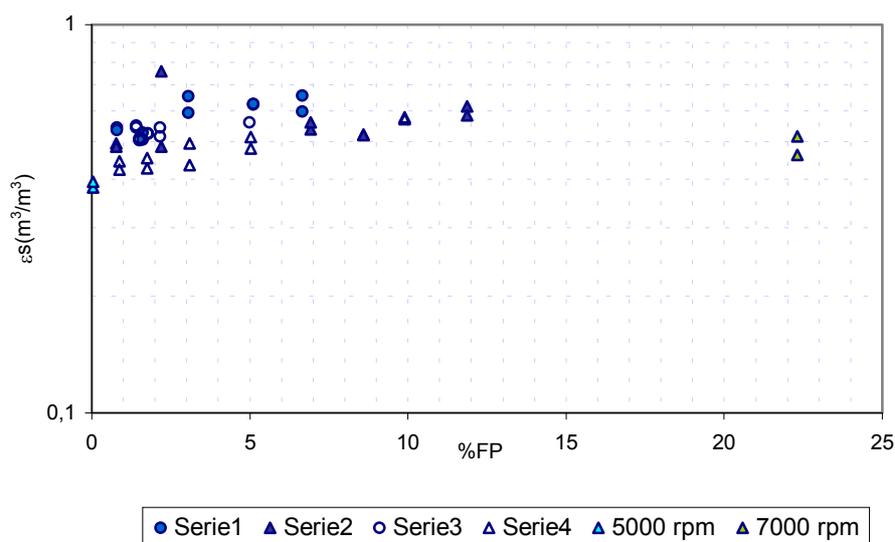
**FIGURA 35. Variación de la solidosidad en función del parámetro  $D_{3,2}$  para las diferentes granulometrías.**

Un ejemplo de esto se muestra en la tabla 11.2; observándose que al emplear una granulometría límite de menor  $D_{3,2}$  (7000rpm) hasta otra con  $D_{3,2}$  mayor (5000rpm) la diferencia en la altura de ambos revoques es apreciable.

**Tabla 11.2. Variación de la altura de los revoques a distintas granulometrías de la fracción 40-45 en discos de 20  $\mu\text{m}$ .**

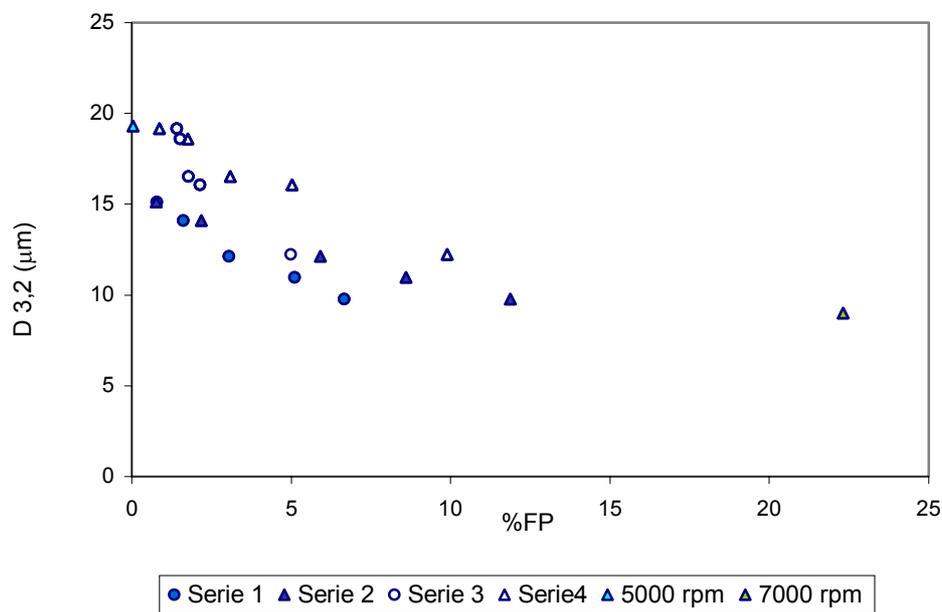
Granulometría 40-45	( $D_{3,2}$ )	Altura promedio del revoque formado (cm)
7000rpm	9,01	0,314
MB1-20	12,25	0,305
MB2-20	16,05	0,340
B-20	16,53	0,353
MB3-20	18,60	0,392
MB4-20	19,15	0,419
5000rpm	19,32	0,477

Por otra parte, en la figura 36 puede observarse que a medida que la fracción de partículas formadoras de puentes aumenta (ver marco teórico), la solidosidad de los revoques formados tiende a ser mayor, aunque de manera ligera.



**FIGURA 36. Variación de la solidosidad en función del parámetro %FP para las diferentes granulometrías.**

Lo antes expuesto confirma el hecho de que al aumentar el %FP, se generan revoques con menos espacios vacíos. El comportamiento de las figuras 35 y 36 se debe a la relación inversa que guarda la fracción de partículas formadoras de puentes con el  $D_{3,2}$ , tal como se muestra en la figura 37, ya que a medida que aumenta el %FP, el  $D_{3,2}$  disminuye.



**FIGURA 37. Variación del  $D_{3,2}$  en función del parámetro %FP para las diferentes granulometrías.**

Es importante destacar que el parámetro solidosidad ( $\epsilon_s$ ) no es absolutamente confiable ya que éste depende de la altura del revoque, la cual es medida a una presión distinta a la que se encuentra dentro de la celda. Esto se debe al efecto que ejercen los cambios de presión sobre el revoque; como se dijo antes, los revoques son compresibles, sin embargo debido a la incertidumbre generada por éste parámetro se prefiere asegurar que la porosidad

es constante, a medida que aumenta el  $D_{3,2}$ , tal como demostraron trabajos realizados anteriormente.

A continuación se realiza un análisis de manera individual sobre las zonas que conforman el revoque (darcyana e incipiente), para luego establecer relaciones con el comportamiento global del mismo, tomando en cuenta las características de dichas zona de la torta.

### **11.3 Permeabilidad Darcyana sobre discos porosos.**

Para este análisis se empleó el producto permeabilidad-solidosidad ( $K\varepsilon_s$ ); dado que permite disminuir la incertidumbre ofrecida por la medición de la altura del revoque. Además este producto es un parámetro que contiene dos efectos como lo son la permeabilidad de la zona estudiada y la solidosidad de la misma.

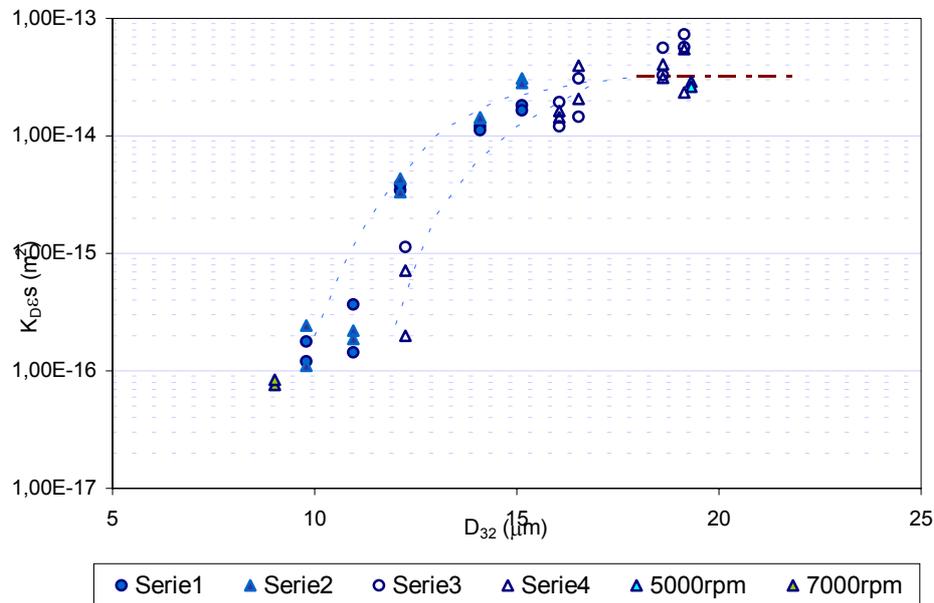
El producto permeabilidad-solidosidad global y el correspondiente a las zonas darcyana e incipiente se estudia respecto a los parámetros característicos de las bases y las mezclas como lo son el  $D_{3,2}$ , %FP, %FP/Dp. Este último se emplea gracias a que permite estudiar la independencia de la permeabilidad del medio filtrante empleado. (Pérez y Meza 2001)

En la figura n° 38 se muestra el producto permeabilidad darcyana-solidosidad ( $K_{D\varepsilon_s}$ ), para cada una de las series en función del  $D_{3,2}$ . En ésta se puede observar que para cada granulometría existe una clara tendencia de que a medida que aumenta el  $D_{3,2}$  aumenta dicho producto; notándose que existe una diferencia de tres órdenes de magnitud entre las granulometrías extremas (5000



y 7000rpm). Cabe destacar que la curva que representa las filtraciones con granulometrías 40-45 es el resultado de emplear una presión de trabajo de 100psi a diferencia de las realizadas con fracción 20-25 las cuales fueron hechas a 400psi, tal como se explicó en la sección de análisis de datos.

Por tanto, la comparación que pueda realizarse entre ambas líneas de tendencia puede basarse en la curva aproximada a 400psi para las filtraciones 40-45, obtenida a partir del orden de magnitud que se presenta entre una filtración a 100psi y 400psi en la sección 11.1. Esta tendencia puede deberse a que a medida que se emplea una granulometría con  $D_{3,2}$  mayor, el revoque formado tiene partículas más grandes, lo que genera un empaquetamiento tal que ofrece un mayor volumen de espacios vacíos entre dichas partículas; lo cual permite que el fluido penetre el revoque con mayor facilidad, generando un aumento en la permeabilidad del mismo.

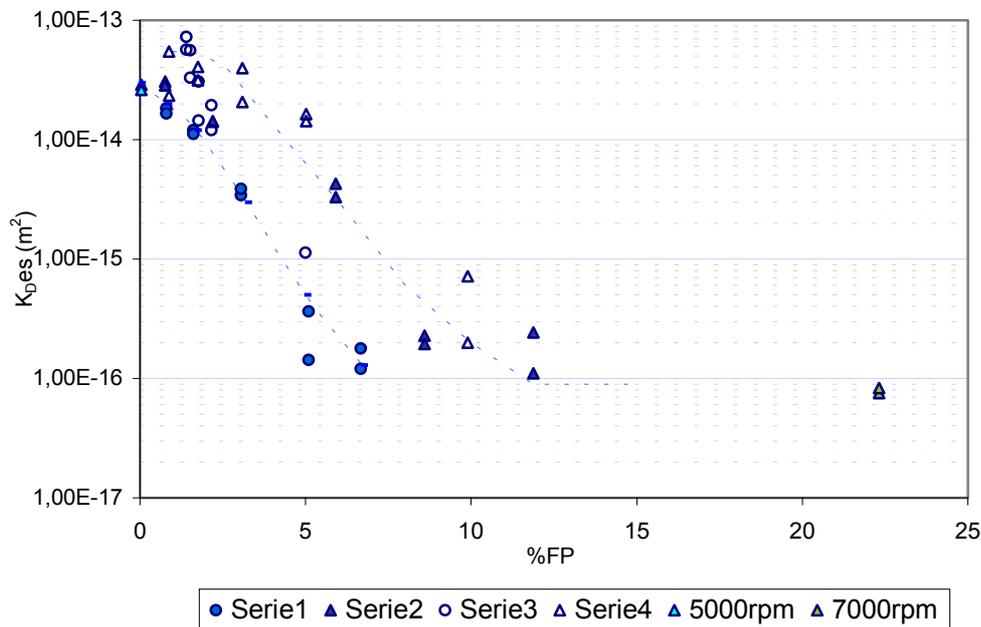


**FIGURA 38. Variación de la permeabilidad de la zona darcyana en función del parámetro  $D_{3,2}$  para las diferentes granulometrías.**

Según la tendencia observada en la figura 38, cuando se tiene un revoque con granulometría de mayor  $D_{3,2}$  respecto a otro, éste debe ser más permeable, destacando que se hace independiente del disco donde se filtre; al comparar la granulometría de 5000rpm con la mezcla de  $D_{3,2}$  más próxima a ésta (serie 4), lo antes expuesto no ocurre. Esto puede deberse a que al emplear granulometrías con  $D_{3,2}$  cercano a los  $20\mu\text{m}$  la permeabilidad tiende a ser constante<sup>(Pérez y Meza.2001)</sup>; lo cual indica que el cambio en los espacios vacíos del revoque no afecta el flujo del fluido a través de éste, alcanzándose así un valor límite de permeabilidad.

La línea segmentada (color rojo) en la figura 38 representa la tendencia a ser constante de la permeabilidad, basándose en los resultados de Pérez y Meza. Como se dijo antes, esta zona indica que la solución goma-agua se comporta como un fluido que atraviesa el revoque y el medio sin quedarse atrapada en ellos. También puede observarse que para las granulometrías 20-25 esta zona no se observa tan claramente como para las de 40-45; esto se debe a que ambas granulometrías poseen diferente desviación estándar geométrica ( $\sigma_g$ ). Tomando en cuenta que si una granulometría tiene una  $\sigma_g$  pequeña, ésta posee menor cantidad de finos; así, la granulometría 20-25 de mayor  $D_{3,2}$  está compuesta por menor cantidad de finos, pero no la suficiente para que el revoque contenga poros tales que permitan el paso fácil de la solución goma-agua.

Al evaluar la permeabilidad darcyana con el cambio en el porcentaje de partículas formadoras de puentes (%FP), puede observarse que la tendencia es que a medida que aumenta el %FP, el producto ( $K_{D\epsilon_s}$ ) disminuye tanto para filtraciones sobre discos de  $10\mu\text{m}$  como para los de  $20\mu\text{m}$  (figura 39). Cabe destacar que la menor permeabilidad obtenida fue para el revoque formado con granulometría de 7000rpm; ya que es en esta donde se encuentra la mayor cantidad de partículas formadoras de puente, las cuales forman un mayor número de enlaces en la superficie del disco permitiendo un mejor empaquetamiento de las mismas en la formación del revoque. También puede observarse que la agrupación de ambas tendencias es diferente a la que resulta empleando el  $D_{3,2}$  (figura 38), ya que al emplear el %FP la agrupación ocurre de acuerdo a la granulometría y no al medio, ya que el %FP depende del disco que se emplee.



**FIGURA 39. Variación de la permeabilidad de la zona darcyana en función del parámetro %FP para las diferentes granulometrías.**

Dicho revoque presenta espacios más estrechos que disminuyen la facilidad al paso del fluido (solución goma-agua), generando un revoque menos permeable.

Al igual que en la figura 38 existe una zona en que la permeabilidad tiende a ser constante<sup>(Pérez-Meza2001)</sup>, ya que llega un momento en que la cantidad de partículas formadoras de puentes crean una estructura tan poco permeable, que revoques formados con mayor fracción de estas presentan casi la misma permeabilidad, debido a que existe un momento en que el revoque alcanza un tamaño límite de poro, tal que dificulta el paso de la solución de goma. Esto puede confirmarse por el hecho de que los revoques formados por granulometría de 7000rpm y la mezcla



MA1-20, presentaron mayor cantidad de goma Xanthana en su superficie que el resto de las mezclas.

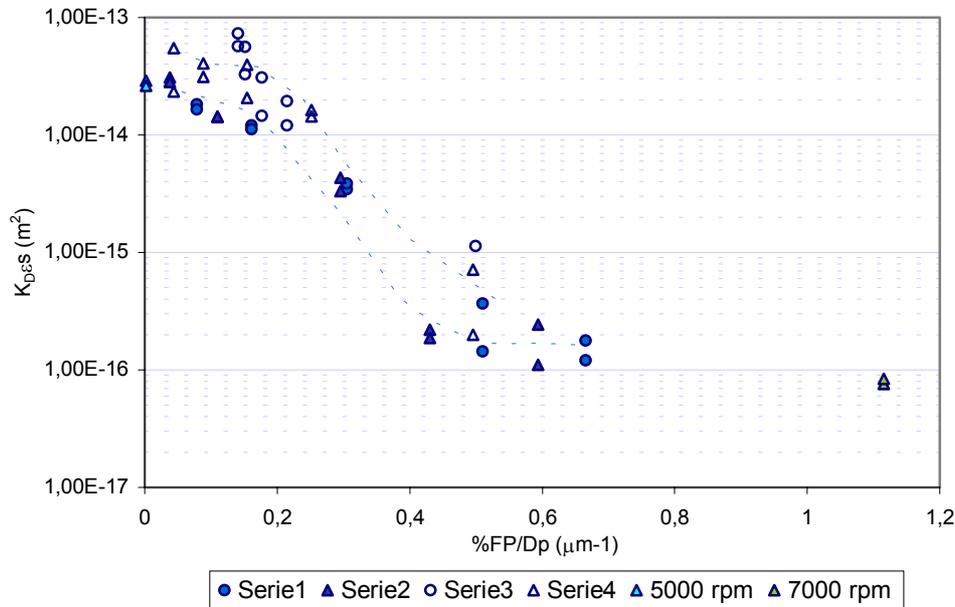
Cabe destacar que los valores de permeabilidad para granulometrías filtradas en discos de  $20\mu\text{m}$  son mayores que los obtenidos para filtraciones sobre discos de  $10\mu\text{m}$ ; esto se debe a que a mayor tamaño de poro se requieren partículas puenteantes de mayor tamaño, disponiéndose de tal manera que permiten el paso de partículas finas al filtrado, las cuales son necesarias para el mejor empaquetamiento del revoque. Al emplear discos de  $10\mu\text{m}$  la pérdida de dichas partículas es menor, obteniéndose así un revoque menos permeable.

Lo antes expuesto no ocurre para la granulometría de 5000rpm, ya que ésta debería tener mayor permeabilidad debido a que contiene menor cantidad de partículas formadoras de puente. Este comportamiento se explica por el hecho de que esta granulometría está compuesta por partículas más pequeñas que las mezclas cercanas a ellas (serie 2 y serie 4), lo que permite un mejor empaquetamiento de las partículas en el revoque (ver Análisis de datos. Figura 30).

En la figura 39 puede observarse que la variación de la permeabilidad cuando se emplea el %FP, es dependiente del medio filtrante empleado.

Por otro lado, empleando el parámetro partículas formadoras de puentes (%FP) dividido por el diámetro de poro del medio ( $D_p$ ) propuesto por Pérez y Meza; se elimina la dependencia antes

mencionada, tal como se observa en la figura 40, observándose sólo la dependencia de la granulometría empleada.



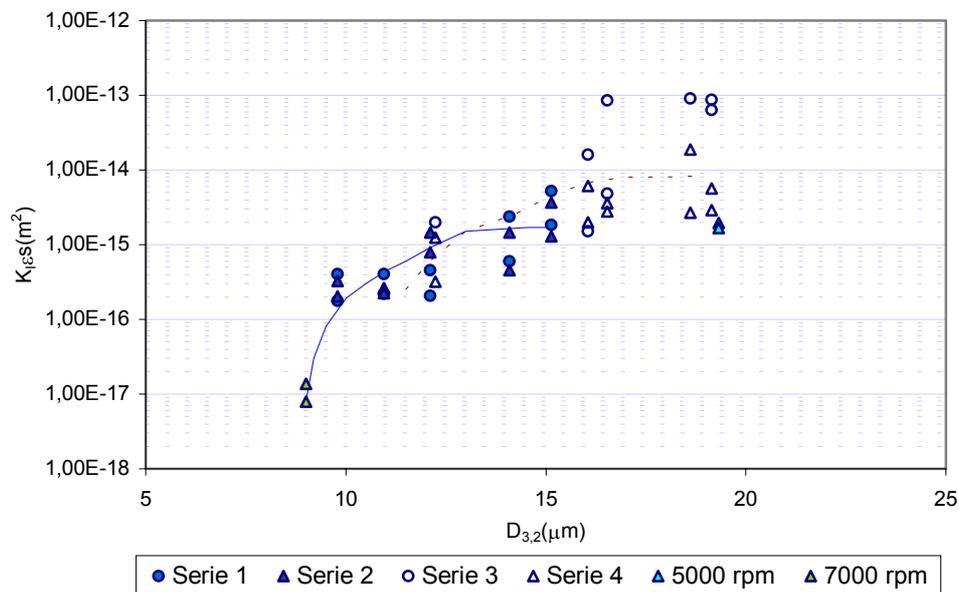
**FIGURA 40. Variación de la permeabilidad de la zona darcyana en función del parámetro %FP/Dp para las diferentes granulometrías.**

En la figura 40 puede observarse una reducción brusca del producto permeabilidad-solidosidad, ya que se pasa de una zona constante ( $\%Fp/Dp < 0,2 \mu m^{-1}$ ) encontrándose un valor de permeabilidad máxima, a otra zona donde permanece de nuevo constante ( $\%Fp/Dp > 0,7 \mu m^{-1}$ ) indicando un valor mínimo de permeabilidad, con una diferencia de tres órdenes de magnitud entre los extremos tal como ocurre en la figura 38.

Este parámetro a pesar de eliminar la independencia con el medio, al igual que el  $D_{3,2}$  representa un comportamiento similar, por tanto sólo se presenta este estudio para la zona darcyana.

#### 11.4 Permeabilidad Incipiente sobre discos porosos.

Esta zona fue evaluada de igual forma que la darcyana. Al representar el producto permeabilidad incipiente-solidosidad ( $K_{iE_s}$ ) respecto al  $D_{3,2}$  puede observarse que éste aumenta a medida que lo hace el parámetro independiente ( $D_{3,2}$ ), manteniendo la misma tendencia que la zona darcyana. Esto puede observarse en la figura 41. Al igual que la zona darcyana, la permeabilidad incipiente puede llegar a la tendencia constante en  $D_{3,2}$  igual a  $20 \mu\text{m}$  para la fracción 20-25; a diferencia de la 40-45 ya que se tiene una diferencia de dos órdenes de magnitud cercana a este tamaño ( $20 \mu\text{m}$ )(línea de tendencia roja).



**FIGURA 41. Variación de la permeabilidad de la zona incipiente en función del parámetro  $D_{3,2}$  para las diferentes granulometrías.**

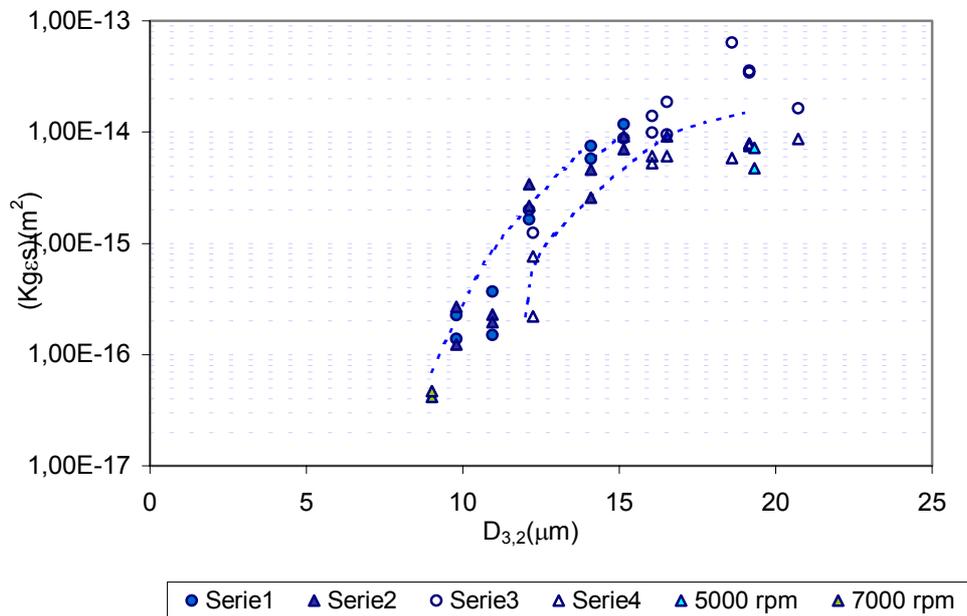


Puede observarse mayor dispersión en los resultados obtenidos para la zona incipiente en comparación con la darcyana aunque ambas se encuentran en el mismo orden de magnitud entre la filtración de granulometría con , mayor  $D_{3,2}$  y la de menor.

Como se dijo en la sección análisis de datos, en algunas filtraciones se obtuvieron valores de  $t_0$  y  $V_0$  muy pequeños lo cual no asegura que la zona incipiente se formara en tan corto tiempo. Como se estableció en el marco teórico; para determinar la permeabilidad de la zona incipiente del revoque, es importante tener valores precisos y confiables de  $t_0$  y  $V_0$ . Por tanto, se deben manejar con sumo cuidado estos resultados. (Ver Apéndice B)

### **11.5 Permeabilidad Global sobre discos porosos.**

Para el estudio de la permeabilidad global se toman en cuenta las zonas incipiente y darcyana estudiadas anteriormente, ya que juntas constituyen la globalidad del revoque formado. (SORRENTINO y otros.2000) Por lo tanto, si se estudia la variación del producto permeabilidad global-solidosidad ( $K_{G\&S}$ ) respecto al  $D_{3,2}$  (figura 42); éste producto aumenta a medida que el  $D_{3,2}$  se hace mayor.



**FIGURA 42. Variación de la permeabilidad de la zona global en función del parámetro  $D_{3,2}$  para las diferentes granulometrías.**

Los comportamientos antes expuestos son lógicos ya que las tendencias son iguales a las zonas que la conforman (darcyana e incipiente).

De la misma manera que en las zonas incipiente y darcyana, la menor permeabilidad obtenida fue para el revoque formado con granulometría de 7000rpm, por la mejor disposición de las partículas, además por haberlo obtenido del pseudo lodo de mayor cantidad de partículas formadoras de puente. Al igual que las zonas darcyana e incipiente, la permeabilidad global tiende a ser constante de  $D_{3,2}$  igual a 20  $\mu\text{m}$ , aunque con cierta dispersión en esa zona para las granulometrías de fracción 40-45, llevando a una diferencia en un orden aproximadamente de magnitud entre ellas. Notándose que esta diferencia en dicha zona viene dada por la que

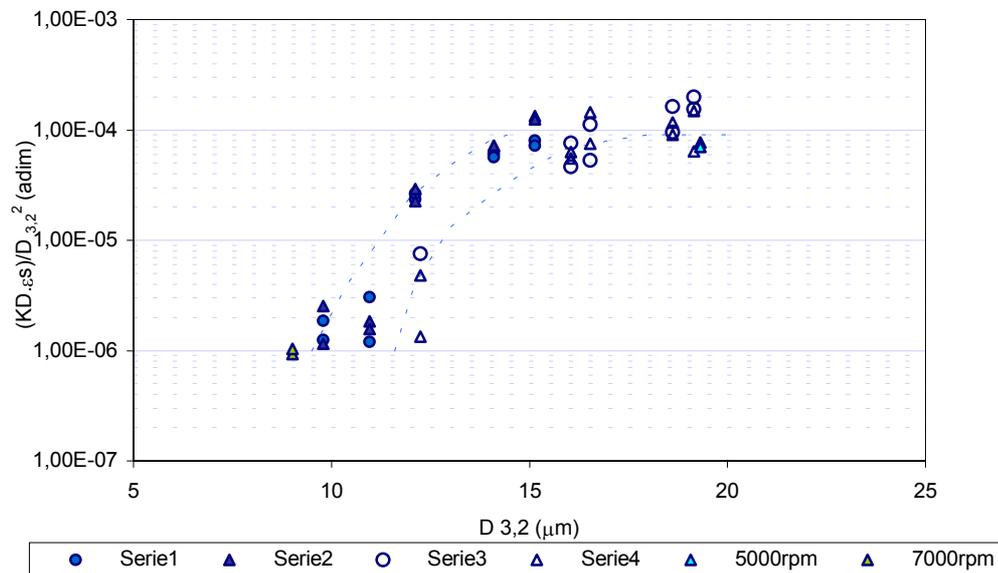


se obtuvo en la zona incipiente, tal como se dijo en la sección anterior.

### **11.6 Empleo del parámetro $K_{D\epsilon_s}/D_{3,2}^2$ .**

Otra forma de evaluar la independencia de los resultados con el medio poroso es estudiando la variación del producto permeabilidad darcyana-solidosidad ( $K_{D\epsilon_s}$ ) entre el  $(D_{3,2})^2$  como nuevo parámetro respecto al  $D_{3,2}$ , y así lograr unificar los mismos, para relacionarlos con el comportamiento que predicen Carman-Kozeny.

En la figura 43 puede observarse la unificación de los puntos representativos para cada medio de las diferentes granulometrías (20-25 y 40-45); resultando una tendencia de aumento del parámetro  $K_{D\epsilon_s}/D_{3,2}^2$  a medida que el  $D_{3,2}$  se hace mayor, mostrándose una diferencia de dos órdenes de magnitud en  $K_{D\epsilon_s}/D_{3,2}^2$  entre los extremos que conforman las granulometrías de menor y mayor  $D_{3,2}$ . De esta manera se logra establecer una semejanza con lo propuesto por Carman-Kozeny ya que existe una zona donde el parámetro  $K_{D\epsilon_s}/D_{3,2}^2$  tiende a permanecer constante indicando que para tamaños grandes de partículas la permeabilidad comienza a ser dependiente del cuadrado del tamaño del partícula ( $D_{3,2}$ ), tal como sugiere el modelo Carman-Kozeny.

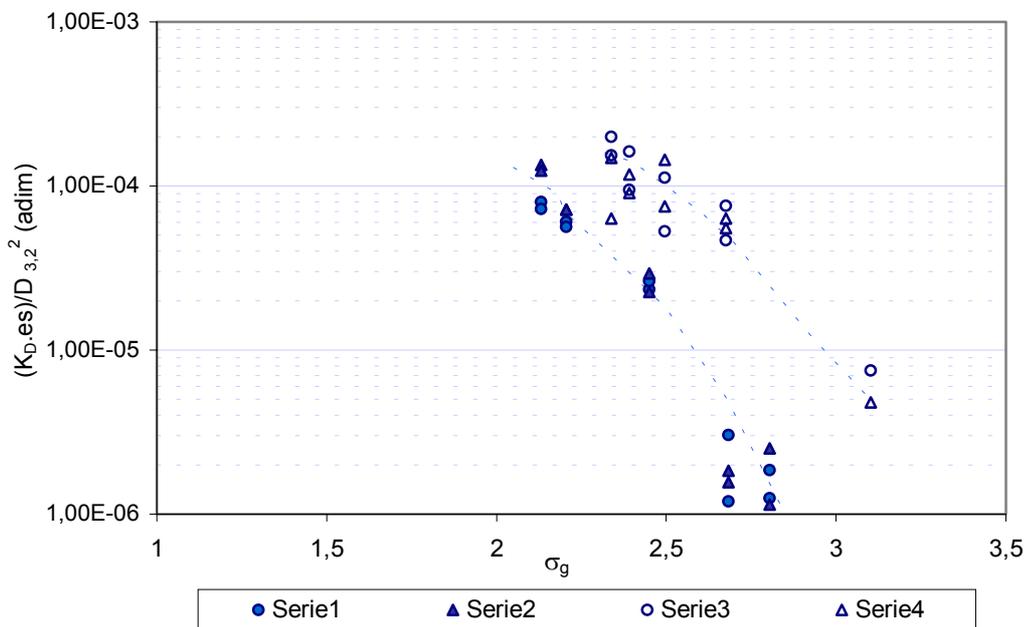


**FIGURA 43. Variación del parámetro  $(K_{D,\epsilon_s})/D_{3,2}^2$  en función del  $D_{3,2}$  para las diferentes granulometrías.**

El hecho de que las granulometrías 20-25 no presenten con claridad la zona en la cual el parámetro  $(K_{D,\epsilon_s})/D_{3,2}^2$  tiende a permanecer constante, tal como se observa para las de 40-45, se debe a que ambas poseen distintos  $X_{50}$  (mediana)(ver figura 30), por lo que se necesitan granulometrías 20-25 de mayor tamaño de partícula ( $D_{3,2}$ ) para lograr con más claridad dicha tendencia; además, cada granulometría presenta una desviación estándar geométrica diferente ( $\sigma_g$ ), tal como se acotó en la sección 11.3. En la figura 44 pueden apreciarse dichas desviaciones, observándose que para ambas granulometrías con  $\sigma_g$  similares presentan  $(K_{D,\epsilon_s})/D_{3,2}^2$  diferentes, lo cual puede deberse a que a pesar de que las granulometrías 40-45 de mayor desviación estándar geométrica contienen mayor cantidad de finos como para presentar un valor de bajo de permeabilidad, no contienen la cantidad suficiente

como para obtener tamaños de poros pequeños tales que atrapen la goma de la misma forma que lo hacen las granulometrías 20-25.

Cuando se emplea el parámetro  $(K_D \cdot \epsilon_s) / D_{3,2}^2$  en función de la  $\sigma_g$  en otras granulometrías tales como 10-15 y 30-35  $\mu\text{m}$ , las curvas no se presentan segregadas; es decir, se unifican según el tipo de granulometría empleada.



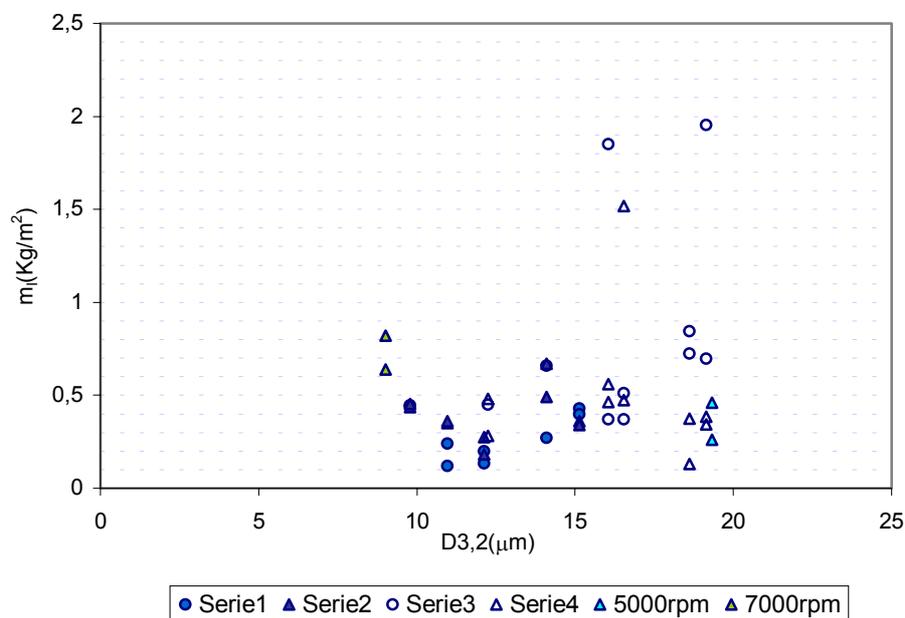
**FIGURA 44. Variación del parámetro  $(K_D \cdot \epsilon_s) / D_{3,2}^2$  en función de la desviación estándar geométrica ( $\sigma_g$ ) para las diferentes granulometrías.**

### 11.7 Masa Invasora

Una manera de cuantificar la invasión de los sólidos al yacimiento es empleando el parámetro “masa invasora” ( $M_i$ ), la cual no es más la sumatoria de la masa que invade el disco y la masa de carbonato que pasa al filtrado. Se empleó la masa invasora por

unidad de área ( $m_I$ ) como variable que logra independizar esta masa ( $M_I$ ) del área de filtrado<sup>(Pérez-Meza.2001)</sup>

Al representar  $m_I$  en función del  $D_{3,2}$  (figura 45) puede observarse una gran dispersión en los resultados obtenidos, lo cual no permitió establecer una tendencia definida en la variación de la masa invasora a medida que se emplean granulometrías con mayor  $D_{3,2}$ .

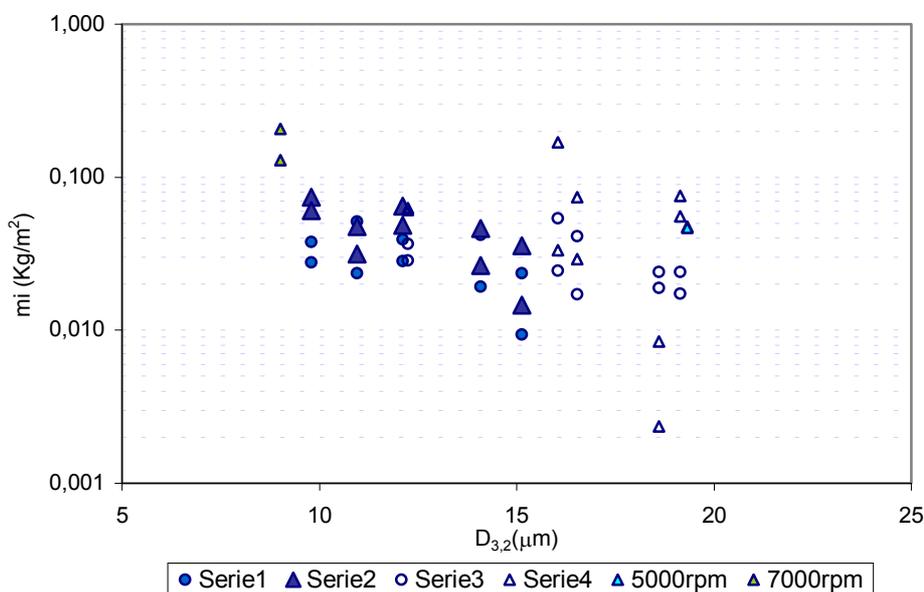


**FIGURA 45. Variación de la masa invasora en función del  $D_{3,2}$  para las diferentes granulometrías.**

Esto puede deberse a errores de aproximación ya que para el cálculo de los sólidos totales empleados en la filtración se tomó una pérdida de lodo de un 1,5%, éstos se pierden en trasvaso a la celda de filtrado. Si se observa el balance de masa presente en el apéndice C, la masa invasora depende de la masa del revoque, la cual puede presentar errores de apreciación y de medición ya que

las balanzas empleadas son altamente sensibles a cualquier efecto externo.

Por la gran dispersión de los resultados obtenidos para  $m_I$ , se decidió representar la variación de la masa que invade al disco solamente, es decir,  $\Delta M_{DP}$  en función del  $D_{3,2}$  (figura 46); en la cual puede observarse una tendencia de que a medida que se emplean granulometrías con mayor  $D_{3,2}$ , la masa que queda atrapada en el disco disminuye. Recordando la relación que tiene el  $D_{3,2}$  respecto al %FP (ver figura 37) puede decirse que para granulometrías con mayor porcentaje de partículas formadoras de puente las cuales contienen mayor cantidad de partículas finas, invaden al disco en mayor proporción.



**FIGURA 46. Variación de la masa atrapada en el disco en función del  $D_{3,2}$  para las diferentes granulometrías.**

## 12. CONCLUSIONES

- ❖ Los revoques formados con las bases comerciales de carbonato Intecarb 20-25 y 40-45 filtrados a presiones de 50, 100, 200, 300, 400 y 500 psi son compresibles, ya que presentan disminución en la permeabilidad cuando varía la presión ejercida.
- ❖ La permeabilidad de los revoques de ambas bases disminuye a medida que aumenta la presión ejercida sobre ellos en un rango de 50 a 400Psi, a diferencia cuando se trabaja con una presión de 500Psi, con la cual la permeabilidad aumenta.
- ❖ Si se trabaja a presiones menores de 29 Psi, el modelo de Tiller predice valores constantes de permeabilidad ( $K_{DES}$ ) al emplear la base 20-25 para la formulación del revoque, a diferencia del modelo de Lewis, el cual predice un crecimiento monótono.
- ❖ Los parámetros  $n$  y  $\delta$  obtenidos para las expresiones empíricas de Tiller y Lewis respectivamente, tienen valores que clasifican a los revoques formados con las bases comerciales de  $CaCO_3$  20-25 y 40-45 como compresibles para el rango de presión estudiado.
- ❖ La solidosidad de los revoques formados permanece constante a medida que aumenta el  $D_{3,2}$ .



- ❖ Es útil emplear el parámetro  $D_{3,2}$  para comparar las granulometrías 20-25 y 40-45 haciéndolas independientes del disco poroso empleado.
- ❖ Los parámetros  $K_{D\epsilon_s}$ ,  $K_{\epsilon_s}$ ,  $K_{G\epsilon_s}$ , obtenidos para los revoques formados sobre discos Fann de 10 y 20  $\mu\text{m}$  aumentan a medida que aumenta el  $D_{3,2}$  y tiende a permanecer constantes por encima de los 20 $\mu\text{m}$ , tal como lo observaron Pérez y Meza.
- ❖ El producto permeabilidad darcyana-solidosidad ( $K_{D\epsilon_s}$ ) disminuye a medida que aumenta el porcentaje de partículas formadoras de puente (%FP), hasta llegar a 20% donde tiende a ser constante.
- ❖ El parámetro %FP/ $D_p$ , a pesar de eliminar la independencia con el medio cumple función similar al  $D_{3,2}$  para el análisis de la variación de la permeabilidad.
- ❖ El parámetro  $K_{D\epsilon_s}/D_{3,2}^2$  logra establecer una semejanza con el modelo propuesto por Carman-Kozeny indicando que para tamaños grandes de partículas su teoría es válida, ya que existe un tamaño en el cual la permeabilidad del revoque comienza a ser dependiente del cuadrado del tamaño de partícula ( $D_{3,2}$ ).



- ❖ La masa atrapada en los discos aumenta a medida que se emplean granulometrías con mayor cantidad de partículas formadoras de puentes (%FP).



### **13. RECOMENDACIONES**

- ✓ Realizar estudios de compresibilidad a presiones entre 400 y 500Psi para determinar la presión a la cual existe el cambio de tendencia del parámetro  $K_{D\epsilon_s}$ .
- ✓ Desarrollar una metodología de cálculo para el análisis de la curva de filtrado sobre discos porosos, que tome en cuenta la existencia de sólidos dentro del medio poroso y en el filtrado.
- ✓ Precisar el estudio de la existencia de la zona incipiente en la formación de los revoques sobre discos porosos.
- ✓ Realizar pruebas de filtración de granulometría 20-25 con  $D_{3,2}$  mayores a los empleados en esta investigación, para así lograr obtener resultados de permeabilidad que indiquen la independencia del tamaño de partícula.
- ✓ Evaluar el comportamiento reológico de la goma Xanthana en la formación de los revoques.
- ✓ Realizar estudios de microscopía que permitan asegurar la presencia de goma y/o carbonato de calcio dentro del disco.
- ✓ Para las mismas granulometrías estudiadas en esta investigación se recomienda realizar filtraciones sobre discos nuevos y así obtener de manera certera la pérdida de permeabilidad de los medios porosos.



- ✓ Verificar que el volumen final de filtrado reportado por la balanza concuerde con el registrado por el BalanceLink.
  
- ✓ Asegurar que antes de permear el medio sucio, éste se encuentre libre de sólidos en la superficie y así obtener la verdadera resistencia del mismo.

## 14. BIBLIOGRAFÍA

1. MI. Drilling Fluids Co. "Drilling fluid Engineering Manual". Magcobar/IMCO, Houston, 1991.
2. SALAS, Guillermo José. "Petróleo". Ediciones Petroleras Fovines N°1. Quinta Edición. 1980.
3. GRAY, George R. "Composition and properties of drilling and completion fluids." Gulf Publishing Company. Houston, 1998.
4. DRILLING practices manual. Second Edition. Preston L. More. Pennwell Books. Tulsa, Oklahoma. USA.
5. AS; Guillermo José. "Petróleo". Curso de perforación. Volumen 1.
6. SEHEULT, J. "Recent Advances in Biopolymer Technology Improve Fluid Functionally in Drilling, Workover, and Completion Operations".
7. BIRD, Byron. "Fenómenos de transporte". Nueva York. Editorial Reverté, SA 1982.
8. BAROID. "Manual of Drilling Fluids Technology" Volume I. Section III. 1974.
9. ROCCARO, Vicenta. "Filtración de lodo rojo." Trabajo Especial de Ascenso a Profesor Titular. UCV. 1997.
10. SVAROSKY, Ladislav. "Sólid-Liquid Separation". Scholl of Powder Technology University of Bradford. 1990.
11. SORRENTINO, José. "Estudio de la formación de revoques de fluidos de perforación con sólidos de distintas granulometrías". Laboratorio de Separaciones Mecánicas. Universidad Central de Venezuela, Caracas. 1998.



12. RUSHTON; Ward y Holdich. "Solid- Liquid. Filtration and Separation Technology" Editorial VCH, Primera Edición, Alemania. 1996.
13. MARANO y RIVAS. "Efecto del tipo de distribución de tamaños de partículas en la relación entre dispersión y permeabilidad". Trabajo especial de grado. UCV. Caracas, 1999.
14. BAIJAL, S.K. "Flow behavior of polymers in porous media". Pemmwell. Publishiney Company. Tulsa, Oklahoma. USA. 1982.
15. LEZAMA, PESSOLANO, SORRENTINO y VALENTINO. "Introducción del concepto de la doble permeabilidad en la caracterización del revoque". III Jornadas de Investigación Básica Orientada. Caracas, 2000.
16. ABRAMS, A. "Mud Design to minimize rock impairment due to particle invasion" Journal of Petroleum Technology. Vol 29 N° 4-6, 1997
17. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. "Recommended Practice Standard Procedure for Fields Testing Oil-Based Drilling Fluids (RP13B-2) "Second Edition Washington. D.C. 1991.
18. LAPREA, Marcelo. "Programa de Actualización en ingeniería de Yacimientos" CEPET. Anaco 1992. 440p.
19. GUÍAS de Pozos II." Ingeniería de Rehabilitación de Pozos". UCV.
20. NOLDES, Michael Kenneth. " Reservoir Stimulation." Chapter I, Second Edition.



21. RODEES; Martin. "Introduction to Particle Technology". Editorial John Wiley & Sons Ltd. Inglaterra. 1998.
22. HERNÁNDEZ, Anahís y HERNÁNDEZ, Jorge. "Efecto de la fracción de finos en revoques formados a partir de Carbonato Intecarb 20-25 e Intecarb 40-45. Trabajo Especial de Grado. UCV. 2001.
23. SILVA, Castillo Silvia. "Caracterización de revoques formados utilizando mezclas monomodales amplias." Trabajo Especial de Grado. UCV. 2001.
24. MEZA, Alejandra y PÉREZ, Narciso. "Formación de revoques sobre discos porosos utilizando mezclas amplias". Trabajo Especial de Grado. UCV. 2001.



**APÉNDICE A:**  
**DATOS DE FILTRACIÓN**

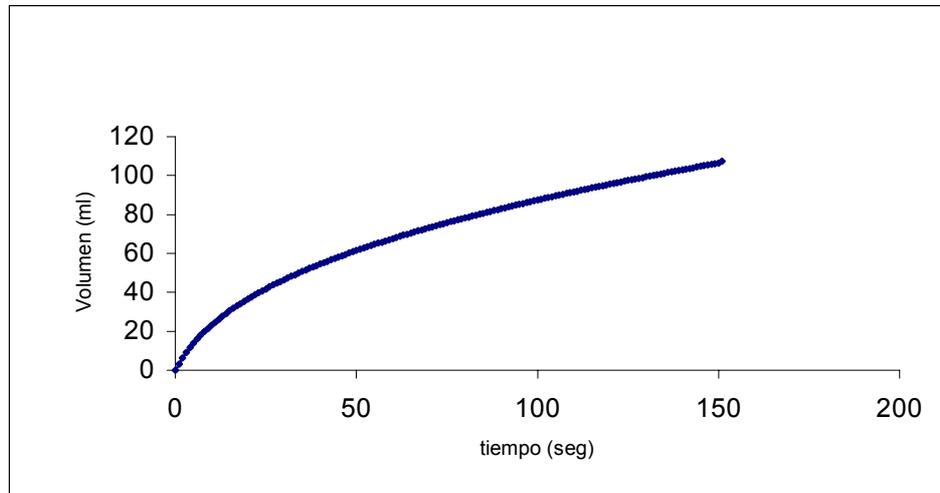
**Tabla A.1. Volúmenes y tiempos de filtración sobre discos porosos, obtenidos para cada serie.**

		Filtraciones	Vf(cm <sup>3</sup> )	t(seg)	Desv. Est Vf	Desv. Est t	
SERIE 1	MA1-10	1	107,42	151	0,47	16,97	
		2	108,08	127			
	MA2-10	1	110,99	105	0,51	29,70	
		2	111,71	147			
	A-10	1	115,03	46	4,35	7,07	
		2	108,88	36			
	MA3-10	1	105,41	17	2,77	0,00	
		2	109,33	17			
	MA4-10	1	107,96	12	0,36	1,41	
		2	107,45	10			
	SERIE 2	MA1-20	1	107,5	125	5,21	26,16
			2	114,87	162		
MA2-20		1	110,36	73	0,00	0,00	
		2	110,36	73			
A-20		1	107	28	0,25	4,24	
		2	107,35	22			
MA3-20		1	100,01	16	1,41	1,41	
		2	102,01	14			
MA4-20		1	98,46	15	8,23	1,41	
		2	110,10	13			
SERIE 3		MB1-10	1	112,31	154	0,191	75,66
			2	112,04	261		
	MB2-10	1	113,79	21	3,34	4,95	
		2	109,06	28			
	B-10	1	102,09	15	2,98	3,54	
		2	106,3	10			
	MB3-10	1	106,24	12	7,64	0,71	
		2	95,44	11			
	MB4-10	1	116,92	7	1,36	0,71	
		2	115	8			
	SERIE 4	MB1-20	1	106,70	290	2,86	27,58
			2	110,75	329		
MB2-20		1	105,48	54	1,05	8,49	
		2	106,96	66			
B-20		1	103,69	49	0,50	11,31	
		2	102,99	33			

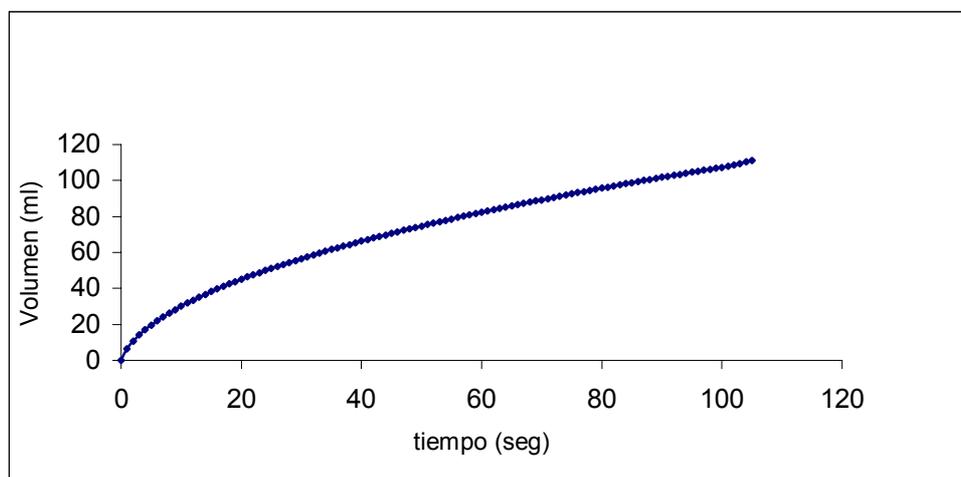


**Tabla A.1 Volúmenes y tiempos de filtración sobre discos porosos, obtenidos para cada serie (cont.).**

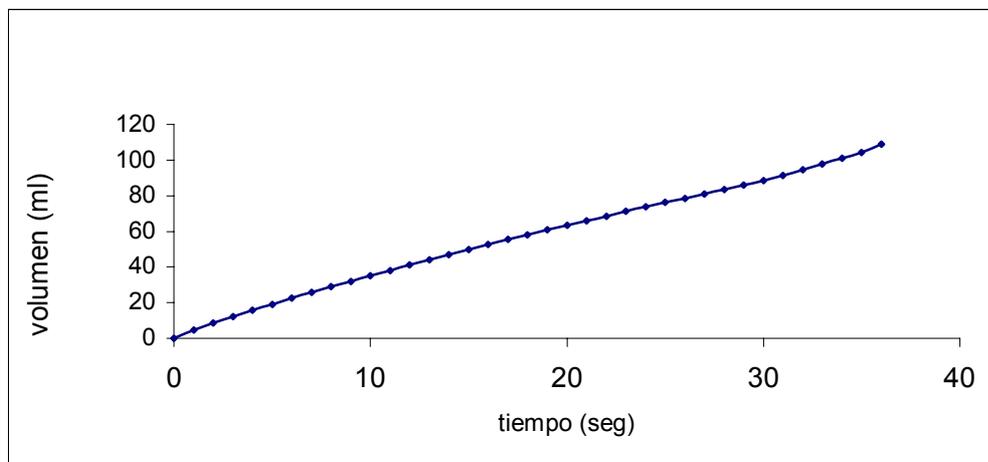
		Filtraciones	Vf(cm <sup>3</sup> )	t(seg)	Desv. Est Vf	Desv. Est t
SERIE 4	<b>MB3-20</b>	1	102,95	51	1,83	9,19
		2	105,54	38		
	<b>MB4-20</b>	1	105,71	46	1,92	3,54
		2	102,99	41		
	<b>5000 rpm</b>	1	106,05	14	2,55	1,41
		2	102,45	16		
	7000 rpm	1	102,78	35	0,94	4,24
		2	101,45	41		



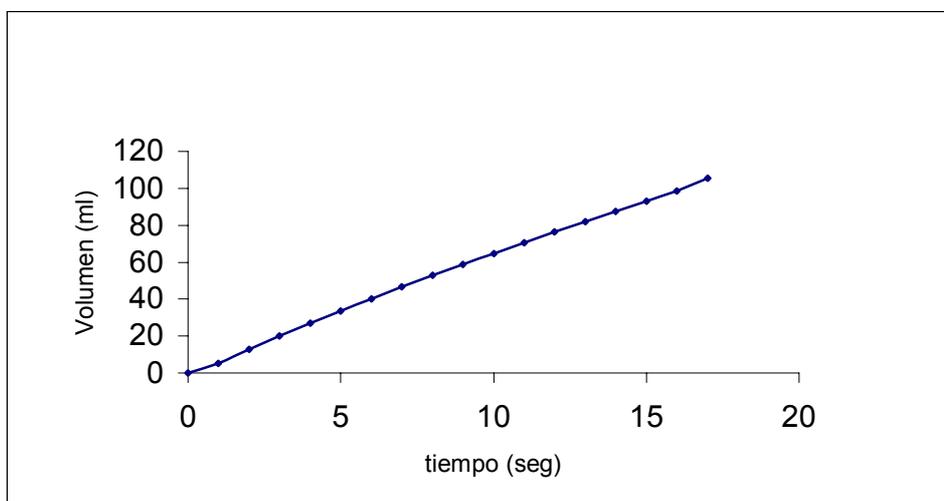
**FIGURA A.1. Curva de filtrado mezcla MA1-10.**



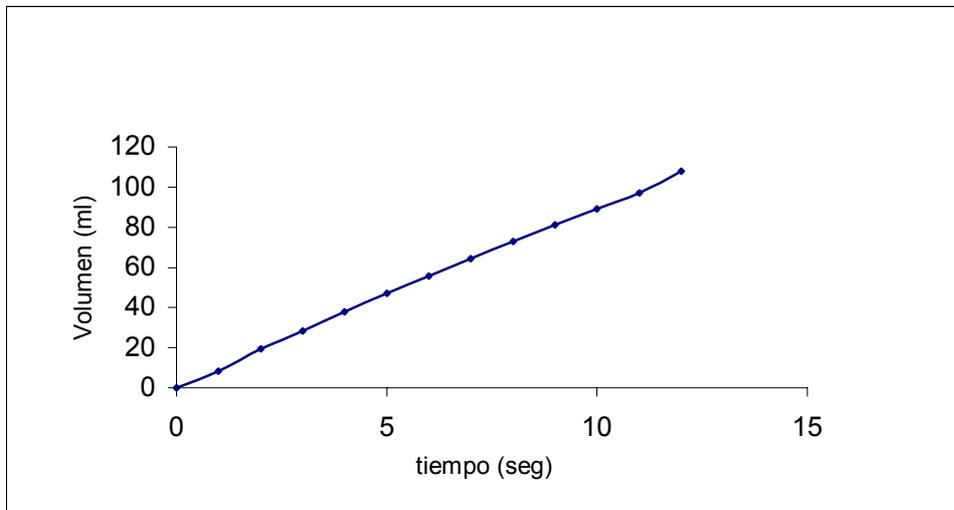
**FIGURA A.2. Curva de filtrado mezcla MA2-10.**



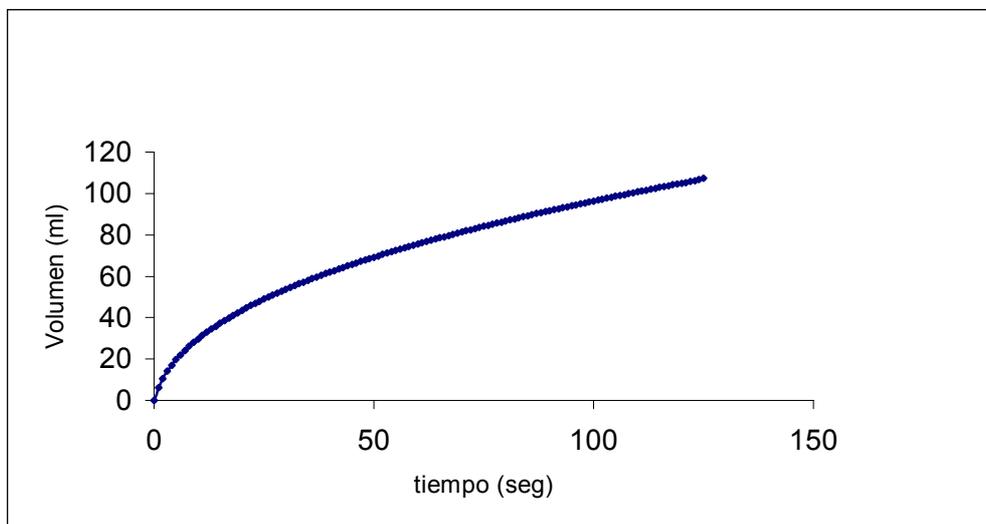
**FIGURA A.3. Curva de filtrado A-10.**



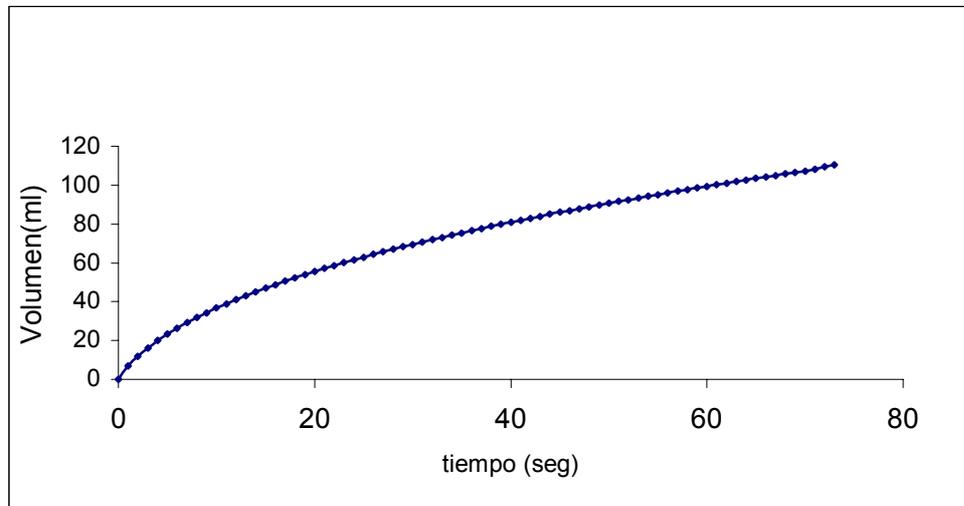
**FIGURA A.4. Curva de filtrado mezcla MA3-10.**



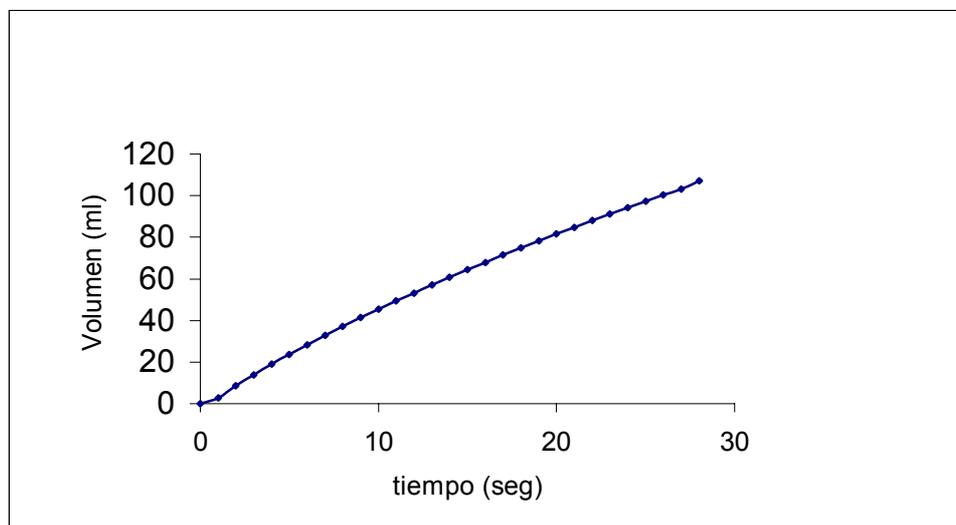
**FIGURA A.5. Curva de filtrado MEZCLA MA4-10.**



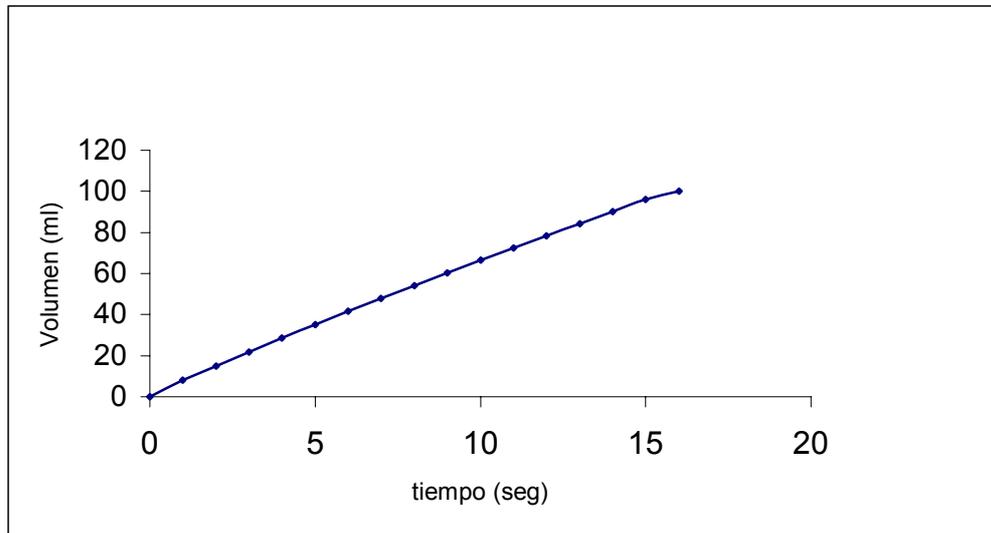
**FIGURA A.6. Curva de filtrado mezcla MA1-20.**



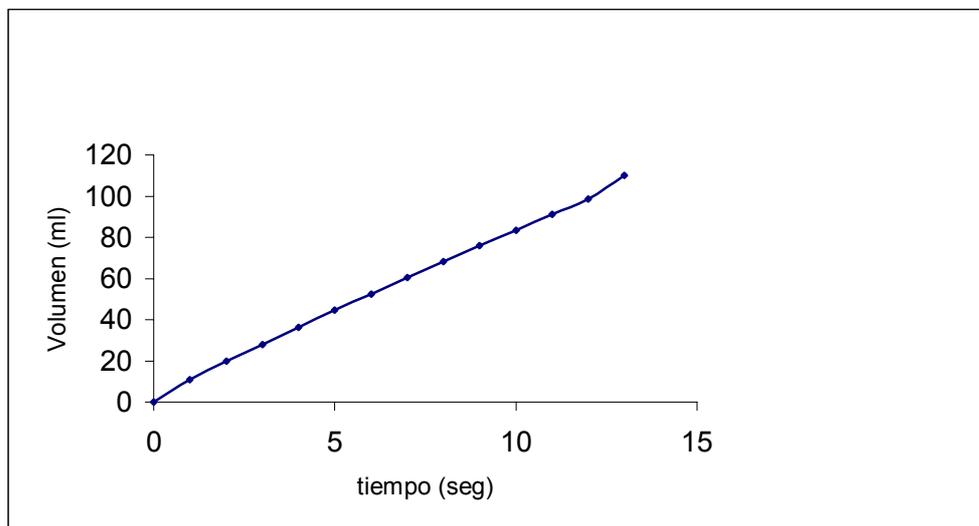
**FIGURA A.7. Curva de filtrado mezcla MA2-20.**



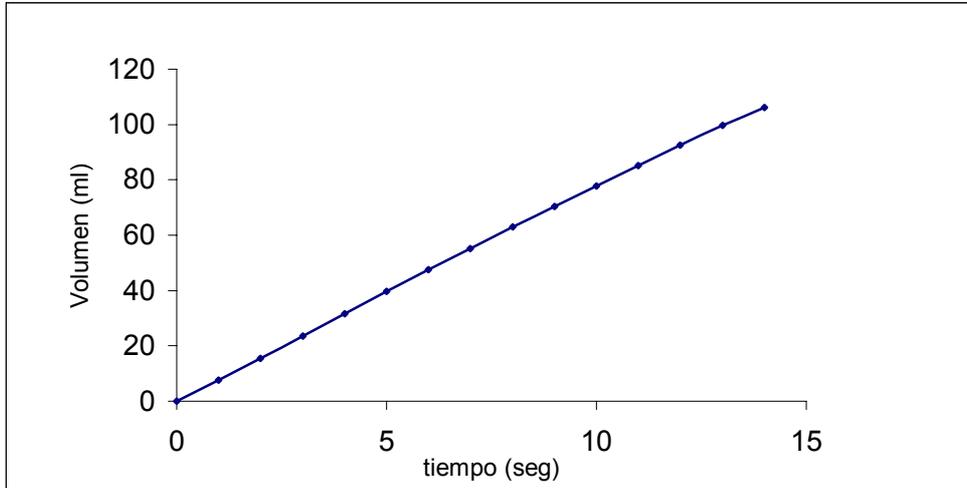
**FIGURA A.8. Curva de filtrado A-20.**



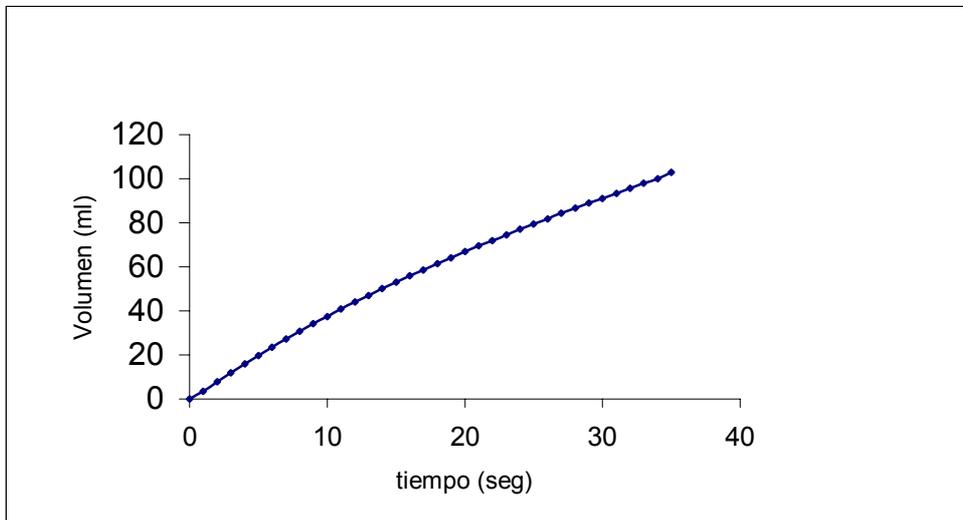
**FIGURA A.9. Curva de filtrado mezcla MA3-20.**



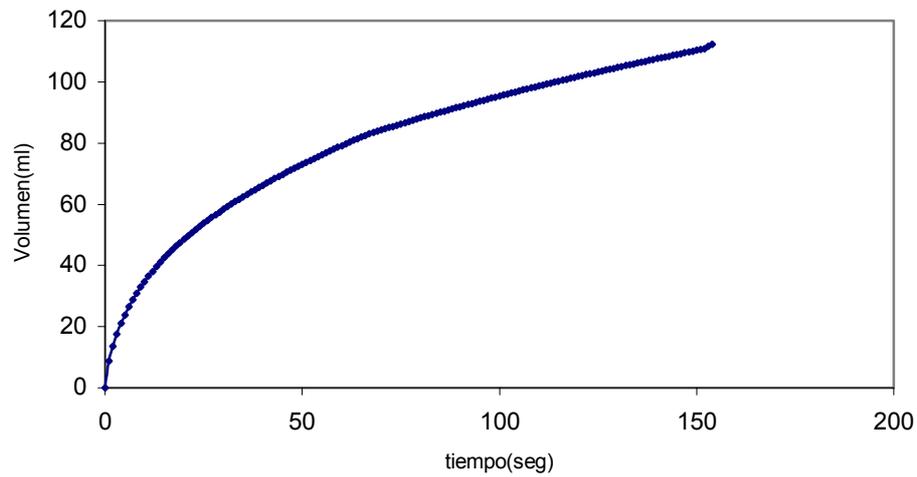
**FIGURA A.10. Curva de filtrado mezcla MA4-20.**



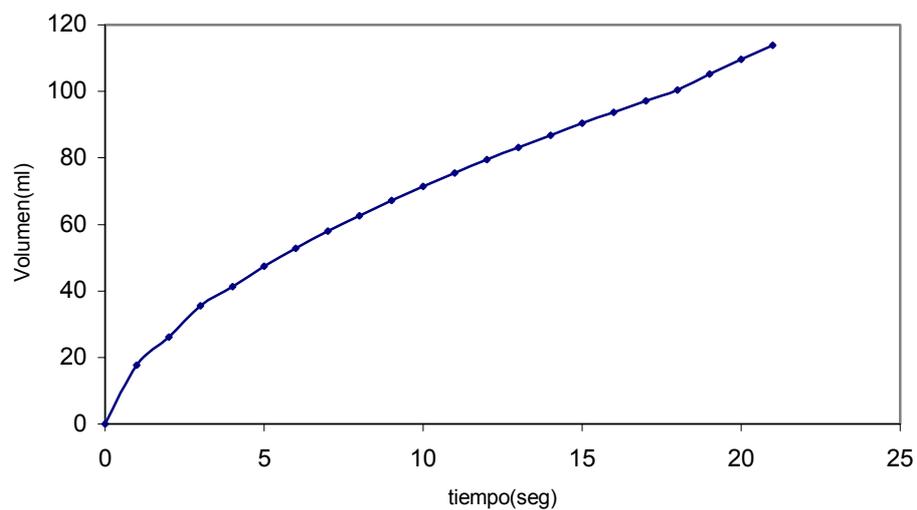
**FIGURA A.11. Curva de filtrado 5000 rpm.**



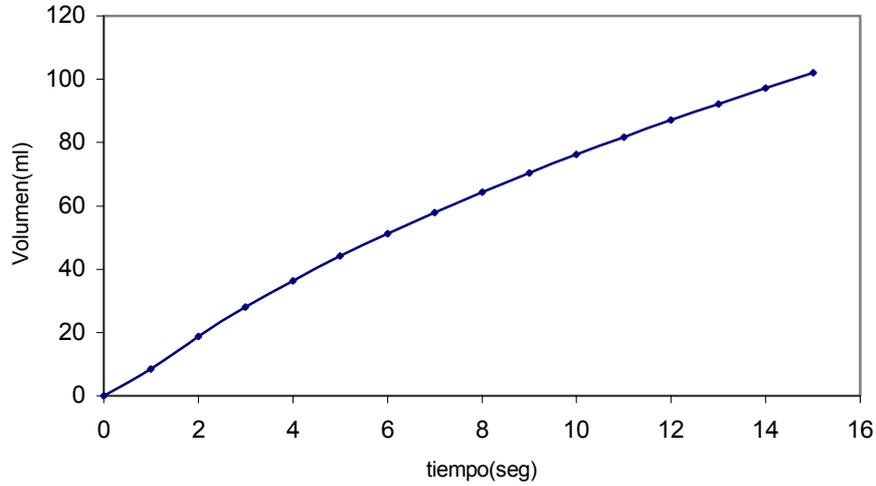
**FIGURA A.12. Curva de filtrado 7000 rpm.**



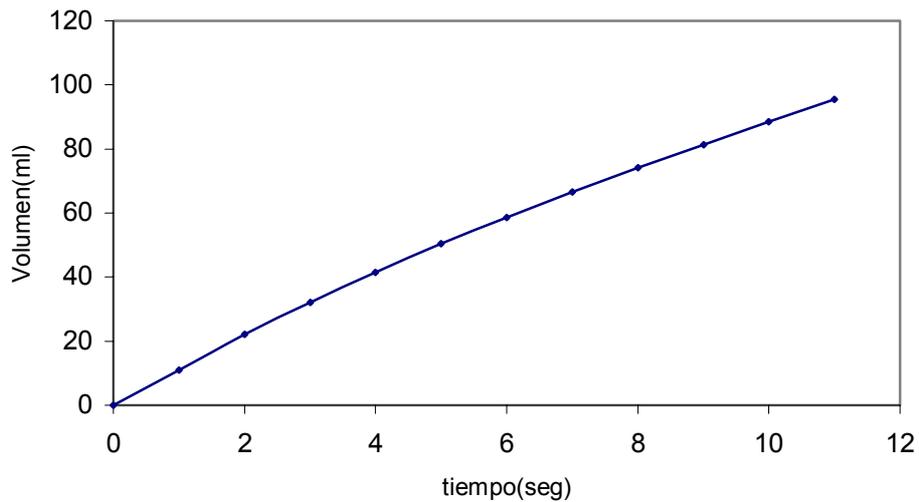
**FIGURA A.13. Curva de filtrado mezcla MB1-10.**



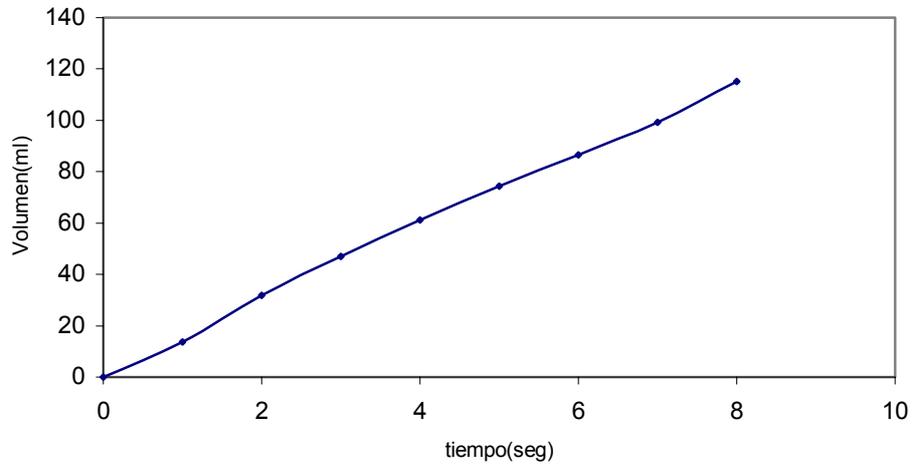
**FIGURA A.14. Curva de filtrado mezcla MB2-10.**



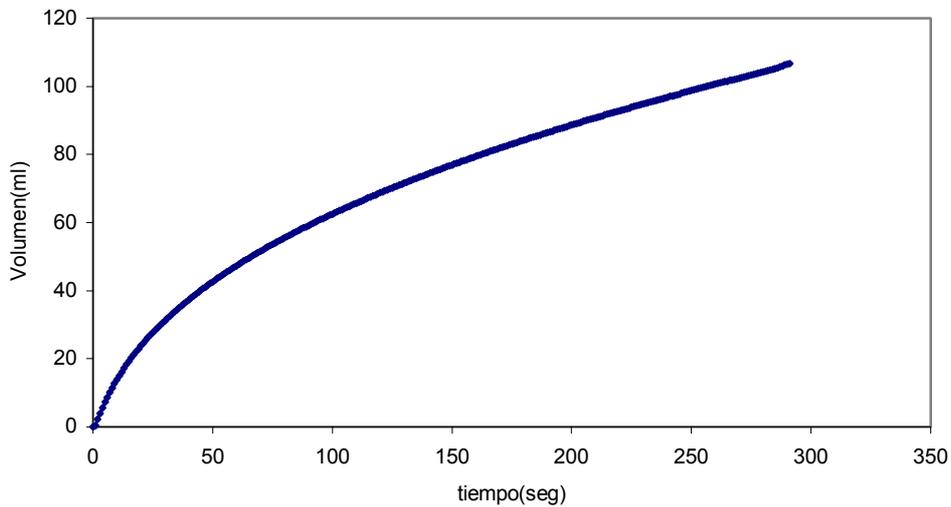
**FIGURA A.15. Curva de filtrado B-10.**



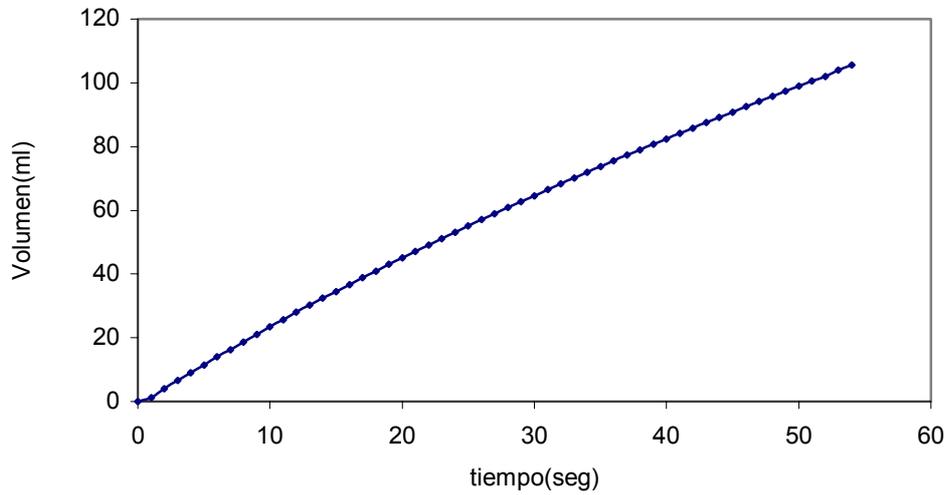
**FIGURA A.16. Curva de filtrado mezcla MB3-10.**



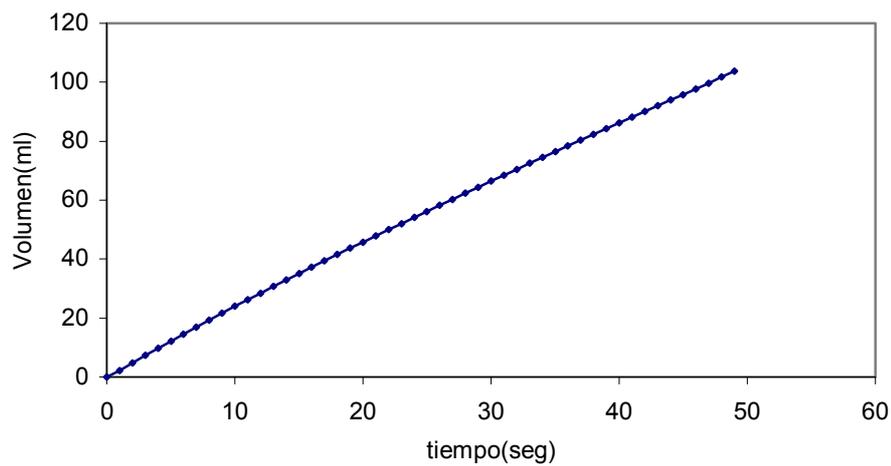
**FIGURA A.17. Curva de filtrado mezcla MB4-10.**



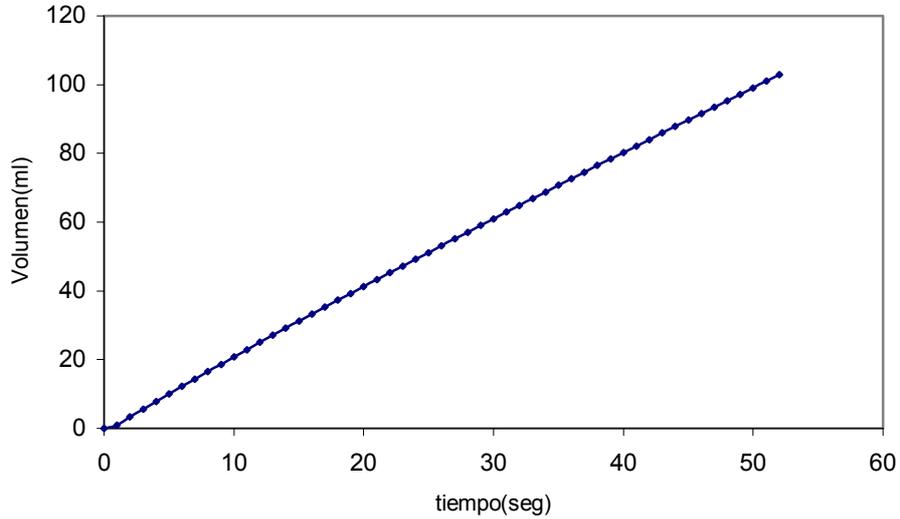
**FIGURA A.18. Curva de filtrado mezcla MB1-20.**



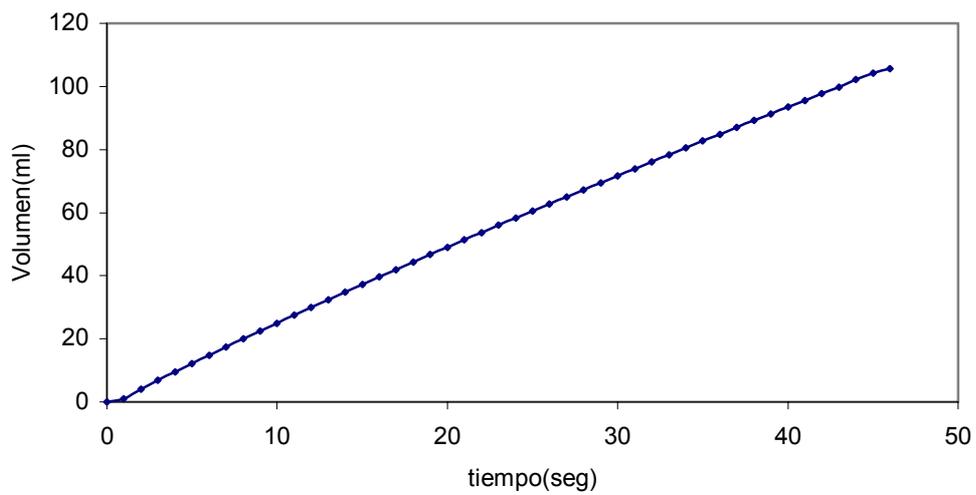
**FIGURA A.19. Curva de filtrado mezcla MB2-20.**



**FIGURA A.20. Curva de filtrado B-20.**



**FIGURA A.21. Curva de filtrado mezcla MB3-20.**



**FIGURA A.22. Curva de filtrado mezcla MB4-20.**



**APÉNDICE B:**  
**RESUMEN DE RESULTADOS**

Los resultados obtenidos para la caracterización de los revoques se presentan a continuación.

**Tabla B.1. Resultados generales e intermedios, Base A.**

	A-10	Filtración 1	Filtración 2	A-20	Filtración 1	Filtración 2
% FP		3,33	3,33		6,92	6,92
D 3,2		12,118	12,118		12,118	12,118
to(seg)		1	1		2	1
Vo(cm <sup>3</sup> )		6,71	4,63		8,57	3,15
Vf(cm <sup>3</sup> )		115,03	108,88		107	107,35
V'(cm <sup>3</sup> )		108,32	104,25		98,43	104,2
a'(seg/cm <sup>6</sup> )		0,00090	0,00090		0,0008	0,0008
b'(seg/cm <sup>3</sup> )		0,3155	0,2683		0,1861	0,1239
Rm limp(cm <sup>-1</sup> )		8,59E+08	8,29E+08		1,06E+09	1,03E+09
Rm suc(cm <sup>-1</sup> )		1,82E+09	9,04E+08		1,52E+09	1,04E+09
% var R		111,9	9,0		43,8	0,5
ug(Pa*seg)		0,0023	0,0026		0,0020	0,0026
Rci(cm <sup>-1</sup> )		6,18E+09	5,17E+09		3,86E+09	1,72E+09
Rcd(cm <sup>-1</sup> )		4,95E+09	4,25E+09		4,55E+09	3,71E+09
Rcg(cm <sup>-1</sup> )		1,11E+10	9,42E+09		8,41E+09	5,43E+09
%Rci		55,6	54,9		45,9	31,7
%Rcd		44,4	45,1		54,1	68,3
mcd(gr/cm <sup>2</sup> )		0,4607	0,4457		0,4229	0,4466
mci(gr/cm <sup>2</sup> )		0,0348	0,0633		0,0846	0,0704
%mcd		93,0	87,6		83,3	86,4
%mci		7,0	12,4		16,7	13,6
αci(cm/gr)		1,78E+11	8,17E+10		4,56E+10	2,45E+10
αcd(cm/gr)		1,07E+10	9,53E+09		1,08E+10	8,31E+09
αcg (cm/gr)		2,25E+10	1,85E+10		1,66E+10	1,05E+10
εs(adim)		0,655	0,592		0,538	0,560
(Kεs)g(cm <sup>2</sup> )		1,64E-11	1,99E-11		2,1551E-11	3,3976E-11
(Kεs)d(cm <sup>2</sup> )		3,44E-11	3,87E-11		3,318E-11	4,2961E-11
(Kεs)i(cm <sup>2</sup> )		2,08E-12	4,51E-12		7,8312E-12	1,4598E-11

**Tabla B.2. Resultados generales e intermedios mezcla MA1.**

	MA1-10	Filtración 1	Filtración 2	MA1-20	Filtración 1	Filtración 2
% FP		7,66	7,66		11,87	11,87
D 3,2		9,79	9,79		9,79	9,79
to(seg)		24	18		5	21
Vo(cm <sup>3</sup> )		40,84	36,13		19,72	42,39
Vf(cm <sup>3</sup> )		107,42	108,08		107,5	114,87
V'(cm <sup>3</sup> )		66,58	71,95		87,78	72,48
a'(seg/cm <sup>6</sup> )		0,0144	0,0136		0,0114	0,014
b'(seg/cm <sup>3</sup> )		0,9657	0,5549		0,357	0,9333
Rm limp(cm <sup>-1</sup> )		9,20E+08	8,01E+08		7,85E+08	9,10E+08
Rm suc(cm <sup>-1</sup> )		9,66E+08	8,16E+08		9,98E+08	1,27E+09
% var R		5,0	1,9		27,1	39,7
ug(Pa*seg)		0,0013	0,0019		0,0010	0,0026
Rci(cm <sup>-1</sup> )		4,16E+10	1,65E+10		2,07E+10	1,98E+10
Rcd(cm <sup>-1</sup> )		8,45E+10	6,12E+10		1,22E+11	4,58E+10
Rcg(cm <sup>-1</sup> )		1,26E+11	7,78E+10		1,42E+11	6,56E+10
%Rci		33,0	21,3		14,5	30,2
%Rcd		67,0	78,7		85,5	69,8
mcd(gr/cm <sup>2</sup> )		0,2843	0,3057		0,3742	0,3099
mci(gr/cm <sup>2</sup> )		0,2062	0,1855		0,1173	0,1800
%mcd		58,0	62,2		76,1	63,3
%mci		42,0	37,8		23,9	36,7
αci(cm/gr)		2,02E+11	8,92E+10		1,77E+11	1,10E+11
αcd(cm/gr)		2,97E+11	2,00E+11		3,25E+11	1,48E+11
αcg(cm/gr)		2,57E+11	1,58E+11		2,90E+11	1,34E+11
εs(adim)		0,597	0,658		0,616	0,585
(Kεs)g(cm <sup>2</sup> )		1,3902E-12	2,256E-12		1,2323E-12	2,6673E-12
(Kεs)d(cm <sup>2</sup> )		1,2024E-12	1,7834E-12		1,0978E-12	2,4163E-12
(Kεs)j(cm <sup>2</sup> )		1,7718E-12	4,005E-12		2,0225E-12	3,2481E-12

**Tabla B.3. Resultados generales e intermedios, mezcla MA2.**

	MA2-10	Filtración 1	Filtración 2	MA2-20	Filtración 1	Filtración 2
%FP		5,1	5,1		8,6	8,6
D 3,2		10,956	10,956		10,956	10,956
to(seg)		1	1		3	5
Vo(cm <sup>3</sup> )		6,54	5,82		16,24	23,31
Vf(cm <sup>3</sup> )		110,99	111,71		110,36	110,36
V'(cm <sup>3</sup> )		104,45	105,89		94,12	87,05
a'(seg/cm <sup>6</sup> )		0,00770	0,01040		0,0055	0,0056
b'(seg/cm <sup>3</sup> )		0,1977	0,2967		0,2243	0,2886
Rm limp(cm <sup>-1</sup> )		8,64E+08	5,07E+08		1,12E+09	8,51E+08
Rm suc(cm <sup>-1</sup> )		9,43E+08	6,49E+08		1,32E+09	1,14E+09
% var R		9,2	28,0		17,6	33,7
ug(Pa*seg)		0,0008	0,0029		0,0009	0,0008
Rci(cm <sup>-1</sup> )		1,27E+10	5,27E+09		1,29E+10	2,00E+10
Rcd(cm <sup>-1</sup> )		1,11E+11	4,40E+10		6,55E+10	7,12E+10
Rcg(cm <sup>-1</sup> )		1,24E+11	4,93E+10		7,84E+10	9,12E+10
%Rci		10,3	10,7		16,4	21,9
%Rcd		89,7	89,3		83,6	78,1
mcd(gr/cm <sup>2</sup> )		0,4451	0,4511		0,4053	0,3747
mci(gr/cm <sup>2</sup> )		0,0784	0,0603		0,0947	0,1241
%mcd		85,0	88,2		81,1	75,1
%mci		15,0	11,8		18,9	24,9
αci(cm/gr)		1,63E+11	8,75E+10		1,36E+11	1,61E+11
αcd(cm/gr)		2,50E+11	9,75E+10		1,62E+11	1,90E+11
αcg(cm/gr)		2,37E+11	9,63E+10		1,57E+11	1,83E+11
εs(adim)		0,623	0,626		0,519	0,522
(Kεs)g(cm <sup>2</sup> )		1,51E-12	3,71E-12		2,2773E-12	1,9534E-12
(Kεs)d(cm <sup>2</sup> )		1,43E-12	3,66E-12		2,2089E-12	1,8784E-12
(Kεs)i(cm <sup>2</sup> )		2,20E-12	4,08E-12		2,6253E-12	2,2213E-12

**Tabla B.4. Resultados generales e intermedios, mezcla MA3.**

	MA3-10	Filtración 1	Filtración 2	MA3-20	Filtración 1	Filtración 2
%FP		1,61	1,61		2,19	2,19
D 3,2		14,094	14,094		14,094	14,094
to(seg)		1	1		2	1
Vo(cm <sup>3</sup> )		5,09	6,69		14,88	7,91
Vf(cm <sup>3</sup> )		105,41	109,33		100,01	102,01
V'(cm <sup>3</sup> )		100,32	102,64		85,13	94,1
a'(seg/cm <sup>6</sup> )		0,0003	0,0004		0,00020	0,00010
b'(seg/cm <sup>3</sup> )		0,1293	0,1157		0,1438	0,1254
Rm limp(cm <sup>-1</sup> )		9,47E+08	4,34E+08		9,77E+08	1,02E+09
Rm suc(cm <sup>-1</sup> )		1,67E+09	4,89E+08		1,09E+09	1,17E+09
% var R		76,3	12,9		11,80	14,87
ug(Pa*seg)		0,0027	0,0033		0,00208108	0,00107325
Rci(cm <sup>-1</sup> )		1,18E+09	1,56E+09		2,95E+09	5,68E+09
Rcd(cm <sup>-1</sup> )		1,33E+09	1,46E+09		9,58E+08	1,03E+09
Rcg(cm <sup>-1</sup> )		2,51E+09	3,02E+09		3,91E+09	6,70E+09
%Rci		47,1	51,8		75,51	84,68
%Rcd		52,9	48,2		24,49	15,32
mcd(gr/cm <sup>2</sup> )		0,4319	0,4432		0,37	0,40
mci(gr/cm <sup>2</sup> )		0,0764	0,0256		0,12	0,07
%mcd		85,0	94,5		75,94	85,09
%mci		15,0	5,5		24,06	14,91
αci(cm/gr)		1,54E+10	6,10E+10		2,53E+10	8,14E+10
αcd(cm/gr)		3,07E+09	3,28E+09		2,60E+09	2,58E+09
αcg(cm/gr)		4,93E+09	6,44E+09		8,05E+09	1,43E+10
εs(adim)		0,528	0,505		0,47079486	0,73435012
(Kεs)g(cm <sup>2</sup> )		7,4856E-11	5,7301E-11		4,43E-11	2,49E-11
(Kεs)d(cm <sup>2</sup> )		1,2013E-10	1,1229E-10		1,37E-10	1,38E-10
(Kεs)i(cm <sup>2</sup> )		2,392E-11	6,0468E-12		1,41E-11	4,39E-12

**Tabla B.5. Resultados generales e intermedios, mezcla MA4.**

	MA4-10	Filtración 1	Filtración 2	MA4-20	Filtración 1	Filtración 2
% FP		0,79	0,79		0,764	0,764
D 3,2		15,135	15,135		15,135	15,135
to(seg)		1	1		1	1
Vo(cm <sup>3</sup> )		8,16	14,26		11,2	10,86
Vf(cm <sup>3</sup> )		108,96	107,45		98,46	110,1
V'(cm <sup>3</sup> )		100,8	93,19		78,93	99,24
a'(seg/cm <sup>6</sup> )		0,0002	0,0002		0,0001	0,0001
b'(seg/cm <sup>3</sup> )		0,0939	0,0797		0,1204	0,1151
Rm limp(cm <sup>-1</sup> )		7,55E+08	9,58E+08		9,57E+08	9,31E+08
Rm suc(cm <sup>-1</sup> )		8,42E+08	1,19E+09		1,47E+09	1,12E+09
% var R		11,4	24,4		54,1	19,9
ug(Pa*seg)		0,0027	0,0025		0,0023	0,0022
Rci(cm <sup>-1</sup> )		1,19E+09	6,46E+08		1,55E+09	2,02E+09
Rcd(cm <sup>-1</sup> )		8,73E+08	8,60E+08		3,96E+08	5,40E+08
Rcg(cm <sup>-1</sup> )		2,06E+09	1,51E+09		1,94E+09	2,56E+09
%Rci		57,7	42,9		79,6	78,9
%Rcd		42,3	57,1		20,4	21,1
mcd(gr/cm <sup>2</sup> )		0,4332	0,4005		0,3409	0,4291
mci(gr/cm <sup>2</sup> )		0,0590	0,0948		0,1582	0,0724
%mcd		88,0	80,9		68,3	85,6
%mci		12,0	19,1		31,7	14,4
αci(cm/gr)		2,02E+10	6,81E+09		9,78E+09	2,78E+10
αcd(cm/gr)		2,02E+09	2,15E+09		1,16E+09	1,26E+09
αcg(cm/gr)		4,19E+09	3,04E+09		3,89E+09	5,10E+09
εs(adim)		0,544	0,536		0,494	0,486
(Kεs)g(cm <sup>2</sup> )		8,7944E-11	1,1748E-10		9,1771E-11	7,0055E-11
(Kεs)d(cm <sup>2</sup> )		1,8302E-10	1,6638E-10		3,0748E-10	2,8368E-10
(Kεs)i(cm <sup>2</sup> )		1,8265E-11	5,2417E-11		3,6533E-11	1,2828E-11

**Tabla B.6. Resultados generales e intermedios, Base B.**

	B-10	Filtración 1	Filtración 2	B-20	Filtración 1	Filtración 2
% FP		1,767	1,767		3,094	3,094
D 3,2		16,53	16,53		16,53	16,53
to(seg)		1	1		3	5
Vo(cm <sup>3</sup> )		8,44	2,83		7,27	15,98
Vf(cm <sup>3</sup> )		102,09	106,3		103,69	102,99
V'(cm <sup>3</sup> )		93,65	103,47		96,42	87,01
a'(seg/cm <sup>6</sup> )		6,00E-04	4,00E-04		8,00E-04	4,00E-04
b'(seg/cm <sup>3</sup> )		8,94E-02	4,70E-02		4,10E-01	2,86E-01
Rm limp(cm <sup>-1</sup> )		2,93E+08	2,32E+08		9,46E+08	9,89E+08
Rm suc(cm <sup>-1</sup> )		3,38E+08	2,36E+08		1,01E+09	1,37E+09
% var R		15,5	1,6		6,37	38,09
ug(Pa*seg)		0,0035	0,0011		0,0031	0,0029
Rci(cm <sup>-1</sup> )		3,40E+07	3,88E+08		9,08E+08	4,07E+07
Rcd(cm <sup>-1</sup> )		4,68E+08	1,10E+09		7,21E+08	3,42E+08
Rcg(cm <sup>-1</sup> )		5,02E+08	1,49E+09		1,63E+09	3,83E+08
%Rci		6,77E+00	2,61E+01		5,58E+01	1,06E+01
%Rcd		9,32E+01	7,39E+01		4,42E+01	8,94E+01
mcd(gr/cm <sup>2</sup> )		4,03E-01	4,45E-01		4,17E-01	3,79E-01
mci(gr/cm <sup>2</sup> )		8,11E-02	5,27E-02		7,12E-02	4,13E-03
%mcd		8,32E+01	8,94E+01		8,54E+01	9,89E+01
%mci		1,68E+01	1,06E+01		1,46E+01	1,08E+00
αci(cm/gr)		4,19E+08	7,37E+09		1,28E+10	9,86E+09
αcd(cm/gr)		1,16E+09	2,47E+09		1,73E+09	9,02E+08
αcg(cm/gr)		1,04E+09	2,99E+09		3,34E+09	9,98E+08
εs(adim)		0,524	0,525		0,494	0,434
(Kεs)g(cm <sup>2</sup> )		1,87E-10	9,48E-11		6,07E-11	9,17E-11
(Kεs)d(cm <sup>2</sup> )		3,08E-10	1,45E-10		2,06E-10	3,96E-10
(Kεs)i(cm <sup>2</sup> )		8,53E-10	4,85E-11		2,80E-11	3,62E-11

**Tabla B.7. Resultados generales e intermedios, mezcla MB1.**

	MB1-10	Filtración 1	Filtración 2	MB1-20	Filtración 1	Filtración 2
% FP		4,997	4,997		9,903	9,903
D 3,2		12,245	12,245		12,245	12,245
to(seg)		12	22		34	55
Vo(cm <sup>3</sup> )		38,07	34,09		34,4	45,4
Vf(cm <sup>3</sup> )		112,31	112,04		106,7	110,75
V'(cm <sup>3</sup> )		74,24	77,95		72,3	65,35
a'(seg/cm <sup>6</sup> )		1,86E-02	2,44E-02		2,75E-02	3,09E-02
b'(seg/cm <sup>3</sup> )		4,83E-01	1,20E+00		1,56E+00	2,18E+00
Rm limp(cm <sup>-1</sup> )		2,43E+08	2,81E+08		9,30E+08	9,18E+08
Rm suc(cm <sup>-1</sup> )		2,88E+08	5,04E+08		9,76E+08	1,39E+09
% var R		18,5	79,7		4,9	51,5
ug(Pa*seg)		0,0086	0,0053		0,0038	0,0012
Rci(cm <sup>-1</sup> )		5,33E+08	2,81E+09		5,06E+09	2,56E+10
Rcd(cm <sup>-1</sup> )		4,70E+09	1,05E+10		1,54E+10	5,01E+10
Rcg(cm <sup>-1</sup> )		5,24E+09	1,33E+10		2,05E+10	7,57E+10
%Rci		1,02E+01	2,11E+01		2,47E+01	3,38E+01
%Rcd		8,98E+01	7,89E+01		7,53E+01	6,62E+01
mcd(gr/cm <sup>2</sup> )		3,34E-01	-		3,10E-01	2,80E-01
mci(gr/cm <sup>2</sup> )		1,56E-01	-		1,78E-01	1,78E-01
%mcd		6,81E+01	-		6,36E+01	5,51E+01
%mci		3,19E+01	-		3,64E+01	3,64E+01
$\alpha_{ci}$ (cm/gr)		-	1,80E+10		2,85E+10	1,13E+11
$\alpha_{cd}$ (cm/gr)		-	3,15E+10		4,98E+10	1,79E+11
$\alpha_{cg}$ (cm/gr)		-	2,72E+10		4,21E+10	1,49E+11
$\epsilon_s$ (adim)		-	0,559		0,571	0,578
(K $\epsilon_s$ )g(cm <sup>2</sup> )		-	1,24E-11		7,60E-12	2,19E-12
(K $\epsilon_s$ )d(cm <sup>2</sup> )		-	1,13E-11		7,17E-12	1,99E-12
(K $\epsilon_s$ )i(cm <sup>2</sup> )		-	1,99E-11		1,25E-11	3,17E-12

-: no fue posible obtener datos, ya que se perdió la torta.

**Tabla B.8. Resultados generales e intermedios, mezcla MB2.**

	MB2-10	Filtración 1	Filtración 2	MB2-20	Filtración 1	Filtración 2
% FP		2,149	2,149		5,024	5,024
D 3,2		16,052	16,052		16,052	16,052
to(seg)		3	1		2	4
Vo(cm <sup>3</sup> )		35,54	10,1		3,92	7,34
Vf(cm <sup>3</sup> )		113,79	109,06		105,48	106,96
V'(cm <sup>3</sup> )		78,25	98,96		101,56	99,62
a'(seg/cm <sup>6</sup> )		1,00E-03	1,60E-03		1,30E-03	1,10E-03
b'(seg/cm <sup>3</sup> )		1,61E-01	1,10E-01		3,86E-01	5,13E-01
Rm limp(cm <sup>-1</sup> )		3,04E+08	2,59E+08		9,15E+08	9,56E+08
Rm suc(cm <sup>-1</sup> )		3,29E+08	2,72E+08		1,30E+09	1,35E+09
% var R		8,3	4,8		41,7	40,8
ug(Pa*seg)		0,0037	0,0037		0,0035	0,0034
Rci(cm <sup>-1</sup> )		3,06E+08	1,64E+08		2,98E+08	8,61E+08
Rcd(cm <sup>-1</sup> )		6,19E+08	1,26E+09		1,09E+09	9,43E+08
Rcg(cm <sup>-1</sup> )		9,25E+08	1,43E+09		1,39E+09	1,80E+09
%Rci		3,31E+01	1,15E+01		2,15E+01	4,77E+01
%Rcd		6,69E+01	8,85E+01		7,85E+01	5,23E+01
mcd(gr/cm <sup>2</sup> )		3,37E-01	4,25E-01		4,38E-01	4,31E-01
mci(gr/cm <sup>2</sup> )		1,30E-02	7,34E-02		5,13E-02	4,76E-02
%mcd		9,63E+01	8,53E+01		8,95E+01	9,01E+01
%mci		3,70E+00	1,47E+01		1,05E+01	1,05E+01
αci(cm/gr)		2,36E+10	2,24E+09		5,81E+09	2,71E+10
αcd(cm/gr)		1,84E+09	2,97E+09		2,49E+09	2,19E+09
αcg(cm/gr)		2,64E+09	2,86E+09		2,84E+09	6,80E+09
εs(adim)		0,515	0,545		0,513	0,479
(Kεs)g(cm <sup>2</sup> )		1,35E-10	1,25E-10		1,26E-10	9,48E-11
(Kεs)d(cm <sup>2</sup> )		1,95E-10	1,20E-10		1,43E-10	1,63E-10
(Kεs)i(cm <sup>2</sup> )		1,51E-11	1,59E-10		6,15E-11	1,98E-11

**Tabla B.9. Resultados generales e intermedios, mezcla MB3.**

	MB3-10	Filtración 1	Filtración 2	MB3-20	Filtración 1	Filtración 2
% FP		1,516	1,516		1,759	1,759
D 3,2		18,607	18,607		18,607	18,067
to(seg)		3	1		4	2
Vo(cm <sup>3</sup> )		32,35	11,04		10,02	4,81
Vf(cm <sup>3</sup> )		106,24	95,44		102,95	105,54
V'(cm <sup>3</sup> )		73,89	84,4		92,93	100,73
a'(seg/cm <sup>6</sup> )		3,00E-04	4,00E-04		5,00E-04	4,00E-04
b'(seg/cm <sup>3</sup> )		9,85E-02	8,65E-02		4,62E-01	3,15E-01
Rm limp(cm <sup>-1</sup> )		2,56E+08	2,69E+08		8,57E+08	8,45E+08
Rm suc(cm <sup>-1</sup> )		3,92E+08	-		1,02E+09	1,36E+09
% var R		0,0	-		19,5	60,7
ug(Pa*seg)		0,0032	0,0025		0,0030	0,0030
Rci(cm <sup>-1</sup> )		5,65E+07	-		1,27E+09	1,57E+08
Rcd(cm <sup>-1</sup> )		2,02E+08	-		4,61E+08	3,88E+08
Rcg(cm <sup>-1</sup> )		2,58E+08	-		1,73E+09	5,45E+08
%Rci		2,19E+01	-		7,33E+01	2,88E+01
%Rcd		7,81E+01	-		2,67E+01	7,12E+01
mcd(gr/cm <sup>2</sup> )		3,19E-01	3,64E-01		4,04E-01	4,40E-01
mci(gr/cm <sup>2</sup> )		1,44E-01	8,69E-02		9,40E-02	8,22E-02
%mcd		6,89E+01	8,07E+01		8,11E+01	8,43E+01
%mci		3,11E+01	1,93E+01		1,89E+01	1,57E+01
$\alpha_{ci}$ (cm/gr)		3,92E+08	-		1,35E+10	7,47E+09
$\alpha_{cd}$ (cm/gr)		6,33E+08	1,08E+09		1,14E+09	8,82E+08
$\alpha_{cg}$ (cm/gr)		5,58E+08	-		3,47E+09	1,04E+09
$\epsilon_s$ (adim)		0,508	0,510		0,454	0,426
(K $\epsilon_s$ )g(cm <sup>2</sup> )		6,40E-10	-		1,03E-10	3,42E-10
(K $\epsilon_s$ )d(cm <sup>2</sup> )		5,64E-10	-		3,13E-10	4,05E-10
(K $\epsilon_s$ )j(cm <sup>2</sup> )		9,11E-10	-		2,65E-11	1,87E-10

**Tabla B.10. Resultados generales e intermedios, mezcla MB4.**

	M					
	B4-10	Filtración 1	Filtración 2	MB4-20	Filtración 1	Filtración 2
% FP		<b>1,409</b>	<b>1,409</b>		<b>0,871</b>	<b>0,871</b>
D 3,2		19,147	19,147		19,147	19,147
to(seg)		2	1		1	6
Vo(cm <sup>3</sup> )		44,13	13,56		1,03	16,04
Vf(cm <sup>3</sup> )		116,92	115		105,71	102,99
V'(cm <sup>3</sup> )		72,79	101,44		104,68	86,95
a'(seg/cm <sup>6</sup> )		2,00E-04	2,00E-04		8,00E-04	3,00E-04
b'(seg/cm <sup>3</sup> )		4,85E-02	5,38E-02		3,54E-01	3,75E-01
Rm limp(cm <sup>-1</sup> )		2,42E+08	2,65E+08		9,49E+08	8,59E+08
Rm suc(cm <sup>-1</sup> )		3,13E+08	2,71E+08		1,00E+09	1,00E+09
% var R		29,3	2,4		5,4	16,5
ug(Pa*seg)		0,0022	0,0028		0,0035	0,0031
Rci(cm <sup>-1</sup> )		1,54E+07	1,22E+07		4,85E+08	7,79E+08
Rcd(cm <sup>-1</sup> )		1,97E+08	2,14E+08		7,02E+08	2,47E+08
Rcg(cm <sup>-1</sup> )		2,12E+08	2,26E+08		1,19E+09	1,03E+09
%Rci		7,25E+00	5,41E+00		4,09E+01	7,59E+01
%Rcd		9,27E+01	9,46E+01		5,91E+01	2,41E+01
mcd(gr/cm <sup>2</sup> )		3,12E-01	4,36E-01		4,57E-01	3,78E-01
mci(gr/cm <sup>2</sup> )		2,75E-02	3,00E-02		3,93E-02	1,22E-01
%mcd		9,19E+01	9,36E+01		9,21E+01	7,56E+01
%mci		8,08E+00	6,43E+00		7,91E+00	2,44E+01
$\alpha_{ci}$ (cm/gr)		5,61E+08	4,08E+08		1,24E+10	6,37E+09
$\alpha_{cd}$ (cm/gr)		6,31E+08	6,31E+08		1,54E+09	6,54E+08
$\alpha_{cg}$ (cm/gr)		6,25E+08	6,25E+08		2,39E+09	2,05E+09
$\epsilon_s$ (adim)		0,550	0,543		0,423	0,444
(K $\epsilon_s$ )g(cm <sup>2</sup> )		5,71E-10	7,36E-10		1,49E-10	1,74E-10
(K $\epsilon_s$ )d(cm <sup>2</sup> )		5,66E-10	7,28E-10		2,33E-10	5,46E-10
(K $\epsilon_s$ )i(cm <sup>2</sup> )		6,37E-10	8,76E-10		2,89E-11	5,61E-11



**APÉNDICE C:**  
**MASA INVASORA Y GOMA XANTHANA**



## Masa Invasora y Experiencia de Goma Xanthana

### Masa Invasora ( $m_I$ )

Para estudiar la invasión de sólidos al yacimiento es preciso establecer un balance de masa en el proceso de filtración, fundamentado en que la deposición de la masa del revoque se realiza en finas capas de manera instantánea y todo volumen de filtrado tiene asociado una masa de revoque depositada y otra atrapada en el disco. Este balance viene dado por:

$$M_t = M_{revoque} + \Delta M_D + M_f \quad (C.1)$$

Donde:

$M_f$ : masa de sólidos en el filtrado (M)

$M_T$ : masa total de sólidos (M)

$\Delta M_D$ : Diferencia de masa del disco poroso al final y al inicio respectivamente (M)

Una manera de cuantificar esta invasión es empleando el parámetro “masa invasora”, el cual engloba la masa que invadió al disco y la masa que pasó al filtrado, tal como sigue:

$$M_I = M_f + \Delta M_D = M \quad (C.2)$$

Empleando el término Masa invasora por unidad de área ( $m_I$ ) propuesto por Pérez y Meza, ya que éste independiza la masa invasora del área de filtrado:



$$m_l = \frac{M_l}{A} + \frac{\Delta M_{DP}}{A} \quad (C.3)$$

Un cálculo tipo de éste parámetro para la mezcla MA2-20 sería:

Empleando una pérdida de lodo al trasvasar a la celda de un 1,5% se tiene:

$$V_s = V_s * \frac{\varphi_s}{(1 - \varphi_s)} \quad (C.4)$$

$$V_s = \frac{(130ml * (1 - 0.015) * 0.0307)}{(1 - 0.0307)}$$

$$V_s = 4.056ml$$

$$M_T = \rho_s * V_s \quad (C.5)$$

$$M_T = 2.8gr / ml * 4.056ml$$

$$M_T = 11.356gr$$

así la masa invasora es igual a:

$$m_l = (M_T - M_{revoque}) / A$$

$$m_l = (11.36gr - 10.62gr) / 21.24m^2 \quad (C.6)$$

$$m_l = 0.0348gr/m^2 = 0.348Kg / m^2$$

Obteniéndose los siguientes resultados:

40-45	Serie 1	Serie 2	20-25	Serie 3	Serie 4
<b>MA1</b>	0,446	0,436	<b>MB1</b>	0,45	0,48
	0,439	0,453		-----	0,28
<b>MA2</b>	0,12	0,35	<b>MB2</b>	1,851	0,462
	0,24	0,36		0,37	0,56
<b>A</b>	0,133	0,276	<b>B</b>	0,51	0,474
	0,2	0,182		0,372	1,517
<b>MA3</b>	0,27	0,49	<b>MB3</b>	0,723	0,374
	0,66	0,67		0,844	0,132
<b>MA4</b>	0,43	0,36	<b>MB4</b>	1,953	0,386
	0,399	0,34		0,696	0,344



## Experiencia de Goma Xanthana

Se realizaron dos experiencias con la goma Xanthana, la primera tuvo como finalidad obtener el valor de la viscosidad de dicha goma encontrándose gran diferencia con los resultados de las filtraciones. La segunda se basó en estudiar el entrapamiento de la goma en el medio poroso. Para ello se realizaron los siguientes cálculos:

$$q_a = \frac{m_a}{A}$$
$$q_a = \frac{8,60\text{cm}^3 / \text{seg}}{21,24\text{cm}^2}$$
$$q_a = 0,405\text{cm} / \text{seg}$$

$$q_g = \frac{4,256\text{cm}^3 / \text{seg}}{21,24\text{cm}^2}$$
$$q_g = 0,20\text{cm} / \text{seg}$$

$$\mu_g = \frac{\mu_a \cdot q_a \Delta P_g}{\Delta P_a \cdot q_g}$$
$$\mu_g = \frac{400\text{Psi} \cdot 0,00084\text{Pa.s} \cdot 0,405\text{cm} / \text{seg}}{40\text{Psi} \cdot 0,20\text{cm} / \text{seg}}$$
$$\mu_g = 0,017\text{Pa.s}$$



Obteniéndose un cambio en la resistencia del disco, tal como se muestra a continuación:

$$R_{ML} = \frac{\Delta P * A}{\mu_a * m_a}$$

$$R_{ML} = \frac{275800 Pa * 21,24 cm^2}{0,00084 Pa.s * 8,60 cm^3 / seg}$$

$$R_{ML} = 8,11 \times 10^8 cm^{-1}$$

$$R_{MS} = \frac{\Delta P * A}{\mu_a * m_a}$$

$$R_{MS} = \frac{275800 Pa * 21,24 cm^2}{0,00084 Pa.s * 7,21 cm^3 / seg}$$

$$R_{MS} = 9,67 \times 10^8 cm^{-1}$$

$$\% \text{ var } R = \frac{R_{MS} - R_{ML}}{R} \cdot 100\%$$

$$\% \text{ var } R = 19,37\%$$



**APÉNDICE D:**  
**CÁLCULOS TIPOS**



## **CARACTERIZACIÓN DE REVOQUES**

A continuación se presentan los cálculos tipo tanto para las pruebas sobre discos porosos como para las pruebas de compresibilidad, tomando como referencia la base 20-25 específicamente la mezcla MA2-20

### **DATOS**

#### **Disco N° 7 (20 $\mu$ m)**

$\mu_a$ : viscosidad del líquido permeante (agua) = 0,00084 Pa.s

A: área de la celda =  $2,124 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>

$\rho_s$ : densidad del CaCO<sub>3</sub> = 2,8 gr/cm<sup>3</sup>

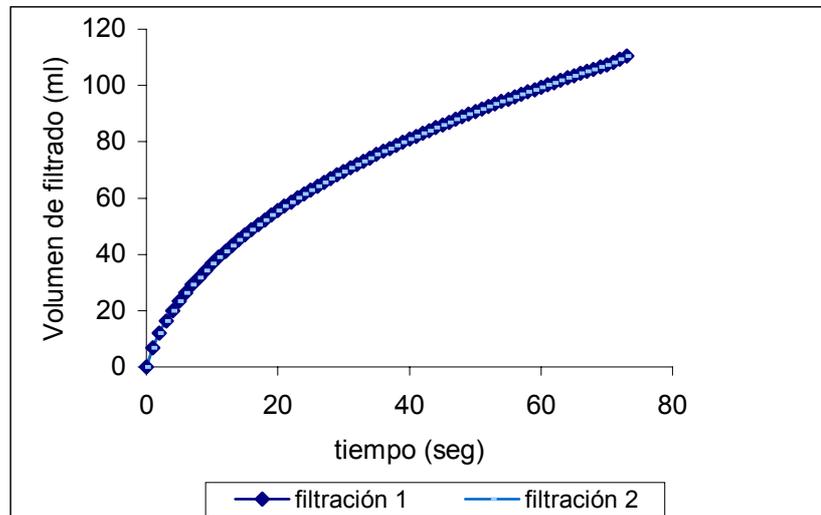
M<sub>CaCO<sub>3</sub></sub>: masa del CaCO<sub>3</sub> agregada a la suspensión = 30 gr

$\rho_{H_2O}$  = 1 gr/cm<sup>3</sup>

### **DESARROLLO**

#### **1. Obtención de la curva de filtrado**

Con los datos obtenidos de masa y tiempo de la filtración de la mezcla MA2-20, y tomando como densidad de filtrado la densidad del agua = 1 gr/cm<sup>3</sup> se realizó la conversión a volumen de filtrado en cm<sup>3</sup>. En la figura D.1 se muestra el comportamiento de la curva obtenida para cada filtración.

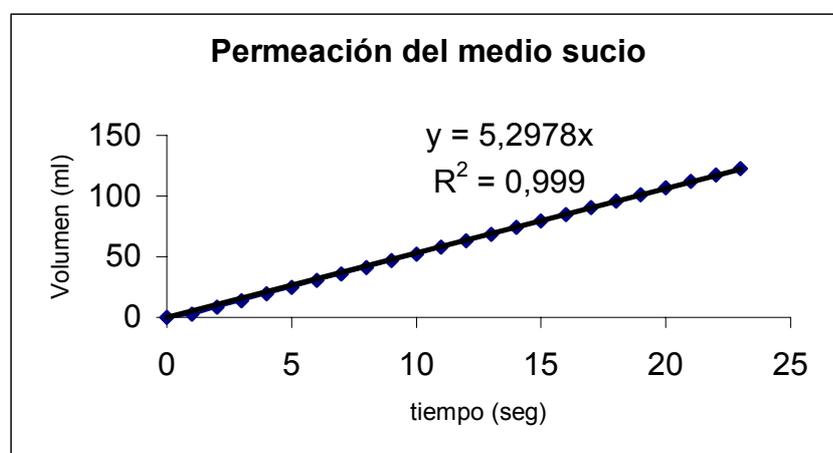


**FIGURA D.1. Curva de filtrado.**

## 2. Determinación de la resistencia del medio sucio

Una vez realizada la filtración se forma el revoque sobre el medio filtrante, el cual se retira totalmente para pernear el medio y así obtener su resistencia.

La figura D.2 ilustra la permeación del medio sucio.



**FIGURA D.2. Permeación del medio filtrante**



La resistencia del medio sucio se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$R_M = \frac{1}{\mu_a} \frac{\Delta P_M \cdot A}{\left. \frac{dV_L}{dt} \right|_M} \quad (\text{D.I})$$

Donde:

$R_M$ : resistencia del medio sucio (m)

$\left. \frac{dV_L}{dt} \right|_M$  : pendiente de la curva de permeación del medio sucio  
(m<sup>3</sup>/ seg).

Luego se realiza la aproximación de la curva de permeación, que para por el punto (0,0), obteniéndose:

$$R^2 = 0,999$$

$$V_L = 5,2978t$$

Sustituyendo en la ecuación (D.I):

$$R_M = \frac{1}{0.000084 Pa \cdot s} \times \frac{40 psi \times 21,24 cm^2}{5,2978 cm^3/s}$$

$$R_M = \frac{1}{0.000084 Pa \cdot s} \times \frac{40 psi}{1 psi} \times \frac{6895 Pa}{5,2978 cm^3/s} \times 21,24 cm^2 = 1,32E09 cm^{-1}$$

$$R_M = 1,32E11 m^{-1}$$

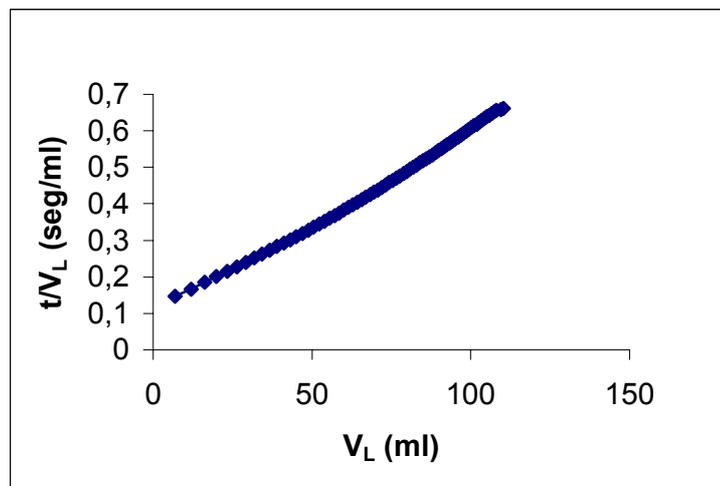
### 3. Identificación de la existencia de dos zonas (darcyana e incipiente), obtención de $V_0$ y $t_0$

Para obtener  $V_0$  y  $t_0$ , debe hacerse inicialmente un gráfico de  $t'/V_L'$  vs.  $V_L'$ , donde:

$$V_L' = V_L - V_{L0}$$

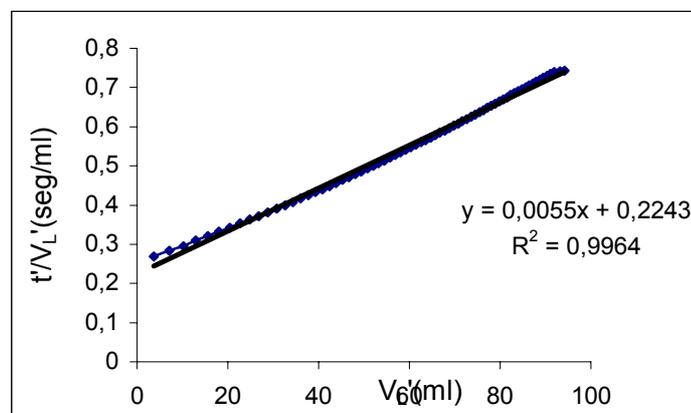
$$t' = t - t_0$$

Para los datos correspondientes a la filtración tomando  $V_{L0}$  y  $t_0$  igual a cero, queda la siguiente curva:



**FIGURA D.3. Curva de identificación de las dos zonas.**

Posteriormente se debe ir cambiando  $V_0$  y  $t_0$ , por los siguientes valores  $V_i$  y  $t_i$  de los datos de la curva de filtración y aproximando dichos datos ( $t'/V_L'$  vs.  $V_L'$ ) a una recta, este proceso se detiene una vez que se ha alcanzado la mejor correlación, en este caso se obtiene:



**FIGURA D.4. Curva representativa de la zona darcyana.**

cuya ecuación es:

$$\frac{t'}{V_L'} = 0,0055V_L' + 0,2243 \quad (D.II)$$

#### 4. Determinación de la pendiente $a'$ y el punto de corte $b'$

De la ecuación (D.II) se obtiene:

$$a': 0,0055 \quad b': 0,2243$$



## 5. Estimación de la viscosidad efectiva de la goma Xanthana

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

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

Donde:

$\mu_g$ : viscosidad efectiva de la goma (Pa.s)

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

$$V_L' = V_L + V_0$$

### 5.1 Caudal de filtrado para un tiempo t:

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

$$q_g = \frac{1}{A} \frac{dV_L}{dt} \Big|_{V_L=V_L'} = \frac{1}{21,24 \text{ cm}^2 \left( 2 \times 0,0055 \frac{\text{seg}}{\text{cm}^6} \times 94,12 \text{ cm}^3 + 0,2243 \frac{\text{seg}}{\text{cm}^3} \right)}$$

$$q_g = \frac{1}{A} \frac{dV_L}{dt} \Big|_{V_L=V_L'} = 0,0374 \text{ cm/seg}$$

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

Este cálculo parte de la permeación del revoque utilizando agua. En la figura D.3 se muestra la curva de permeación del revoque con agua:

$$q_a = \frac{m_p}{A} = q_a = \frac{0,8747 \text{ cm}^3 / \text{s}}{21,24 \text{ cm}^2}$$
$$q_a = 0,0412 \text{ cm/s} \times \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} = 4,12 \times 10^{-4} \text{ m/s}$$

## **5.3 Viscosidad efectiva de la goma Xanthana:**

$$\mu_g = \mu_a \cdot \frac{q_a}{q_g}$$
$$\mu_g = 0,084 \text{ Pa} \cdot \text{s} \times \frac{4,12 \times 10^{-4} \text{ m/s}}{3,74 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}}$$
$$\mu_g = 0,00093 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 9,3 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

## **6. Determinación de la resistencia global**

La resistencia global se puede determinar a partir de la siguiente ecuación:



$$R_{CG} = \frac{\Delta P \cdot A}{\mu_g} \cdot (2 \cdot a' \cdot V_L' + b') - R_M$$
$$R_{CG} = \frac{400 \text{ psi} \times 6,895 \text{ Pa} \times 21,24 \text{ cm}^2 \left( 2 \times 0,0055 \frac{\text{s}}{\text{cm}^6} \times 94,2 \text{ cm}^3 + 0,2243 \frac{\text{s}}{\text{cm}^3} \right) - 1,32 \times 10^9 \text{ cm}^{-1}}{1 \text{ psi} \times 9,3 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}}$$
$$R_{CG} = 7,84 \times 10^{10} \text{ cm}^{-1} = 7,84 \text{ E}12 \text{ m}^{-1}$$

### 7. Determinación de la resistencia de la zona incipiente

Este cálculo se realiza a partir de la siguiente ecuación:

$$R_{CI} = \frac{\Delta P \cdot A}{\mu_g} \cdot b' - R_M$$
$$R_{CI} = \frac{400 \text{ psi} \times 6895 \text{ Pa}}{1 \text{ psi}} \times \frac{21,24 \text{ cm}^2}{9,3 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}} \times 0,2243 \frac{\text{s}}{\text{cm}^3}$$
$$R_{CI} = 1,29 \text{ E}10 \text{ cm}^{-1} = 1,29 \text{ E}12 \text{ m}^{-1}$$

### 8. Determinación de la resistencia de la zona darcyana

La resistencia darcyana se puede determinar a partir de la siguiente ecuación:

$$R_{CD} = \frac{\Delta P \cdot A}{\mu_g} \cdot (2 \cdot a' \cdot V_L') - R_M = R_{CG} - R_{CI}$$
$$R_{CD} = 7,84 \text{ E}12 - 1,29 \text{ E}12 = 6,55 \text{ E}12 \text{ m}^{-1}$$



### **9. Determinación de la contribución porcentual de cada zona a la resistencia global**

La contribución de la zona darcyana es:

$$\begin{aligned}\%R_{CD} &= \frac{R_{CD}}{R_{CG}} \cdot 100 \\ \%R_{CD} &= \frac{6,55E12}{7,84E12} \cdot 100 \\ \%R_{CD} &= 83,55\%\end{aligned}$$

Por su parte la contribución de la zona incipiente

$$\begin{aligned}\%R_{CI} &= \frac{R_{CI}}{R_{CG}} \cdot 100 \\ \%R_{CI} &= \frac{1,29E12}{7,84E12} \cdot 100 \\ \%R_{CI} &= 16,45\%\end{aligned}$$

### **10. Determinación de los parámetros de concentración.**

#### **10.1. Solidosidad:**

$$\begin{aligned}\varepsilon_s &= \frac{M_s}{\rho_s \cdot A \cdot hc} \\ \varepsilon_s &= \frac{10,617 \text{ gr}}{2,8 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \times 21,24 \text{ cm}^2 \times 0,3439 \text{ cm}} \\ \varepsilon_s &= 0,519\end{aligned}$$

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

$$\phi_s = \frac{V_{CaCO_3}}{V_{susp}} = \frac{\frac{M_{ss}}{\rho_s}}{\frac{M_{ss}}{\rho_s} + \frac{M_{LS}}{\rho_{LS}}}$$

$$\phi_s = \frac{V_{CaCO_3}}{V_{susp}} = \frac{\frac{0,03kg}{2800kg/m^3}}{\frac{0,03kg}{2800kg/m^3} + \frac{0,338kg}{1000kg/m^3}}$$

$$\phi_s = 0,0307$$

### 10.3 Capa (K)

Este parámetro se determina a partir de:

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

$$k = \left[ \frac{0,519}{0,0307} - 1 \right]^{-1} = 0,063$$

Este parámetro no se emplea en los cálculos para caracterizar el revoque en esta investigación, pero puede estudiarse en trabajos posteriores.

### 10.4 Factor de Corrección:

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

$$X_\omega = \frac{1}{1 - \frac{0,0307}{0,519}} = 1,063$$

### 10.5 Relación masa de torta-volumen de filtrado:

$$w = \rho_s \cdot \phi_s \cdot X_w$$

$$w = 2,8 \frac{gr}{cm^3} \times 0,0307 \times 1,063 = 0,0914 \frac{gr}{cm^3}$$

### 11. Estimación de la resistencia específica darcyana, $\alpha_{cd}$

La resistencia específica darcyana se obtiene a partir de la ecuación:

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

$$\alpha_{CD} = \left( \frac{2 \cdot (21,24)^2 \cdot 27580000 \frac{gr}{cm \cdot s^2} \cdot 0,0055 \frac{s}{cm^6}}{0,00930 \frac{gr}{cm \cdot s} \times 0,0914 \frac{gr}{cm^3}} \right)$$

$$\alpha_{CD} = 1,62E11 \frac{cm}{gr}$$

### 12. Masa de torta seca por unidad de área global:

$$m_{CD} = \left( \frac{M_s}{A} \right)$$

$$m_{CD} = \left( \frac{10,617 gr}{21,24 cm^2} \right) = 0,499 \frac{gr}{cm^2}$$



### **13. Estimación de la resistencia específica global, $\alpha_{CG}$**

Su cálculo se efectúa a partir de la ecuación:

$$\alpha_{CG} = \frac{R_{CG}}{m_{CG}}$$
$$\alpha_{CG} = \frac{7,84E10cm^{-1}}{0,499gr/cm^2}$$
$$\alpha_{CG} = 1,57E11cm/gr$$

### **14. Masa de torta seca por unidad de área de la zona darcyana:**

$$m_{CD} = \frac{\omega \cdot V_L'}{A}$$
$$m_{CD} = 0,0904gr/cm^3 \times \frac{94,12cm^3}{21,24cm^2} = 0,405gr/cm^2$$

### **15. Estimación de la resistencia específica de la zona incipiente:**

Se obtiene a partir de la ecuación:



$$\alpha_{CI} = \frac{R_{CI}}{m_{CI}} = \frac{R_{CI}}{m_{CG} - m_{CD}}$$
$$\alpha_{CI} = \frac{1,29 \times E10 \text{ cm}^{-1}}{0,499 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^2} - 0,405 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^2}}$$
$$\alpha_{CI} = 1,36 E11 \frac{\text{cm}}{\text{gr}}$$

**16. Contribución porcentual de cada zona a la cantidad de revoque.**

La contribución de la zona darcyana es:

$$\%m_{CD} = \frac{m_{CD}}{m_{CG}} \times 100$$
$$\%m_{CD} = \frac{0,405 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^2}}{0,499 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^2}} \times 100 = 81,16\%$$

Por otra parte la zona incipiente se calcula como:

$$\%m_{CI} = \frac{m_{CI}}{m_{CG}} \times 100 = \frac{m_{CG} - m_{CD}}{m_{CG}}$$
$$\%m_{CI} = \frac{0,094}{0,499} \times 100 = 18,84\%$$



**17. Estimación del producto permeabilidad solidosidad global  
( $k_g \varepsilon_s$ )**

$$K_g \varepsilon_s = \frac{1}{\rho_s \cdot \alpha_{CG}}$$
$$K_g \varepsilon_s = \frac{1}{2,8 \frac{gr}{cm^3} \cdot 1,57E11 \frac{cm}{gr}}$$
$$K_g \varepsilon_s = 2,28E - 12 \text{cm}^2$$

**18. Estimación del producto permeabilidad-solidosidad de las  
zonas darcyana e incipiente:**

Se estiman usando las ecuaciones:

$$K_d \varepsilon_s = \frac{1}{\rho_s \cdot \alpha_{CD}} = \frac{1}{2,8 \frac{gr}{cm^3} \times 1,62E11 \frac{cm}{gr}} = 2,21E - 12 \text{cm}^2$$
$$K_I \varepsilon_s = \frac{1}{\rho_s \cdot \alpha_{CI}} = \frac{1}{2,8 \frac{gr}{cm^3} \times 1,36E11 \frac{cm}{gr}} = 2,63E - 12 \text{cm}^2$$



## COMPRESIBILIDAD DE TORTAS

Los cálculos necesarios para la evaluación de la compresibilidad de los revoques son los que siguen a continuación:

### ECUACIÓN DE TILLER

Para la comparación del modelo de Tiller, fue utilizada la secuencia de cálculos que a continuación se presenta:

#### **1. ESTIMACIÓN DE LA CAÍDA DE PRESIÓN REQUERIDA PARA FORMAR LA TORTA DARCYANA ( $\Delta P_c$ )**

Para ello se hace uso de la relación entre la caída de presión ejercida durante la etapa incipiente y aquella ejercida durante la darcyana.

La correspondiente incipiente es:

$$\Delta P_i = \Delta P \cdot \left( \frac{b'}{2 \cdot a' \cdot V' + b'} \right) \quad (\text{D.I})$$

Entonces la correspondiente a la darcyana es:

$$\Delta P_c = \Delta P \cdot \left( 1 - \frac{b'}{2 \cdot a' \cdot V' + b'} \right) \quad (\text{D.II})$$



Para datos correspondientes a la presión de 200psi de la base 20-25 se obtuvo que:

$$a' = 14,403 \times 10^{12} \text{ s} / \text{m}^6 \qquad b' = 6,33 \times 10^6 \text{ s} / \text{m}^3$$

$$V' = 10,84 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \qquad \Delta P = 1,38 \times 10^6 \text{ Kg} / \text{m.s}^2$$

Sustituyendo estos valores queda:

$$\Delta P_c = 1,38 \times 10^6 \text{ Kg} / \text{ms}^2 \times \left( 1 - \frac{6,33 \times 10^6}{2.14,403 \times 10^{12} \text{ s} / \text{m}^6 \cdot 10,84 \times 10^{-6} \text{ m}^3 + 6,33 \times 10^6 \text{ s} / \text{m}^3} \right)$$

$$\Delta P_c = 1,35 \times 10^6 \text{ Kg} / \text{ms}^2$$

## **2. ESTIMACIÓN DEL PARÁMETRO PERMEABILIDAD-SOLIDOSIDAD DARCYANA**

El parámetro  $k_{\epsilon_{SD}}$  se calcula a partir de la ecuación

$$k_{\epsilon_{SD}} = \frac{(k_{\epsilon_{SD}})_0}{\frac{\Delta P_c}{P_a}} \left( \frac{\left( 1 + \frac{\Delta P_c}{P_a} \right)^{(1-\delta)} - 1}{1-\delta} \right) \qquad \text{(D.III)}$$



Los parámetros de Tiller -  $(k\varepsilon_{SD})_0$ ,  $P_a$  y  $\delta$ - deben estimarse a través de un ajuste de mínimos cuadrados a partir de los datos experimentales, obtenidos para cada presión y para cada base.

Con los valores  $\Delta P_C$ , para cada una de las filtraciones a presión total ( $\Delta P$ ), para la base 20-25, se obtuvieron ejecutando el solver, los valores de los parámetros y el del producto permeabilidad-solidosidad  $k\varepsilon_{SD}$ :

$$\delta = 0,9572 \quad P_a = 1 \cdot 10^5 (\text{N/m}^2) \quad (k\varepsilon_{SD})_0 = 8,2768 \cdot 10^{-19} \text{m}^2$$

se obtiene el valor de la permeabilidad-solidosidad:

$$K\varepsilon_{SD} = 1,737 \cdot 10^{-19} \text{m}^2$$

### **ECUACIÓN DE LEWIS**

Para la comparación con el modelo de Lewis, se realizaron los siguientes cálculos:

La ecuación de Lewis para la compresibilidad de las tortas es la siguiente:

$$K\varepsilon_{SD} = (K\varepsilon_{SD})_1 \cdot \Delta P_C^{-n} \quad (\text{D.IV})$$

A fin de determinar los parámetros  $(k\varepsilon_{SD})_1$  y  $n$ , se debe realizar un ajuste lineal a partir de los datos experimentales, de la forma:



$$\text{Log}(k\varepsilon_{SD}) = \text{log}((k\varepsilon_{SD})_1) - n \cdot \text{Log}(\Delta P_C) \quad (\text{D.V})$$

Luego, haciendo el ajuste lineal de los datos a partir de los valores logarítmicos, se obtiene para la base 20-25 los siguientes valores de permeabilidad-solidosidad y de variación de presión para la zona darcyana respectivamente ( $\Delta P_C$ )

<b>PRESIÓN (psi)</b>	<b>PRODUCTO PERMEABILIDAD- SOLIDOSIDAD (m<sup>2</sup>)</b>	<b><math>\Delta P_C</math> (N/m<sup>2</sup>)</b>
50	4,2	$2,70 \cdot 10^5$
100	1,9	$5,90 \cdot 10^5$
200	1,6	$1,2 \cdot 10^6$
300	1,25	$1,98 \cdot 10^6$
400	1	$2,5 \cdot 10^6$
500	1,5	$3 \cdot 10^6$

Con los valores anteriores se realizó el ajuste obteniendo los valores que corresponden a la base 20-25

$$n=0,5136 \quad \text{y} \quad (k\varepsilon_{SD})_1=2354,6 \cdot 10^{-19} \text{m}^2$$

utilizando la ecuación de Lewis se puede hallar el producto permeabilidad-solidosidad:

$$K\varepsilon_{SD} = 1,67 \cdot 10^{-19} \text{m}^2$$



**APÉNDICE E:**  
**DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIA ACUMULADA PARA  
LAS GRANULOMETRÍAS EMPLEADAS**

**Tabla E.1. Distribución de frecuencia acumulada para las mezclas diseñadas a partir de la base 20-25.**

Xp ( $\mu\text{m}$ )	MA1	MA2	MA3	MA4
0,021	0,000	0,000	0,000	0,000
0,024	0,000	0,000	0,000	0,000
0,027	0,000	0,000	0,000	0,000
0,030	0,000	0,000	0,000	0,000
0,034	0,000	0,000	0,000	0,000
0,038	0,000	0,000	0,000	0,000
0,042	0,000	0,000	0,000	0,000
0,047	0,000	0,000	0,000	0,000
0,053	0,000	0,000	0,000	0,000
0,060	0,000	0,000	0,000	0,000
0,067	0,000	0,000	0,000	0,000
0,075	0,000	0,000	0,000	0,000
0,084	0,000	0,000	0,000	0,000
0,095	0,000	0,000	0,000	0,000
0,106	0,000	0,000	0,000	0,000
0,119	0,000	0,000	0,000	0,000
0,134	0,000	0,000	0,000	0,000
0,150	0,000	0,000	0,000	0,000
0,168	0,000	0,000	0,000	0,000
0,189	0,000	0,000	0,000	0,000
0,212	0,000	0,000	0,000	0,000
0,238	0,000	0,000	0,000	0,000
0,267	0,000	0,000	0,000	0,000
0,299	0,000	0,000	0,000	0,000
0,336	0,000	0,000	0,000	0,000
0,377	0,000	0,000	0,000	0,000
0,423	0,000	0,000	0,000	0,000
0,474	0,000	0,000	0,000	0,000
0,532	0,000	0,000	0,000	0,000
0,597	0,000	0,000	0,000	0,000
0,670	0,000	0,000	0,076	0,094
0,752	0,041	0,064	0,192	0,227
0,843	0,132	0,196	0,357	0,404
0,946	0,285	0,375	0,537	0,592
1,062	0,479	0,587	0,725	0,781
1,191	0,722	0,835	0,914	0,964

**Tabla E.1. Distribución de frecuencia acumulada para las mezclas diseñadas a partir de la base 20-25. (cont)**

Xp ( $\mu\text{m}$ )	MA1	MA2	MA3	MA4
1,337	1,028	1,127	1,103	1,137
1,500	1,417	1,476	1,297	1,300
1,683	1,911	1,897	1,500	1,456
1,888	2,532	2,405	1,715	1,606
2,118	3,293	3,004	1,938	1,740
2,377	4,197	3,694	2,160	1,850
2,667	5,239	4,468	2,367	1,920
2,992	6,408	5,315	2,552	1,925
3,358	7,690	6,228	2,714	1,925
3,767	9,072	7,200	2,860	1,925
4,227	10,539	8,227	3,011	1,925
4,743	12,078	9,311	3,198	1,925
5,321	13,684	10,462	3,472	1,975
5,971	15,356	11,698	3,898	2,199
6,699	17,104	13,046	4,559	2,684
7,517	18,943	14,543	5,550	3,538
8,434	20,896	16,228	6,965	4,865
9,463	22,995	18,150	8,908	6,779
10,618	25,275	20,350	11,453	9,358
11,913	27,778	22,879	14,674	12,678
13,367	30,546	25,771	18,597	16,755
14,998	33,620	29,059	23,219	21,575
16,828	37,037	32,760	28,491	27,070
18,881	40,822	36,874	34,320	33,125
21,185	44,990	41,392	40,581	39,591
23,770	49,523	46,272	47,111	46,285
26,670	54,389	51,463	53,737	53,020
29,925	59,512	56,881	60,282	59,614
33,576	64,793	62,425	66,576	65,906
37,673	70,103	67,972	72,477	71,768
42,270	75,294	73,385	77,869	77,109
47,427	80,212	78,520	82,667	81,864
53,215	84,720	83,246	86,832	86,014
59,708	88,690	87,438	90,336	89,544



**Tabla E.1. Distribución de frecuencia acumulada para las mezclas diseñadas a partir de la base 20-25. (cont)**

<b>Xp (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>MA1</b>	<b>MA2</b>	<b>MA3</b>	<b>MA4</b>
<b>66,993</b>	92,055	91,025	93,205	92,481
<b>75,167</b>	94,765	93,952	95,466	94,845
<b>84,339</b>	96,833	96,224	97,177	96,682
<b>94,630</b>	98,302	97,878	98,405	98,041
<b>106,177</b>	99,246	98,980	99,219	98,977
<b>119,132</b>	99,771	99,639	99,713	99,568
<b>133,669</b>	99,983	99,969	99,974	99,891
<b>149,979</b>	100,000	100,000	100,000	99,979
<b>168,279</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>188,812</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>211,851</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>237,700</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>266,704</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>299,247</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>335,761</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>376,730</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>422,698</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>474,275</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>532,145</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>597,077</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>669,931</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>751,675</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>843,393</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>946,303</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>1061,769</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>1191,324</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>1336,688</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>1499,788</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>1682,790</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>1888,122</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>2000,000</b>	100,000	100,000	100,000	100,000

**Tabla E.2. Distribución de frecuencia acumulada para las mezclas diseñadas a partir de la base 40-45.**

Xp ( $\mu\text{m}$ )	MB1	MB2	MB3	MB4
0,021	0,000	0,000	0,000	0,000
0,024	0,000	0,000	0,000	0,000
0,027	0,000	0,000	0,000	0,000
0,030	0,000	0,000	0,000	0,000
0,034	0,000	0,000	0,000	0,000
0,038	0,000	0,000	0,000	0,000
0,042	0,000	0,000	0,000	0,000
0,047	0,000	0,000	0,000	0,000
0,053	0,000	0,000	0,000	0,000
0,060	0,000	0,000	0,000	0,000
0,067	0,000	0,000	0,000	0,000
0,075	0,000	0,000	0,000	0,000
0,084	0,000	0,000	0,000	0,000
0,095	0,000	0,000	0,000	0,000
0,106	0,000	0,000	0,000	0,000
0,119	0,000	0,000	0,000	0,000
0,134	0,000	0,000	0,000	0,000
0,150	0,000	0,000	0,000	0,000
0,168	0,000	0,000	0,000	0,000
0,189	0,000	0,000	0,000	0,000
0,212	0,000	0,000	0,000	0,000
0,238	0,000	0,000	0,000	0,000
0,267	0,000	0,000	0,000	0,000
0,299	0,000	0,000	0,000	0,000
0,336	0,000	0,000	0,000	0,000
0,377	0,000	0,000	0,000	0,000
0,423	0,000	0,000	0,000	0,000
0,474	0,000	0,000	0,000	0,000
0,532	0,000	0,000	0,000	0,000
0,597	0,000	0,000	0,000	0,000
0,670	0,000	0,064	0,060	0,055
0,752	0,041	0,164	0,151	0,141
0,843	0,129	0,310	0,283	0,265
0,946	0,262	0,470	0,429	0,404
1,062	0,422	0,639	0,585	0,553
1,191	0,613	0,807	0,746	0,709

**Tabla E.2. Distribución de frecuencia acumulada para las mezclas diseñadas a partir de la base 40-45 (cont)**

Xp ( $\mu\text{m}$ )	MB1	MB2	MB3	MB4
1,337	0,843	0,972	0,909	0,869
1,500	1,125	1,139	1,077	1,038
1,683	1,478	1,314	1,253	1,217
1,888	1,922	1,511	1,440	1,407
2,118	2,471	1,738	1,636	1,605
2,377	3,135	2,005	1,839	1,802
2,667	3,919	2,320	2,041	1,987
2,992	4,822	2,690	2,237	2,148
3,358	5,840	3,121	2,425	2,279
3,767	6,963	3,620	2,606	2,377
4,227	8,184	4,193	2,784	2,447
4,743	9,491	4,844	2,970	2,501
5,321	10,873	5,582	3,182	2,562
5,971	12,319	6,412	3,448	2,665
6,699	13,822	7,344	3,800	2,858
7,517	15,377	8,389	4,283	3,199
8,434	16,982	9,558	4,940	3,752
9,463	18,640	10,870	5,829	4,592
10,618	20,357	12,344	6,995	5,782
11,913	22,147	14,009	8,497	7,390
13,367	24,027	15,891	10,375	9,464
14,998	26,024	18,026	12,672	12,040
16,828	28,171	20,452	15,417	15,133
18,881	30,505	23,203	18,628	18,735
21,185	33,073	26,319	22,319	22,828
23,770	35,918	29,824	26,480	27,365
26,670	39,092	33,744	31,104	32,303
29,925	42,625	38,078	36,154	37,576
33,576	46,542	42,812	41,587	43,119
37,673	50,840	47,904	47,330	48,857
42,270	55,486	53,283	53,290	54,705
47,427	60,414	58,856	59,352	60,567
53,215	65,524	64,500	65,379	66,338
59,708	70,688	70,079	71,220	71,899
66,993	75,760	75,450	76,736	77,143
75,167	80,584	80,471	81,785	81,957

**Tabla E.2. Distribución de frecuencia acumulada para las mezclas diseñadas a partir de la base 40-45 (cont)**

<b>Xp (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>MB1</b>	<b>MB2</b>	<b>MB3</b>	<b>MB4</b>
<b>84,339</b>	85,017	85,017	86,263	86,252
<b>94,630</b>	88,937	88,986	90,090	89,957
<b>106,177</b>	92,255	92,311	93,226	93,030
<b>119,132</b>	94,931	94,970	95,676	95,469
<b>133,669</b>	96,960	96,971	97,474	97,292
<b>149,979</b>	98,396	98,383	98,699	98,563
<b>168,279</b>	99,307	99,280	99,465	99,383
<b>188,812</b>	99,804	99,779	99,848	99,811
<b>211,851</b>	99,989	99,987	99,980	99,974
<b>237,700</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>266,704</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>299,247</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>335,761</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>376,730</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>422,698</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>474,275</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>532,145</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>597,077</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>669,931</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>751,675</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>843,393</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>946,303</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>1061,769</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>1191,324</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>1336,688</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>1499,788</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>1682,790</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>1888,122</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>2000,000</b>	100,000	100,000	100,000	100,000

**Tabla E.3. Distribución de frecuencia acumulada para las granulometrías bases y las fracciones estrechas.**

Xp ( $\mu\text{m}$ )	A	B	5000rpm	7000rpm
0,021	0,000	0,000	0,000	0,000
0,024	0,000	0,000	0,000	0,000
0,027	0,000	0,000	0,000	0,000
0,030	0,000	0,000	0,000	0,000
0,034	0,000	0,000	0,000	0,000
0,038	0,000	0,000	0,000	0,000
0,042	0,000	0,000	0,000	0,000
0,047	0,000	0,000	0,000	0,000
0,053	0,000	0,000	0,000	0,000
0,060	0,000	0,000	0,000	0,000
0,067	0,000	0,000	0,000	0,000
0,075	0,000	0,000	0,000	0,000
0,084	0,000	0,000	0,000	0,000
0,095	0,000	0,000	0,000	0,000
0,106	0,000	0,000	0,000	0,000
0,119	0,000	0,000	0,000	0,000
0,134	0,000	0,000	0,000	0,000
0,150	0,000	0,000	0,000	0,000
0,168	0,000	0,000	0,000	0,000
0,189	0,000	0,000	0,000	0,000
0,212	0,000	0,000	0,000	0,000
0,238	0,000	0,000	0,000	0,000
0,267	0,000	0,000	0,000	0,000
0,299	0,000	0,000	0,000	0,000
0,336	0,000	0,000	0,000	0,000
0,377	0,000	0,000	0,000	0,000
0,423	0,000	0,000	0,000	0,000
0,474	0,000	0,000	0,000	0,000
0,532	0,000	0,000	0,000	0,000
0,597	0,000	0,000	0,000	0,000
0,670	0,094	0,069	0,000	0,000
0,752	0,237	0,173	0,000	0,000
0,843	0,443	0,322	0,000	0,000
0,946	0,672	0,486	0,000	0,000
1,062	0,920	0,660	0,000	0,000
1,191	1,177	0,836	0,000	0,000

**Tabla E.3. Distribución de frecuencia acumulada para las granulometrías bases y las fracciones estrechas (cont)**

Xp ( $\mu\text{m}$ )	A	B	5000rpm	7000rpm
1,337	1,441	1,010	0,000	0,000
1,500	1,718	1,186	0,000	0,000
1,683	2,016	1,369	0,000	0,000
1,888	2,342	1,563	0,000	0,000
2,118	2,701	1,773	0,000	0,000
2,377	3,095	1,999	0,000	0,000
2,667	3,524	2,241	0,000	0,000
2,992	3,988	2,500	0,000	0,036
3,358	4,494	2,777	0,000	0,200
3,767	5,051	3,078	0,000	0,904
4,227	5,677	3,410	0,000	2,401
4,743	6,392	3,782	0,000	5,042
5,321	7,230	4,213	0,000	9,139
5,971	8,228	4,722	0,000	14,880
6,699	9,435	5,335	0,135	22,319
7,517	10,905	6,087	0,724	31,274
8,434	12,693	7,009	2,133	41,393
9,463	14,862	8,145	4,729	52,099
10,618	17,458	9,532	8,890	62,739
11,913	20,534	11,217	14,847	72,641
13,367	24,114	13,235	22,662	81,243
14,998	28,212	15,626	32,148	88,170
16,828	32,818	18,422	42,851	93,297
18,881	37,889	21,642	54,118	96,708
21,185	43,365	25,307	65,170	98,709
23,770	49,146	29,410	75,245	99,667
26,670	55,120	33,945	83,760	99,990
29,925	61,150	38,877	90,351	100,000
33,576	67,088	44,161	94,982	100,000
37,673	72,787	49,727	97,853	100,000
42,270	78,110	55,485	99,343	100,000
47,427	82,934	61,329	99,940	100,000
53,215	87,174	67,136	100,000	100,000
59,708	90,764	72,768	100,000	100,000



**Tabla E.3. Distribución de frecuencia acumulada para las granulometrías bases y las fracciones estrechas (cont)**

<b>Xp (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>5000rpm</b>	<b>7000rpm</b>
<b>66,993</b>	93,696	78,096	100,000	100,000
<b>75,167</b>	95,977	82,985	100,000	100,000
<b>84,339</b>	97,662	87,325	100,000	100,000
<b>94,630</b>	98,810	91,030	100,000	100,000
<b>106,177</b>	99,530	94,047	100,000	100,000
<b>119,132</b>	99,888	96,376	100,000	100,000
<b>133,669</b>	99,983	98,045	100,000	100,000
<b>149,979</b>	100,000	99,130	100,000	100,000
<b>168,279</b>	100,000	99,760	100,000	100,000
<b>188,812</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>211,851</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>237,700</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>266,704</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>299,247</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>335,761</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>376,730</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>422,698</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>474,275</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>532,145</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>597,077</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>669,931</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>751,675</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>843,393</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>946,303</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>1061,769</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>1191,324</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>1336,688</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>1499,788</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>1682,790</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>1888,122</b>	100,000	100,000	100,000	100,000
<b>2000,000</b>	100,000	100,000	100,000	100,000



**APÉNDICE F:**  
**ALTURA Y MASA DE LOS REVOQUES**



En esta sección se presentan los valores de las alturas y masas medidos para los revoques formados a partir de las diferentes granulometrías.

**Tabla F.1. Alturas promedios y masa de los revoques formados sobre discos porosos.**

Granulometría	Altura hp(mm)	masa (g)
MA1-10	0,2934	10,418
MA2-10	0,3001	11,116
A-10	0,3087	10,52
MA3-10	0,3554	10,796
MA4-10	0,3338	10,452
7000rpm	0,3137	9,618
MA1-20	0,285	10,44
MA2-20	0,3439	10,617
A-20	0,3372	10,778
MA3-20	0,3686	10,318
MA4-20	0,3607	10,377
5000rpm	0,4769	10,819
MB1-10	0,3132	----
MB2-10	0,2426	7,434
B-10	0,33	10,281
MB3-10	0,328	9,828
MB4-10	0,2206	7,2159
MB1-20	0,3132	10,344
MB2-20	0,2426	10,384
B-20	0,33	10,358
MB3-20	0,328	10,571
MB4-20	0,2206	10,545



**APÉNDICE G:**  
**PARÁMETROS ASOCIADOS A LA DTP DE LAS DIFERENTES**  
**GRANULOMETRÍAS**

**Tabla G.1. Parámetros característicos asociados a las distintas granulometrías.**

Granulometría	D <sub>32</sub>	X <sub>50</sub>	%FP (10mic)	%FP(20mic)
MA1	9,79	22,71	6,66	11,87
MA2	10,956	22,6	5,1	8,6
A	12,118	22,83	3,052	5,911
MA3	14,094	23,63	1,61	2,19
MA4	15,135	23,95	0,79	0,764
5000 rpm	19,32	17,12	----	0,04
7000 rpm	9,011	8,74	----	22,319
MB1	12,245	34,81	4,997	9,903
MB2	16,052	37,26	2,149	5,024
B	16,53	35,77	1,767	3,094
MB3	18,607	37,51	1,516	1,759
MB4	19,147	36,41	1,409	0,871