

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

CARACTERIZACIÓN DE MEDIOS POROSOS UTILIZANDO FENÓMENOS DE FLUJO

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 Azuaje A. Andrés E.,
Guevara Q. Jesús M.

Caracas, Junio de 2002

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

“Caracterización de medios porosos utilizando fenómenos de flujo”

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. Anubis Pérez
Jurado

Prof. José Sorrentino
Tutor Académico

Prof. Salvatore Valentino
Tutor Académico



Azuaje A., Andrés E.

Guevara Q., Jesús M.

CARACTERIZACIÓN DE MEDIOS POROSOS UTILIZANDO FENÓMENOS DE FLUJO

Tutores: Ing. Salvatore Valentino, Ing. José A. Sorrentino. Tesis.
Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química.

Año 2002, 175 p.

Palabras Claves: Medios porosos, capilaridad, porosidad, permeabilidad, drenaje capilar, presión capilar.

Resumen: La curva de presión capilar es una serie de estados de equilibrio, donde cada punto representa la cantidad máxima de líquido que es posible remover de un medio poroso a la presión aplicada y para un tiempo lo suficientemente largo para alcanzar una condición de equilibrio. El siguiente trabajo tiene por objeto caracterizar estructuras porosas consolidadas y no consolidadas utilizando el fenómeno de flujo capilar, tomando en cuenta variables macroscópicas tales como porosidad y permeabilidad, así como variables microscópicas, como lo es la curva de distribución de tamaños de poro.

Para llevar a cabo las experiencias, se dividió el trabajo en dos fases, dependiendo del medio poroso que fuera a caracterizarse mediante el fenómeno de flujo capilar. Se trabajó con medios porosos consolidados (discos Fann de 10 μm) y medios porosos no consolidados (Estructura porosas de carbonato de calcio CaCO_3 , con DTP controlada).

En estas dos fases, se determinó para las estructuras porosas consolidadas y no consolidadas la porosidad (por el método de intrusión de



líquido y por el método de densidad), así como también la permeabilidad por el método de permeación para el caso de estructuras porosas consolidadas y por el método de filtración estática (formación de torta) para las estructuras porosas no consolidadas.

En la primera fase, las estructuras porosas consolidadas fueron sometidas a pruebas de velocidad de drenaje capilar llevadas a cabo en la celda HPHT (High Pressure High Temperature). Las curvas obtenidas en estas pruebas fueron ajustadas por el Modelo de Nicolaou. Posteriormente, a partir de los datos de drenaje se generaron curvas de presión capilar, que fueron ajustadas mediante el Modelo Potencial y el Modelo de Rosin - Rammler. Por último, se realizaron Curvas de Distribución de Tamaños de Poro a partir del Modelo de distribución en volumen de poro y el Modelo de distribución en números de poro.

Por otra parte, las estructuras porosas no consolidadas fueron sometidas a pruebas de velocidad de drenaje capilar en el equipo Filtratest-UCV; posteriormente se obtuvieron curvas de presión capilar y curvas de distribución de tamaños de poro, ajustadas por los modelos mencionados anteriormente. Además, se obtuvieron curvas de consumo de gas en el equilibrio.

Las principales conclusiones que se pueden mencionar son: a) La porosidad de las tortas es mayor que la del disco; b) La porosidad de las tortas no varía con la presión; c) Las fracciones estrechas presentan mayor porosidad que la mezcla formada entre ellas; d) La porosidad y la permeabilidad aumentan con el aumento de la mediana (X_{50}) y el aumento del $D_{3,2}$; e) La porosidad y la permeabilidad disminuyen con el aumento de la desviación estándar; f) A medida que aumenta el tamaño de partícula disminuye la presión capilar de entrada (P_{ke}); g) Tanto el modelo potencial como el modelo de Rosin-Rammler adaptado proporcionan un buen ajuste para la curva de presión capilar del disco poroso.



ÍNDICE GENERAL

	Página
Índice de Tablas.....	ix
Índice de Figuras.....	x
Lista de Símbolos.....	xiii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1. Objetivo general.....	3
2.2. Objetivos específicos.....	3
3. MARCO TEÓRICO.....	4
3.1. Estructura Porosa.....	4
3.2. Porosidad.....	5
3.2.1. Métodos para determinar la porosidad.....	5
3.3. Permeabilidad.....	7
3.3.1. Métodos para determinar la permeabilidad.....	7
3.3.1.1. Método de Permeación (Medios porosos consolidados).....	7
3.3.1.2. Método de Filtración estática (Medios no consolidados).....	9
3.3.1.2.1. Relación entre la altura de la estructura porosa y el volumen de filtrado.....	10
3.3.1.2.2. Ecuación fundamental para la formación de la torta.....	11
3.3.1.2.3. Determinación de la resistencia específica de la torta (r_c) y del medio filtrante (R_m) a presión constante.....	13
3.4. Drenaje capilar.....	13
3.4.1. Términos asociados al proceso de drenaje.....	16
3.4.1.1. Humedad (H).....	16
3.4.1.2. Saturación (S).....	16
3.4.1.3. Relación entre la humedad y la saturación.....	16
3.5. Velocidad de drenaje capilar.....	18
3.6. Fenómeno de capilaridad (Presión capilar).....	19
3.7. Equilibrio del proceso de drenaje capilar (Curva de presión capilar).....	22
3.8. Modelos matemáticos para la curva de presión capilar.....	25
3.8.1. Modelo de Brook-Corey.....	25



3.8.2. Modelo de Wakeman.....	26
3.8.3. Modelo Potencial con ajuste por parámetros libres.....	27
3.8.4. Modelo adaptado de Rosin-Rammler.....	28
3.9. Curvas de distribución de tamaño de poro.....	29
3.9.1. Distribución acumulada de tamaño de poro en volumen.....	29
3.9.2. Distribución acumulada en números de tamaños de poro.....	30
3.10. Definición de tamaño de partícula.....	38
3.11. Distribución de tamaño de partícula.....	38
3.11.1. Curvas de distribución.....	39
3.11.2. Medidas de tendencia central.....	41
3.11.2.1. Mediana (X_{50}).....	41
3.11.2.2. La moda (MD).....	42
3.11.2.3. Diámetro equivalente superficie- volumen ($D_{3,2}$).....	42
3.11.3. Medidas de dispersión.....	43
3.11.3.1. La desviación estándar.....	43
4. ANTECEDENTES.....	44
5. DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS.....	48
5.1. Tamizador vibrante.....	48
5.2. Tamizador en seco.....	49
5.3. Clasificador centrífugo.....	51
5.4. Filtratest-UCV.....	53
5.5. Equipo de filtración estática HPHT.....	56
5.6. Mastersizer 2000.....	58
5.7. Micrómetro.....	59
5.8. Divisor de muestra.....	60
5.9. Balanza.....	61
6. PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES.....	63
6.1. Uso del tamizador vía húmeda.....	63
6.2. Uso del clasificador centrífugo.....	63
6.3. Uso del filtratest-UCV.....	64
6.3.1. Conexión del sistema de suministro de aire al equipo filtratest.....	64
6.3.2. Uso del equipo filtratest-UCV.....	65
6.4. Uso del Mastersizer.....	67
6.4.1 Medición de la distribución de tamaño de partícula.....	67



7. METODOLOGÍA Y PLAN DE EXPERIENCIAS.....	69
7.1. Medios consolidados.....	69
7.2. Medios no consolidados.....	73
8. ANÁLISIS DE DATOS.....	77
8.1. Medios porosos consolidados.....	77
8.1.1 Obtención de los datos de porosidad.....	77
8.1.2. Obtención de los datos de permeabilidad.....	78
8.1.3. Obtención de los datos para la curva de cinética de drenaje y presión capilar.....	80
8.2. Medios porosos no consolidados.....	81
8.2.1 Distribución de tamaño de partícula (DTP) para las fracciones estrechas.....	81
8.2.2 Distribución de tamaño de partícula para las fracciones seleccionadas.....	84
8.2.3. Distribución de tamaño de partícula (DTP) para la mezcla.....	85
8.2.3.1. Diseño y simulación de la mezcla.....	85
8.2.3.2. Distribución de tamaño de partícula (DTP) para la mezcla diseñada.....	86
8.2.4 Obtención de los datos de porosidad.....	87
8.2.5. Obtención de los datos de permeabilidad.....	88
8.2.6. Obtención de los datos para la curva de cinética de drenaje y presión capilar.....	88
8.2.7. Obtención de datos de consumo de gas.....	89
9. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	90
9.1. Medios porosos consolidados.....	90
9.1.1 Porosidad (ϵ) del disco de 10 μ m.....	90
9.1.2. Permeabilidad específica (k) del disco de 10 μ m.....	91
9.1.3. Curvas de drenaje capilar.....	92
9.1.4. Curva de presión capilar.....	95
9.1.4.1. Estimación de los parámetros de la curva de presión capilar.....	96
9.1.4.1.1 Modelo potencial con ajuste por parámetros libres.....	96
9.1.4.1.2 Modelo adaptado de Rosin-Rammler.....	98
9.1.5. Curva de distribución de tamaño de poro.....	101
9.1.5.1. Distribución volumétrica de tamaños de poro.....	101
9.1.5.2. distribución en número de tamaño de poro (Modelo de Nicolaou).....	103
9.2. Medios porosos no consolidados.....	104



9.2.1 Porosidad.....	104
9.2.2. Permeabilidad.....	111
9.2.3. Curvas de drenaje capilar.....	115
9.2.4. Consumo de gas.....	117
9.2.5. Curva de presión capilar.....	119
9.2.5.1. Modelo potencial con ajuste por parámetros libres.....	119
9.2.5.2. Modelo adaptado de Rosin-Rammler.....	123
9.2.5.3 Comparación de los dos modelos de ajuste para la curva de presión capilar.....	126
9.2.6. Curva de distribución de tamaño de poro.....	131
9.2.6.1. Distribución volumétrica de tamaños de poro.....	131
9.2.6.2. Distribución en número de tamaño de poro (Modelo de Nicolaou).....	132
9.2.7. Comparación entre la distribución de tamaño de poro del disco y las tortas de filtración.....	133
10. CONCLUSIONES.....	135
11. RECOMENDACIONES.....	138
12. BIBLIOGRAFÍA.....	139
13. APENDICES.....	142
Apéndice A. Análisis granulométrico.....	142
Apéndice B. Valores experimentales de las pruebas de drenaje capilar.....	144
Apéndice C. Curvas de velocidad de drenaje capilar y cálculos tipo.....	156
Apéndice D. Porosidad de las estructuras porosas no consolidadas.....	160
Apéndice E. Permeabilidad de las estructuras porosas no consolidadas.....	162
Apéndice F. Distribución de tamaños de poro de las estructuras porosas no consolidadas.....	165
Apéndice G. Consumo de gas de las estructuras porosas no consolidadas.....	169
Apéndice H. Parámetros de la curva de presión capilar para los dos modelos de ajuste.....	173
Apéndice I. Datos necesarios para calcular la porosidad y la permeabilidad del disco.....	174



ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla N° 1. Unidades del coeficiente de permeabilidad.....	12
Tabla N° 2. Distribuciones de tamaños de partícula.....	39
Tabla N° 3. Aberturas en mesh para los tamices.....	48
Tabla N° 4. Características granulométricas de las fracciones estrechas mayores de 38 μm	82
Tabla N° 5. Características granulométricas de las fracciones estrechas menores de 38 μm	82
Tabla N° 6. Características granulométricas de las fracciones estrechas y la mezcla utilizada.....	87
Tabla N° 7. Porosidad del disco de 10 μm	90
Tabla N° 8. Permeabilidad del disco poroso de 10 μm	91
Tabla N° 9. Distribución de tamaño de partícula para las fracciones estrechas mayores de 38 μm	142
Tabla N° 10. Distribución de tamaño de partícula para las fracciones estrechas menores de 38 μm	143
Tabla N° 11. Datos experimentales de las tortas de filtración para la fracción de finos.....	144
Tabla N° 12. Datos experimentales de las tortas de filtración para la fracción de intermedios.....	146
Tabla N° 13. Datos experimentales de las tortas de filtración para la fracción de gruesos.....	148
Tabla N° 14. Datos experimentales de las tortas de filtración para la mezcla amplia.....	150
Tabla N° 15. Datos experimentales para el disco poroso de 10 μm	152
Tabla N° 16. Parámetros de la curva de presión capilar para el disco poroso de 10 μm	173
Tabla N° 17. Parámetros de la curva de presión capilar para el Modelo potencial.....	173
Tabla N° 18. Parámetros de la curva de presión capilar para el Modelo Rosin-Rammler adaptado.....	173
Tabla N° 19. Datos necesarios para calcular la porosidad del disco de 10 μm	175



ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura N° 1. Estructura porosa.....	4
Figura N° 2. Formación de una estructura porosa.....	10
Figura N° 3. Drenaje capilar por presión de gas y por compresión.....	15
Figura N° 4. Cinética de drenaje capilar.....	19
Figura N° 5. Meniscos en los fluidos inmiscibles.....	20
Figura N° 6. Contacto entre fases dentro de un tubo capilar.....	21
Figura N° 7. Curva de presión capilar.....	23
Figura N° 8. Relación entre la curva de velocidad de drenaje capilar y la curva de presión capilar.....	24
Figura N° 9. Determinación de los parámetros ξ y P_{ke} , según el Modelo de Corey.....	26
Figura N° 10. Variación de la saturación de equilibrio.....	30
Figura N° 11. Representación de los poros de la estructura porosa...	31
Figura N° 12. Curva típica de Densidad de Distribución.....	40
Figura N° 13. Curva típica de Distribución Acumulada.....	41
Figura N° 14. Representación de la moda y mediana.....	42
Figura N° 15. Tamizador vibrante.....	49
Figura N° 16. Tamizador en seco.....	50
Figura N° 17. Clasificador centrífugo.....	52
Figura N° 18. Filtratest-UCV.....	53
Figura N° 19. Piezas de la base de la celda.....	55
Figura N° 20. Equipo de filtración estática.....	57
Figura N° 21. Celda HPHT.....	57
Figura N° 22. Mastersizer 2000.....	58
Figura N° 22.1. Mastersizer 2000 empleado en el LSM.....	59
Figura N° 23. Micrómetro.....	60
Figura N° 24. Divisor de muestra.....	61
Figura N° 25. Balanza con desecador infrarrojo.....	62
Figura N° 26. Curva de permeación para el disco poroso de 10 μm ...	79
Figura N° 27. Curvas de distribución de frecuencia acumulada de las fracciones de carbonato.....	83
Figura N° 28. Curvas de distribución de frecuencia acumulada para las fracciones estrechas seleccionadas.....	84
Figura N° 29. Curvas de distribución de frecuencia acumulada para las fracciones estrechas seleccionadas y la mezcla amplia.....	86
Figura N° 30. Curva de drenaje capilar para el disco poroso de 10 μm	92
Figura N° 31. Curva de drenaje capilar utilizando membrana.....	93
Figura N° 32. Velocidad inicial de drenaje.....	94



Figura N° 33. Curva de presión capilar para el disco de 10 μm obtenida experimentalmente.....	95
Figura N° 34. Curva de presión capilar y ajuste por el Modelo Potencial.....	97
Figura N° 35. Curva de presión capilar y ajuste por el Método de Rosin – Rammler.....	99
Figura N° 36. Curva de presión capilar y ajuste por los dos modelos utilizados.....	100
Figura N° 37. Curva de Distribución Acumulada de Tamaño de Poro en volumen a partir de la curva de presión capilar.....	102
Figura N° 38. Curva de distribución en número de poro obtenida por el Modelo de Nicolaou.....	103
Figura N° 39. Variación de la porosidad con la presión para la fracción de finos.....	105
Figura N° 40. Variación de la porosidad con la presión para la fracción de finos (escala acotada).....	106
Figura N° 41. Porosidad de todas las granulometrías utilizadas.....	107
Figura N° 42. Variación de la porosidad promedio con la desviación estándar geométrica.....	108
Figura N° 43. Variación de la porosidad promedio con la mediana.....	109
Figura N° 44. Variación de la porosidad promedio con el $D_{3,2}$	110
Figura N° 45. Permeabilidad de todas las fracciones utilizadas.....	111
Figura N° 46. Variación de la permeabilidad con la desviación estándar geométrica.....	112
Figura N° 47. Variación de la permeabilidad con la mediana.....	113
Figura N° 48. Variación de la permeabilidad con el $D_{3,2}$	114
Figura N° 49. Cinética de Drenaje capilar para la Mezcla.....	115
Figura N° 50. Velocidad de drenaje a ΔP fijo (400 mbar) para todas las granulometrías utilizadas.....	116
Figura N° 51. Consumo de Gas para la Mezcla.....	117
Figura N° 52. Consumo de Gas en el equilibrio para todas las fracciones utilizadas y la mezcla.....	118
Figura N° 53. Curva de presión capilar y ajuste por el modelo potencial para todas las granulometrías estudiadas.....	119
Figura N° 54. Variación de la presión capilar de entrada (P_{ke}) con respecto al tamaño de partícula.....	120
Figura N° 55. Variación de la Saturación remanente (S_r) con respecto al tamaño de partícula.....	121
Figura N° 56. Variación del factor de distribución de Tamaño de Poro con respecto a la desviación estándar geométrica.....	121
Figura N° 57. Variación del Factor de Distribución del Tamaño de Poro con respecto al Tamaño de Partícula.....	122
Figura N° 58. Curva de presión capilar y ajuste por el modelo de Rosin-Rammler para todas las granulometrías.....	123



Figura N° 59. Variación de la presión asociada a la presión capilar promedio (P_k') con respecto al Tamaño de Partícula..	124
Figura N° 60. Variación de la Saturación Remanente (S_r) con respecto al tamaño de partícula.....	125
Figura N° 61. Variación del factor de Distribución del Tamaño de poro (ξ) con respecto a la desviación estándar geométrica.....	125
Figura N° 62. Variación del factor de Distribución del Tamaño de poro (ξ) con respecto al tamaño de partícula.....	126
Figura N° 63. Curva de presión capilar ajustada por Parámetros Libres y Rosin-Rammler para la fracción de finos.....	127
Figura N° 64. Curva de presión capilar ajustada por Parámetros Libres y Rosin-Rammler para la fracción de Intermedios.....	128
Figura N° 65. Curva de presión capilar ajustada por Parámetros Libres y Rosin-Rammler para la fracción de Gruesos..	129
Figura N° 66. Curva de presión capilar ajustada por Parámetros Libres y Rosin-Rammler para la Mezcla.....	130
Figura N° 67. Curva de distribución Acumulada de Tamaño de Poro para todas las granulometrías utilizadas.....	131
Figura N° 68. Curva de Distribución Acumulada en número de Poro para todas las granulometrías utilizadas.....	132
Figura N° 69. Curva de distribución Acumulada de Tamaño de Poro para todas las granulometrías utilizadas y el disco.....	133
Figura N° 70. Curva de Distribución Acumulada en número de Poro para todas las granulometrías utilizadas y el disco.....	134



LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado	Dimensiones
a	Parámetro del Modelo de Nicolaou	-
A	Area	L^2
A_T	Area de la sección transversal de la estructura porosa	L^2
b	Parámetro del Modelo de Nicolaou	-
C_V	Coficiente de variación	-
d_H	Diámetro hidráulico	L
$d_{Hmáx}$	Diámetro máximo	L
DS	Desviación estándar	L
DS_g	Desviación estándar geométrica	L
D_p	Diámetro de partícula	L
dP	Diámetro de poro	L
$dP_{máx}$	Diámetro de poro máximo	L
$D_{3,2}$	Diámetro equivalente superficie-volumen	L
dV_L/dt	Variación de la velocidad de filtración	L/θ
$F(d_p)$	Distribución de tamaño de poros acumulada	-
$F(d_p)$	Distribución de tamaño de poros	-
$f(X)$	Densidad de distribución	-
$F(X)$	Frecuencia acumulada	-
$F(X)$	Función de porcentaje acumulativo de Rosin-Rammler	-
$F_3(r_H)$	Función de Rosin-Rammler adaptada	-
g	Aceleración de gravedad	L/θ^2
H	Humedad de la estructura porosa	-
h_C	Altura de la estructura porosa	L
h_{co}	Altura de la estructura porosa cuando no se le ha aplicado un diferencial de presión	L
L	Profundidad o espesor del lecho	L
k	Permeabilidad específica	L^2
k_C	Constante de concentración	-
K_D	Coficiente de proporcionalidad de Darcy	$L^2M/(L.\theta)$
MD	Moda	L
M_{LT}	Masa de líquido en la estructura porosa	M



Lista de Símbolos

M_p	Masa del plato	M
M_S	Masa de sólido seco	M
n	Constante del Modelo Rosin-Rammler	-
n_{tot}	Número total de poros en la estructura	-
P_k	Presión capilar	$M/(L.\theta^2)$
P_{ke}	Presión capilar de entrada	$M/(L.\theta^2)$
P_{ki}	Presión capilar para un radio de tamaño i	$M/(L.\theta^2)$
P_k'	Presión capilar representativa para el Modelo Rosin-Rammler	$M/(L.\theta^2)$
Q	Volumen de líquido que atraviesa la estructura porosa en un tiempo determinado	L^3/θ
q	Velocidad de filtración	L/θ
Q_o	Distribución acumulada de tamaños de poro	-
q_o	Distribución de frecuencia de tamaños de poro	-
R	Radio de curvatura del menisco	L
r	Radio del capilar	L
r_C	Resistencia específica de la estructura porosa	$1/L^2$
R_m	Resistencia del medio filtrante	$1/L$
r_H	Radio hidráulico	L
r_i	Radio de tamaño i	L
r^*	Radio de poro adimensionalizado	-
$R_{máx}^*$	Radio de poro que corresponde al valor de presión capilar de entrada	-
$R_{mín}^*$	Radio de poro adimensionalizado que corresponde al valor de saturación remanente	-
S	Saturación	-
S_r	Saturación remanente	-
S_∞	Saturación de equilibrio	-
S_∞'	Saturación relativa a la saturación de equilibrio	-
S_∞^*	Saturación relativa a la remanente	-
t	Tiempo de filtración	θ
V_{EV}	Volumen de espacios vacíos de la estructura porosa	L^3
V_L	Volumen de filtrado	L^3



Lista de Símbolos

V_{LT}	Volumen de líquido en la estructura porosa	L^3
V_S	Volumen ocupado por el sólido	L^3
V_T	Volumen total de la estructura porosa	L^3
V_{VT}	Volumen de espacios vacíos en la estructura porosa	L^3
\bar{X}	Media aritmética	L
X	Tamaño de partícula	L
X_R	Constante del Modelo de Rosin-Rammler referido a un tamaño de partícula	L
X_{50}	Mediana	L
α	Resistencia específica de la estructura porosa	L/M
δ	Angulo de mojado	-
ΔP_L	Gradiente de presión existente entre los dos extremos de la estructura porosa	$M/(L.\theta^2)$
ΔP	Diferencia de presión aplicada al sistema	$M/(L.\theta^2)$
ΔP_C	Diferencia de presión aplicada a la estructura porosa	$M/(L.\theta^2)$
ΔP_m	Diferencia de presión en el medio filtrante	$M/(L.\theta^2)$
ε	Porosidad	-
ε^*	Porosidad efectiva	-
ε_S	Solidosidad	-
λ	Parámetro del Modelo de Brook-Corey	-
μ_C	Viscosidad de la estructura porosa	$M/(L.\theta)$
μ_L	Viscosidad del filtrado	$M/(L.\theta)$
ξ	Factor de distribución de tamaño de poro	-
ρ_{mp}	Densidad de un medio poroso	M/L^3
ρ_L	Densidad del líquido	M/L^3
ρ_S	Densidad del sólido	M/L^3
σ	Tensión superficial	$M.L/(\theta^2.L)$



1. INTRODUCCIÓN

El Laboratorio de Separaciones Mecánicas de la Universidad Central de Venezuela (LSM–UCV) ha venido realizando una serie de investigaciones a fin de determinar la influencia que tiene la distribución de tamaño de partículas de sólidos sobre la curva de presión capilar obtenida durante el proceso de drenaje de medios porosos no consolidados, la cual genera de modo indirecto la distribución de tamaños de poros existentes en la misma. Entre los principales trabajos que se pueden mencionar se tienen: Guada - Trocóniz (en 1996), Arias - Ugas (en 1998), Cayama (en 1999); ninguno de estos trabajos realizó experiencias en otro tipo de medio poroso que no fueran estructura porosas de carbonato de calcio, por lo que uno de los objetivos del presente trabajo consiste en caracterizar medios porosos consolidados (discos porosos) y medios porosos no consolidados (tortas de CaCO_3).

Estas caracterizaciones se llevaron a cabo determinando de forma experimental la curva de presión capilar de medios porosos mediante el fenómeno de flujo capilar y obtener a partir de las mismas la Distribución de Tamaños de Poro, aplicando modelos de distribución tanto en volumen como en número de poro. Se debe recordar que, la curva de presión capilar es una serie de estados de equilibrio, donde cada punto representa la cantidad máxima de líquido que es posible extraer de un medio poroso a la presión aplicada y para un tiempo lo suficientemente largo para alcanzar una condición de equilibrio.

Existen algunos modelos matemáticos que han sido empleados para representar la curva de presión capilar como función de tres parámetros importantes: la presión capilar de entrada (P_{ke}), la saturación remanente (S_r) y el factor de distribución de tamaños de poro (ξ); estos modelos han sido estudiados y modificados, pero aún no ha sido establecida la relación entre las características de la suspensión (Distribución de Tamaño de Partícula) y



Introducción

las de la Estructura porosa (Distribución de Tamaño de Poro). Además, estos modelos no han sido utilizados en ningún trabajo anterior en el estudio de medios consolidados (discos porosos). En este trabajo se emplea el modelo de Nicolaou para ajustar curvas de velocidad de drenaje capilar y los modelos Potencial y Rosin - Rammler en el ajuste de curvas de presión capilar, para medios porosos consolidados y no consolidados.

Para poder cumplir con los objetivos, se llevaron a cabo pruebas de drenaje capilar en los equipos HPHT y Filtratec - UCV, para medios porosos consolidados (discos de 10 μm) y medios porosos no consolidados (tortas de fracciones estrechas incluyendo una mezcla amplia).

Se han realizado trabajos anteriores, que involucran parámetros relacionados con el presente trabajo; pero estos estudios continúan, ya que existen interrogantes sobre como influye la Distribución de Tamaños de Partícula en el proceso de separación sólido - líquido y en todos los parámetros que caracterizan el flujo de fluidos a través de estructuras porosas, como lo son para este caso la presión capilar de entrada (P_{ke}), la saturación remanente (S_r), la porosidad del medio (ε), la permeabilidad (k), la distribución de tamaños de poro y el consumo de gas (Q), por lo tanto se trata de aclarar esta influencia en los estudios realizados en este trabajo.



2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Caracterizar estructuras porosas consolidadas y no consolidadas utilizando el fenómeno de flujo capilar, para obtener curvas de distribución de tamaño de poro, que permitan establecer relaciones entre los tamaños de partículas y los diámetros capilares de las estructuras.

2.2 Objetivos específicos

1. Determinar experimentalmente las permeabilidades al flujo de líquido de distintas estructuras porosas consolidadas y no consolidadas.
2. Determinar experimentalmente la porosidad de distintas estructuras porosas consolidadas y no consolidadas.
3. Determinar las curvas de presión capilar de distintas estructuras porosas consolidadas y no consolidadas.
4. Emplear diferentes métodos para el ajuste de la curva de presión capilar de las estructuras porosas seleccionadas: Modelo Potencial con ajuste por Parámetros libres y Modelo de Rosin-Rammler adaptado.
5. Establecer tendencias experimentales entre las curvas de presión capilar y la distribución de tamaño de partícula, tomando como referencia desviación estándar geométrica (DS_g), Mediana (X_{50}) y $D_{3,2}$.
6. Determinar a partir de la información de las curvas de presión capilar, las curvas de distribución de tamaño de poro aplicando los modelos de distribución en volumen y distribución en número de poros (Modelo de Nicolaou).
7. Establecer tendencias entre las curvas de distribución de tamaño de partícula y las curvas de distribución de tamaño de poro.
8. Establecer tendencias experimentales entre la curva de flujo de gas en el equilibrio y la distribución de tamaño de partícula.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Estructura Porosa

Una estructura porosa es un cuerpo de sólido que contiene espacios vacíos llamados poros. Estas se clasifican en consolidadas y no consolidadas. En las estructuras porosas consolidadas las partículas que la conforman están unidas entre sí y no pueden separarse fácilmente (ej. Disco Poroso); mientras que en las estructuras porosas no consolidadas las partículas están solamente adheridas y pueden separarse fácilmente (por ejemplo, tortas de Carbonato de Calcio).

Los poros, que no son más que los espacios vacíos de la estructura, no poseen una geometría regular por lo tanto es necesario definir algunos elementos que lo conforman. El Cuerpo de poro es el espacio perteneciente al poro donde se acumula o retiene la mayor cantidad de líquido y el Cuello de poro es aquel espacio que permite desalojar el líquido presente en el cuerpo de poro y representa la mínima distancia existente entre dos partículas sólidas adyacentes. En la figura N° 1 se muestra una estructura porosa donde se pueden observar los elementos que conforman a un poro.

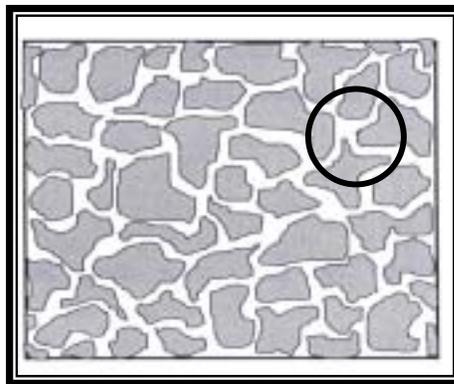


Figura N° 1. Estructura Porosa



3.2 Porosidad

Es la relación entre el volumen de espacios vacíos de la estructura porosa y el volumen total de la misma.

$$\varepsilon = \frac{V_{EV}}{V_T} \quad (1)$$

Otro parámetro importante de las estructuras porosas es la solidosidad que es la fracción del volumen de la estructura porosa ocupada por el sólido y se define por la siguiente expresión

$$\varepsilon_S = 1 - \varepsilon \quad (2)$$

3.2.1. Métodos para determinar la Porosidad

La porosidad puede ser medida por una gran variedad de métodos. En todos estos métodos el propósito es medir de alguna manera el volumen vacío y el volumen total del material. [Scheideger, 1970]

3.2.1.1 Método de densidad: Si la densidad ρ_s de un material sólido que conforma la estructura porosa es conocida, entonces la densidad total ρ_{mp} del último, es descrita por la porosidad fraccional ε como sigue:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{mp}}{\rho_s} \quad (3)$$

La densidad total puede ser obtenida por varias vías. Una de las vías es utilizar un método de desplazamiento volumétrico. El método de desplazamiento volumétrico puede ser mejorado si el medio poroso es revestido de un material apropiado antes de la inmersión (Melcher, 1921).

3.2.1.2 Método directo: El método más directo de determinar la porosidad es medir el volumen total de una pieza de material poroso y



entonces compactar el cuerpo y así destruir todos los espacios vacíos, y medir la diferencia en volumen.

3.2.1.3 Métodos ópticos: Otra vía directa para determinar la porosidad es simplemente mirar una sección del medio poroso con un microscopio. La razón de que un valor de porosidad pueda ser obtenido en esta manera es que la porosidad plana de una sección aleatoria debe ser la misma que la del medio poroso. No siempre es posible hacer secciones de un medio poroso convenientemente. Se pueden encontrar dificultades especialmente si los medios porosos son dispersos (no consolidados).

3.2.1.4 Método de expansión de gas: El principio básico del método de expansión de gas es la medida directa del volumen de sólido. Esto se lleva a cabo por evacuación continua de aire fuera de la cámara que contiene al medio poroso. La presión del sistema es leída y permite un cálculo inmediato por las leyes de los gases (Boyle-Mariotte) del volumen de sólido presente en la estructura porosa.

3.2.1.5 Otros métodos: además de los descritos anteriormente han sido propuestos nuevos métodos para medir la porosidad. Un método semejante al de expansión de gas es la adsorción de líquidos en la superficie interna; el área interna puede ser determinada, y si la geometría del poro es conocida, también lo será la porosidad.



3.3. Permeabilidad

La permeabilidad de un medio poroso se puede definir como la facilidad con que un fluido fluye a través de la red de poros que lo conforman, por lo tanto, depende de la estructura de dicho medio poroso.

Puede decirse que entre los factores que afectan la permeabilidad se incluyen el tamaño de partículas que constituye la estructura porosa y la porosidad de la misma.

3.3.1 Métodos para determinar la Permeabilidad

3.3.1.1 Método de Permeación (Medios Consolidados)

Si a través de una estructura porosa que ya ha sido formada (h_c constante) se hace fluir o permear un líquido libre de sólidos, la velocidad de flujo está regida por la Ley de Darcy [Magual, 1998]:

El concepto fundamental de esta ley es que la cantidad transferida es directamente proporcional a la fuerza impulsora e inversamente proporcional a la resistencia de la estructura porosa.

$$\text{Densidad de Flujo} = \frac{\text{Fuerza impulsora}}{\text{Resistencia}}$$

La Ley de Darcy relaciona la caída de presión en un lecho poroso con el caudal de líquido que lo atraviesa. El caudal de líquido que pasa a través de un lecho poroso es directamente proporcional al gradiente de presión aplicado y al área de flujo, e inversamente proporcional al espesor del lecho:



$$Q = K_D \cdot \frac{A \cdot \Delta P_L}{h_c} \quad (4)$$

Se puede separar el efecto de la viscosidad del efecto de las características del lecho, apareciendo el concepto de permeabilidad específica del lecho o simplemente permeabilidad, k :

$$q = \frac{Q}{A} = \frac{k}{\mu_L} \cdot \frac{\Delta P_L}{h_c} \quad (5)$$

La velocidad de filtración, q , es directamente proporcional a la fuerza impulsora e inversamente proporcional a la resistencia del medio poroso lo cual puede escribirse como

$$q = \frac{\Delta P_L}{\mu_L \cdot h_c / k} = \frac{\Delta P_L}{\mu_L \cdot h_c \cdot r_c} \quad (6)$$

De este modo se introduce el concepto de resistencia específica de la estructura porosa, r_c , como el inverso de la permeabilidad:

$$r_c = \frac{1}{k} \quad (7)$$

si colocamos la velocidad de flujo en función del volumen de líquido permeado obtenemos la siguiente relación:

$$\frac{dV_L}{dt} = \frac{A \cdot \Delta P}{\mu_L \cdot r_c \cdot h_c} \quad (8)$$

En virtud de que todos los términos del lado derecho de esta ecuación permanecen constantes, el caudal es también constante, por lo que un gráfico volumen de líquido permeado contra tiempo debe dar una línea recta que pasa por el origen.



3.3.1.2 Método de Filtración Estática (Medios No Consolidados)

Filtración: La filtración es la separación de una mezcla de sólidos y fluidos que incluye el paso de la mayor parte del fluido a través de un medio poroso, que retiene la mayor parte de las partículas sólidas contenidas en la mezcla. La filtración se realiza mediante un equipo llamado filtro. El medio filtrante es la barrera que permite que pase el líquido, mientras se retiene la mayor parte de los sólidos. El líquido que pasa a través del medio filtrante se conoce como filtrado. [Perry, 1992]

El proceso de filtración a emplear en este estudio requiere de un gradiente de presión para poder realizarse.

Para el caso de filtración estática por formación de la estructura porosa, al aplicar la ecuación fundamental de Darcy deben hacerse las siguientes simplificaciones:

- a) Considerar el régimen de flujo laminar y que el fluido atraviesa perpendicularmente la sección transversal de filtración en dirección inversa a la que crece la estructura porosa.
- b) Suponer que el gradiente de presión sólo existe en la dirección del flujo.
- c) Despreciar la fuerza impulsora debida a la columna de líquido frente al gradiente de presión.

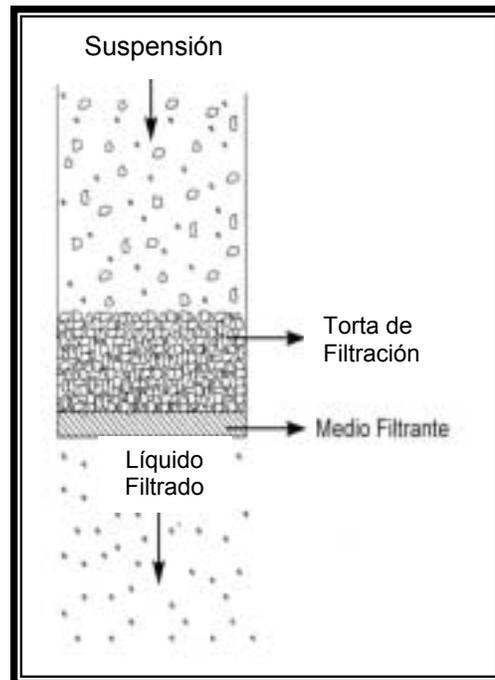


Figura N° 2. Formación de una estructura porosa por el método de filtración [Sorrentino, 1998]

3.3.1.2.1. Relación entre la altura de la estructura porosa y el volumen de filtrado

La ecuación de Darcy para una estructura porosa que va creciendo con el tiempo representa una ecuación diferencial donde tanto el volumen de filtrado (V_L) como la altura de la torta (h_C) varían con el tiempo:

$$q = \frac{1}{A} \cdot \frac{dV_L}{dt} = \frac{\Delta P_L}{\mu_L \cdot r_C \cdot h_C} \quad (9)$$

Debido a esto, es imprescindible establecer una relación entre la cantidad de filtrado producida y la cantidad de estructura porosa depositada. Para ello se realiza un balance de masa para un elemento de estructura



porosa depositado. Suponiendo que la masa de sólidos depositada en la estructura porosa 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 estructura porosa, la expresión diferencial referente a la ecuación N° 9 es la siguiente:

$$\kappa = \frac{A \cdot dh_c}{dV_L} = \frac{C_v}{1 - \varepsilon - C_v} = \frac{C_v}{\varepsilon_s - C_v} = \frac{1}{\varepsilon_s / C_v - 1} \quad (10)$$

3.3.2.1.2. Ecuación fundamental para la formación de la torta

Una torta de filtración es incompresible cuando la resistencia específica y la porosidad pueden considerarse constantes con la variación de la caída de presión. Si se reordena e integra la ecuación de Darcy (ecuación N °4), se puede obtener la siguiente relación de la caída de presión en el lecho con la altura de la estructura porosa [Sorrentino, 1998]:

$$\Delta P_c = r_c \cdot \mu_L \cdot q \cdot h_c \quad (11)$$

Sin embargo, lo que usualmente se mide es la caída de presión total aplicada al sistema que incluye el medio filtrante. Por lo tanto, se debe tomar en cuenta adicionalmente la resistencia del medio filtrante, R_m :

$$R_m = \frac{\Delta P_m}{\mu_L \cdot q} \quad (12)$$

donde ΔP_m es la caída de presión en el medio filtrante. En consecuencia, la diferencia de presión total que se aplica al sistema es

$$\Delta P = \Delta P_c + \Delta P_m = (r_c \cdot h_c + R_m) \cdot \mu_L \cdot q \quad (13)$$



La combinación de esta ecuación con la relación entre volumen de filtrado y volumen de torta (ecuación N° 10), permite obtener la ecuación básica o fundamental que rige la filtración bajo condiciones estáticas:

$$\frac{1}{A} \cdot \frac{dV_L}{dt} = \frac{\Delta P_L}{\mu_L \cdot (r_C \cdot \frac{K_c}{A} \cdot V_L + R_m)} \quad (14)$$

Si en vez de considerar que existe una relación entre el volumen de estructura porosa y el volumen de filtrado, se dice que la relación es entre la masa de estructura porosa depositada y el volumen de líquido filtrado (lo cual es en esencia lo mismo), aparece el concepto de otra resistencia específica de la estructura porosa, α , cuya relación con r_C es:

$$r_C = \alpha \cdot \rho_S \cdot \varepsilon \quad (15)$$

Tanto r_C como α representan la resistencia específica de la estructura porosa, pero están expresadas en distintas unidades; r_C tiene dimensiones de L^{-2} mientras que α tiene dimensiones de L/M . La permeabilidad tiene las unidades inversas de la resistencia específica, por ejemplo m^2 , μm^2 o darcy (d); siendo $1 d = 1,013 \mu m^2$.

1 darcy	= $0.99 \times 10^{-12} m^2$.
1 m^2	= 1.013×10^{12} darcy
1 m^2	= $9.8 \times 10^8 cm s^{-1}$ (para agua a 20 °C)
1 m^2	= 2.78×10^{12} pie día
1 m^2	= 2.08×10^{13} galones US día ⁻¹ pie ⁻²

Tabla N° 1. Unidades del coeficiente de permeabilidad [Purchas, 1996]



3.3.2.1.3. Determinación de la resistencia específica de la torta (r_c) y del medio filtrante (R_m) a presión constante

Para determinar los términos de resistencia específica de la estructura porosa y del medio filtrante se debe obtener la velocidad de filtrado a partir del volumen filtrado en función del tiempo, operando a presión constante. La expresión integrada de la ecuación fundamental de la filtración para este caso es [Sorrentino, 1998]:

$$\frac{t}{V_L} = \left(\frac{r_c \cdot K_c \cdot \mu_c}{2 \cdot \Delta P \cdot A^2} \right) \cdot V_L + \left(\frac{R_m \cdot \mu_L}{\Delta P \cdot A} \right) \quad (16)$$

Los valores de la resistencia específica de la estructura porosa y de la resistencia del medio se pueden obtener de la pendiente y del punto de corte respectivamente, de un gráfico t/V_L vs. V_L .

3.4. Drenaje capilar de estructuras porosas

Una vez formada la estructura porosa comienza el proceso de drenaje capilar, proceso en el cual se aplican fuerzas de drenaje a las estructuras porosas con el fin de reducir el contenido de humedad de la misma, el cual puede ser expresado también en términos de saturación de la estructura porosa. La fuerza aplicada puede ser mecánica, como cuando la estructura porosa es comprimida para disminuir su volumen vacío y su contenido de humedad simultáneamente; o puede ser hidrodinámica, es decir, el efecto del desplazamiento del filtrado retenido es producido por succión o soplado de aire a través de la estructura porosa. [Valentino, 1997]

El líquido puede ser retenido en una estructura porosa de diversas formas; estas son:

- a) Aislado en el interior de las partículas.
- b) Adsorbido sobre la superficie sólida.



- c) En los puentes entre las partículas.
- d) En el capilar.

La remoción del líquido puede realizarse de diferentes formas, estas son: por medios mecánicos y por medios térmicos. La primera consiste en aplicar una fuerza sobre la estructura porosa para retirar el líquido atrapado en los poros y la segunda en aplicar un gradiente de temperatura con el mismo fin.

Se conocen dos tipos de drenaje; básicamente, el drenaje por expresión y el drenaje por presión de gas.

La diferencia principal entre estos dos métodos está en que el drenaje por compresión ocasiona una disminución de la altura de la estructura porosa, permaneciendo los poros llenos de líquido, mientras que en la deslicorización por presión de gas, la altura de la estructura porosa permanece invariable durante el proceso (en el caso de estructura porosas incompresibles), quedando los poros parcialmente vacíos [Roccaro, 1997] y produciéndose un flujo de gas a través de la estructura porosa. En la figura N° 3 se muestran los dos procesos de drenaje.

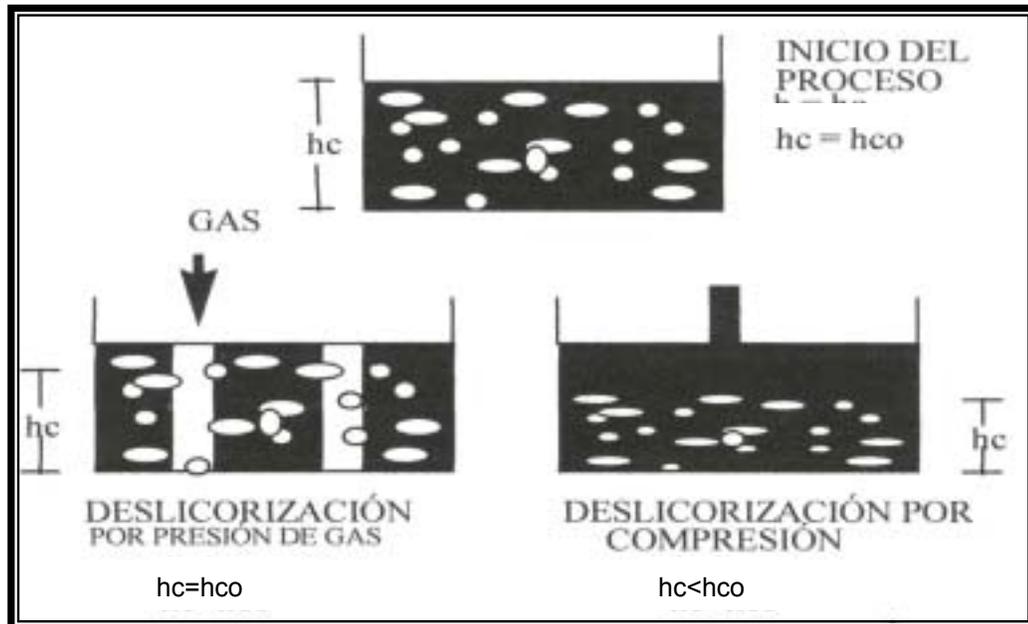


Figura N° 3. Drenaje Capilar por presión de gas y por compresión
[Guada, 1996]

Para el caso en estudio, interesa definir y conocer las características del drenaje por presión de gas; estas son:

- El proceso está limitado por fuerzas capilares
- Los poros de la estructura porosa se van vaciando,
- La estructura porosa mantiene su altura original,
- La saturación inicial va disminuyendo,
- La humedad va disminuyendo,
- Al comienzo sólo sale líquido, pero a medida que avanza el tiempo y se vacían los poros, también sale gas de la estructura porosa.[Roccaro, 1997]



3.4.1 Términos asociados al proceso de drenaje

Los siguientes términos se hallan asociados al proceso de drenaje de manera que permiten determinar la cantidad de líquido que ha sido removido de la estructura porosa.

3.4.1.1. Humedad (H)

La humedad se define como la relación existente entre la masa de líquido presente en la estructura porosa y la masa de estructura porosa húmeda.

Se determina su valor de manera experimental, hallando la diferencia entre el peso de la estructura porosa húmeda y el peso de la estructura porosa seca (M_S), obteniéndose así la masa de líquido en la estructura porosa (M_{LT}). Para el cálculo de ésta se emplea la ecuación:

$$H = \frac{M_{LT}}{M_{LT} + M_S} \quad (17)$$

existe una humedad particular conocida como Humedad de equilibrio (H_∞) que es el valor del contenido de humedad cuando el tiempo de drenaje capilar tiende a infinito o es muy grande desde el punto de vista práctico.

3.4.1.2. Saturación (S)

Es una relación entre el volumen de líquido en la estructura y el volumen de espacios vacíos de la misma. Si todo el volumen de la estructura porosa no ocupado por el sólido está ocupado por el líquido, se dice que la estructura porosa está saturada y alcanza su máximo valor ($S=1$).



La medición de saturación no puede hacerse de manera directa, para ello es necesario conocer el volumen de poros de la estructura porosa (V_{EV}); éste a su vez se estima a partir de la ecuación N° 18 luego de haber calculado el volumen total de la estructura porosa (V_T) y el volumen ocupado por el sólido (V_S) con las ecuaciones N° 19 y 20.

Donde : $V_{EV} = V_T - V_S$ (18)

$$V_T = A_T * hc$$
 (19)

$$V_S = \frac{M_S}{\rho_S}$$
 (20)

entonces: $S = \frac{V_{LT}}{V_{EV}}$ (21)

Se puede encontrar los siguientes tipos de saturación en un proceso de drenaje capilar:

- a) Saturación de equilibrio (S_∞): es aquella que se alcanza a una presión dada en un tiempo infinito o suficientemente largo.
- b) Saturación relativa a la saturación de equilibrio (S'_∞): es la cantidad de líquido no removido en un tiempo dado con respecto al removible a una determinada presión.

$$S'_\infty = \frac{S - S_\infty}{1 - S_\infty}$$
 (22)

- e) Saturación remanente, residual o irreducible (S_r): es la fracción de líquido que no puede ser extraída de la estructura porosa por medios mecánicos, en este caso presión de gas, aún cuando el diferencial de presión aplicado sea muy grande. A partir de la definición de la saturación remanente aparece un término asociado a ella conocido como la porosidad efectiva (ϵ^*), que no es más que la porosidad ficticia de la estructura que toma en cuenta la existencia dentro de los poros de una



cantidad residual de líquido, que para efectos de flujo se comporta como si fuera parte de la estructura porosa.

- c) Saturación relativa a la residual (S^*_{∞}): es la fracción de líquido que aún puede ser removido por medios mecánicos de la estructura porosa respecto al líquido total removible en la misma por medios mecánicos.

$$S^*_{\infty} = \frac{S_{\infty} - S_r}{1 - S_r} \quad (23)$$

3.4.1.3. Relación entre humedad y saturación

La siguiente ecuación describe la relación existente entre estos parámetros [Roccaro, 1997]:

$$H = \frac{1}{1 + \frac{(1 - \varepsilon) \cdot \rho_s}{\varepsilon \cdot S \cdot \rho_L}} \quad (24)$$

para esta relación es muy importante conocer el valor de la porosidad y la densidad del líquido y del sólido utilizados.

3.5. Velocidad de Drenaje Capilar

Al aplicar una diferencia de presión mayor o igual que la presión necesaria para comenzar el drenaje de la estructura porosa de filtración, la saturación de la misma disminuirá hasta alcanzar el valor de saturación de equilibrio.

Este proceso ocurre de manera tal que los poros más grandes son los primeros en ser vaciados, registrándose los mayores cambios en la saturación durante ese periodo. A medida que avanza el proceso, se requiere de mayores presiones para poder vaciar los poros más pequeños; pero si el proceso se realiza a presión constante esto se traduce en una disminución de la velocidad de drenaje.

En la figura N° 4 se observa la variación de la saturación en función del tiempo, cuando se somete a la estructura porosa a una presión constante.

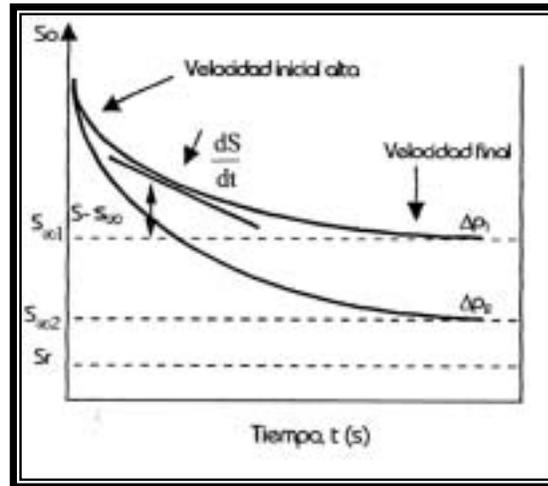


Fig. N° 4. Velocidad de drenaje capilar [Arias, 1998]

Para ajustar los valores de saturación y tiempo que se obtienen en las pruebas de drenaje capilar, Nicolaou propone el siguiente modelo [Nicolaou, 1996]:

$$S = (1 + a \cdot t)^{-b} \quad (25)$$

donde los valores de los parámetros a y b varían para cada presión y sustancia. La aplicación de este modelo tiene como propósito obtener unos valores mejor estimados de la saturación de equilibrio (S_{∞}).

3.6. Fenómeno de Capilaridad (Presión Capilar)

Un capilar se define como un cilindro de diámetro muy pequeño, representando en este trabajo un modelo idealizado de un poro.

La presión capilar es, básicamente, una medida de la presión que tiene que vencer el gas para desplazar el líquido retenido en la estructura porosa, además es un parámetro con el cual se estudia el comportamiento

de un medio poroso que contiene dos o más fases fluidas inmiscibles. También se puede decir que es la relación entre las presiones de las dos fases y que representa el equilibrio del drenaje capilar por medios mecánicos.

Si la superficie que separa los fluidos inmiscibles es curva, la presión en cada una de las fases debe ser diferente y esta relación o diferencia de presión se denomina presión capilar.

La superficie entre dos fluidos inmiscibles contiene más energía que cada una de las fases por separado, ya que en la superficie existe la tensión superficial (σ), que es la fuerza que tiende a disminuir la superficie libre de un líquido.

La forma que tome el menisco del capilar será aquella que tiende a minimizar este contenido de energía, lo cual se logra disminuyendo el tamaño del menisco. Es por esta razón que normalmente el menisco es curvo. [Valentino, 1997].

La figura N° 5 muestra los diferentes tipos de meniscos que se pueden presentar dentro de un capilar para fluidos inmiscibles.

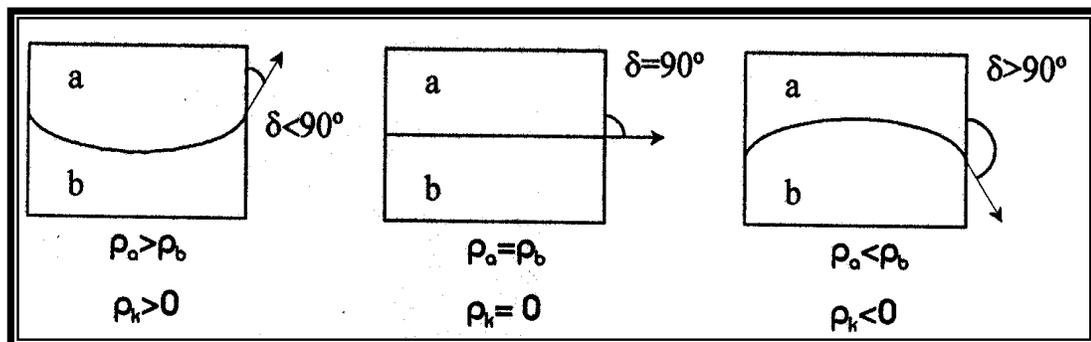


Figura N° 5. Meniscos en los fluidos inmiscibles [Arias, 1998]

Como puede observarse en la figura N° 5, se tiene la idealización de un poro representado por un capilar, el cual retiene líquido en su interior a una presión P_b y esta sometido al paso de un flujo de fluido a una presión P_a .



Para el primer caso, $P_a > P_b$ y el ángulo de mojado (δ) en el capilar es menor de 90° por lo que la presión capilar (P_k) es mayor que cero. Es importante destacar en la figura, la gran influencia que tienen la tensión superficial (provocada por la diferencia de presión entre las fases a y b) y el ángulo de mojado sobre la presión capilar.

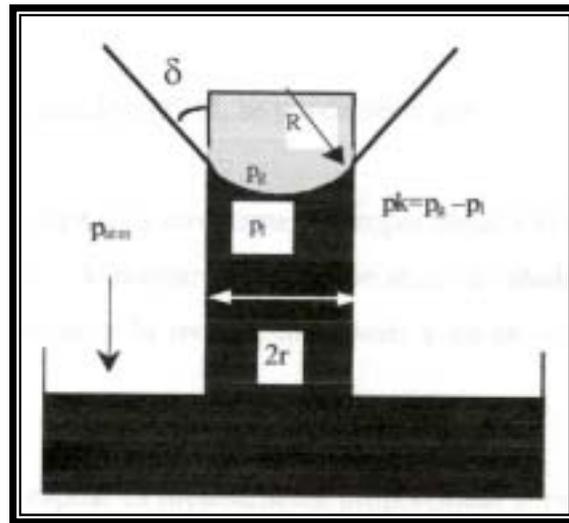


Figura N° 6. Contacto entre fases dentro de un tubo capilar.
[Cayama, 1999]

Mediante un balance de fuerzas se deduce la ecuación de Laplace – Young para capilares cilíndricos:

$$P_k = \frac{2 * \sigma}{r} | \cos(\delta) | \quad (26)$$

Esta ecuación permite determinar la presión capilar (P_k) y está basada en que el tubo capilar tiene forma cilíndrica y es completamente liso.



Normalmente se supone mojado perfecto con lo que el ángulo de mojado (δ) forma un ángulo igual a cero, entonces:

$$P_k = \frac{2 * \sigma}{r} \quad (27)$$

3.7 Equilibrio del Proceso de Drenaje Capilar (Curva de Presión Capilar)

La ecuación N° 27 representa la presión capilar en un solo poro. En la realidad, el poro no es un cilindro perfecto (está formado por cuerpo de poro y cuello de poro), por lo que, para efectos de drenaje de líquido, “r” representa realmente el radio hidráulico (radio de la sección asociada al flujo del fluido y que representa la relación entre el área de flujo y el perímetro mojado del capilar). La necesidad de determinar la curva de presión capilar resulta de la gran cantidad de poros de diferentes tamaños que constituyen la estructura porosa. Esto implica que no existe un único valor para la presión capilar. Para determinar la curva de presión capilar se debe tener en cuenta que ésta es una característica propia de la estructura porosa.

De acuerdo a la ecuación N° 27, se puede decir que:

- a) La presión capilar es directamente proporcional a la tensión superficial del líquido. Aumentando la temperatura o añadiendo surfactantes puede disminuirse la tensión superficial y en consecuencia la presión capilar, facilitándose de este modo el drenaje.
- b) La presión capilar es inversamente proporcional al radio del capilar (r).

Gráficamente la curva de presión capilar (figura N° 7) representa cambios en la saturación de equilibrio para una diferencia de presión (ΔP) fija y cuando el tiempo de drenaje es lo suficientemente largo, lo que indica el límite del proceso de drenaje. Se debe aclarar que la diferencia

de presión aplicada a la estructura porosa es igual a la presión capilar, sólo en la condición de equilibrio. Para una diferencia de presión fija (ΔP), a medida que transcurre el tiempo se van vaciando poros cada vez más pequeños hasta que se llega al tamaño de poro en que la presión capilar (P_k) tiene un valor igual al ΔP aplicado; en este momento, el poro no drena, porque la fuerza aplicada no es capaz de vencer la fuerza capilar. Esto se observa en la figura N° 7

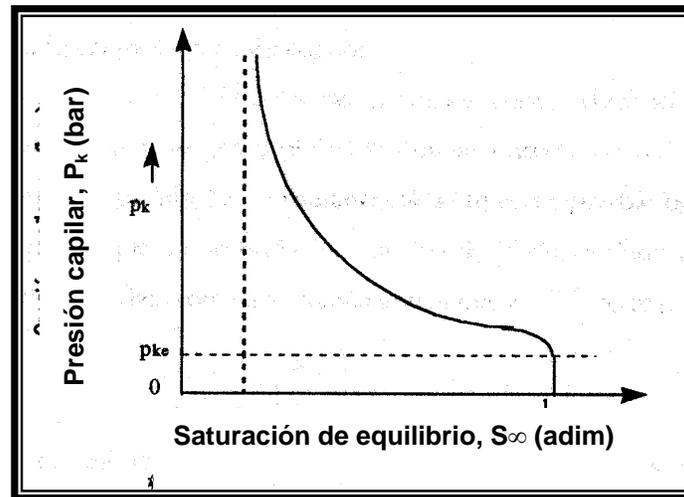


Figura N° 7. Curva de presión capilar. [Cayama, 1999]

En toda curva de presión capilar se destacan tres parámetros de suma importancia, a saber:

- Presión capilar de entrada (P_{ke}): es la mínima diferencia de presión necesaria para iniciar el proceso de drenaje capilar, la cual permite drenar el líquido que se encuentra en los poros más grandes del medio poroso.
- Saturación remanente (S_r): es la menor saturación alcanzada cuando se drena un medio poroso, es decir, la fracción de líquido que no puede ser extraído por medios mecánicos.

- Factor de distribución del tamaño de poro (ξ): Indica que tan dispersos o juntos se encuentran los poros en la estructura. Posee un significado dependiendo del valor que tome; si el mismo tiende a infinito esto indica que la distribución de tamaño de poro es amplia, es decir, que existen poros de diferentes tamaños. Por el contrario, si el valor tiende a cero, indica que la distribución de tamaño de poro es estrecha, implicando esto que todos los poros tienen el mismo tamaño.

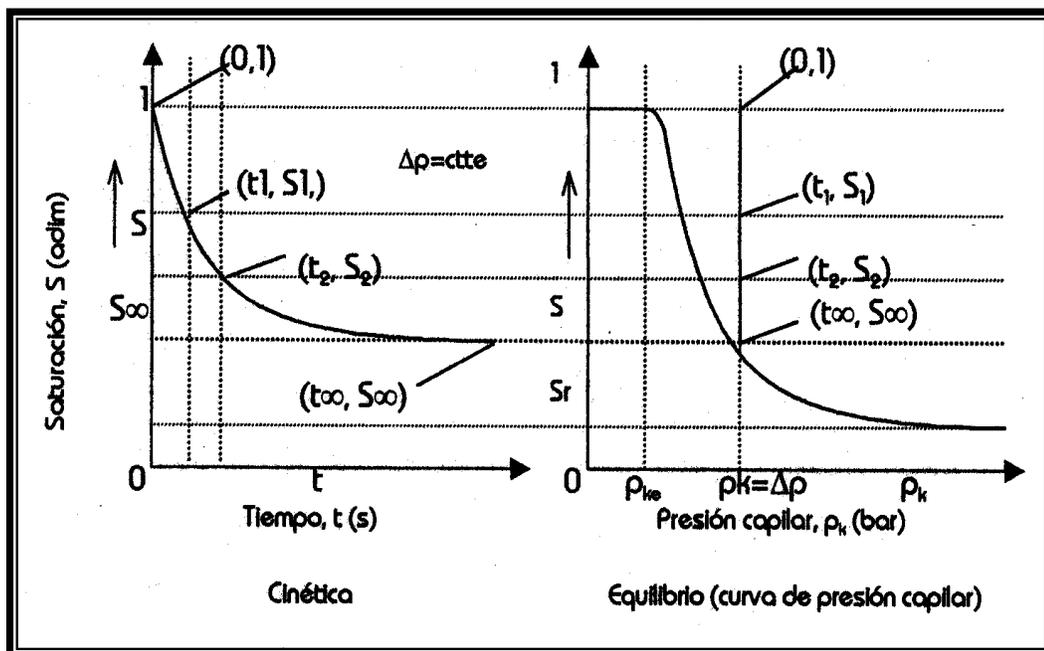


Figura N° 8. Relación entre la curva de velocidad de drenaje capilar y la curva de presión capilar. [Cayama, 1999]

En la figura N° 8, para la curva que representa la velocidad de drenaje, se observa que si una estructura porosa se somete a una diferencia de presión constante, comenzará a disminuir la saturación del medio poroso a medida que transcurre el tiempo. Los poros estarán cada vez más vacíos,



por lo tanto, es en los primeros instantes donde existen los mayores cambios de saturación. Luego relacionando la curva de presión capilar y la curva de cinética se observa que cada punto de la curva de presión capilar corresponde al valor de saturación de equilibrio que se alcanza en la curva de cinética cuando el tiempo es lo suficientemente largo.

3.8. Modelos matemáticos para la Curva de Presión Capilar

El radio de curvatura de la interfase entre el fluido líquido y el fluido gaseoso varía de forma puntual y no es posible determinarlo experimentalmente; la presión capilar depende de dicho radio por lo que se hace necesario el estudio macroscópico en el cual la presión capilar depende de la saturación.

La curva de presión capilar depende de los tres parámetros mencionados anteriormente (P_{ke} , S_r y ξ) los cuales se estiman de manera diferente dependiendo del autor.

3.8.1. Modelo de Brook – Corey

Para eliminar la necesidad de conocer la presión capilar de entrada, Corey [Corey.1964] ha propuesto un método para el cálculo de los parámetros del modelo anterior, donde se ajustan los valores experimentales de presión capilar y de saturación de equilibrio reducida a través del método de mínimos cuadrados determinando así el parámetro de distribución de poro y la presión capilar de entrada. (Ver la figura N° 9).

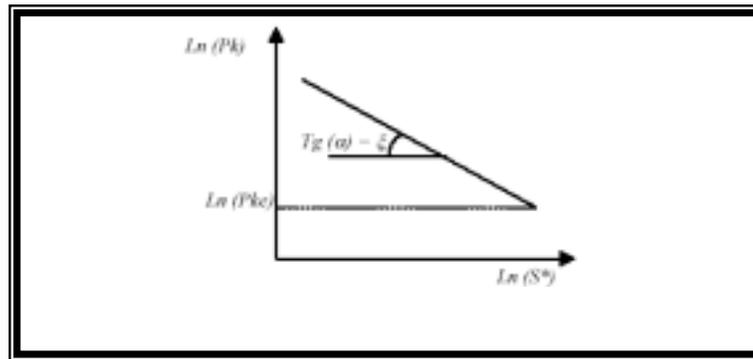


Figura N° 9 Determinación de los parámetros ξ y P_{ke} , según el Modelo de Corey.

La siguiente ecuación es propuesta por Brook – Corey para determinar la presión capilar de entrada:

$$P_k = P_{ke} \cdot \left(\frac{S_\infty - S_r}{1 - S_r} \right)^{\frac{1}{\lambda}} \quad (28)$$

3.8.2. Modelo de Wakeman

Wakeman [Wakeman.1975], establece un rango de valores para el parámetro de distribución de tamaño de poro (ξ) que se encuentra entre 0,15 y 0,33 sugiriendo en algunos de sus trabajos un valor fijo de 0,2. Esto a pesar de que la distribución de tamaños de poro es característica de cada estructura porosa. La siguiente ecuación es propuesta por Wakeman para el cálculo de la presión capilar de entrada:



$$P_{ke} = \frac{4,6 \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \sigma}{\varepsilon \cdot D_p} \quad (29)$$

Este modelo tiene como limitación que solo representa la zona de la curva de presión capilar correspondiente a la zona de saturaciones relativas entre 1 y 0,33; además, fija el parámetro de distribución de tamaño de poro, ya que éste siempre se puede determinar por ajuste.

3.8.3. Modelo Potencial con ajuste de Parámetros Libres

Este modelo se basa en la función potencial de Wakeman, [Valentino.1997] el cual consiste en ajustar todos los puntos experimentales de la curva de presión capilar usando el método de mínimos cuadrados, dejando como parámetros de ajuste el valor de saturación remanente (S_r), la presión capilar de entrada (P_{ke}) y el parámetro de distribución del tamaño de poros (ξ), mediante la ecuación N° 30.

$$P_k = P_{ke} \cdot \left(\frac{S_\infty - S_r}{1 - S_r} \right)^{-\xi} \quad (30)$$

Este ajuste tiene como limitación que se debe obtener una muy buena curva de presión capilar de forma experimental, sobre todo en la zona donde se tienen las mayores variaciones de saturación y en la zona de saturación remanente (S_r). Para ello, a partir de pruebas experimentales se deben fijar valores aceptables de diferencial de presión (ΔP), para que el rango de presiones estudiado incluya la presión capilar de entrada (P_{ke}) y la presión a la cual se obtiene un



valor aproximado para la saturación remanente. Es importante mencionar, que el modelo Potencial no es capaz de ajustar la zona cercana a la presión capilar de entrada (P_{ke}), debido a la naturaleza matemática del modelo.

3.8.4. Modelo adaptado de Rosin - Rammler

La función de distribución de Rosin-Rammler [Sorrentino, 2002], es una ecuación utilizada en mediciones de tamaño de partícula. Es una función de dos parámetros usualmente dada como porcentaje acumulativo por sobre-tamaños y viene dada por la siguiente ecuación:

$$F(x) = \exp\left[-\left(\frac{x}{x_R}\right)^n\right] \quad (31)$$

Donde X_R es una constante que representa una medida del tamaño de partícula para el rango estudiado y n es otra constante característica del material y proporciona una medida de la pendiente de la curva acumulativa.

La similitud de la curva de presión capilar con una curva de distribución de tamaño de partícula permite adaptar esta ecuación a un modelo de distribución de tamaño de radio hidráulico (r_H) mediante la siguiente ecuación:

$$F_3(r_H) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{Pk'}{Pk}\right)^{1/\xi}\right] \quad (32)$$

Donde Pk' representa una media y es la presión capilar cuando $S^*\infty$ es 0,632 y ξ representa el factor de distribución de tamaño de poro. El ajuste se realiza de la misma manera que en el modelo



potencial pero con los parámetros característicos del modelo de Rosin-Rammler.

3.9. Curvas de distribución de tamaños de poro

Al formarse la estructura porosa de filtración, en su interior se encuentran una serie de espacios vacíos o poros de la estructura, los cuales no necesariamente, son del mismo tamaño; de aquí, que se deba obtener la distribución de tamaños de poro de dicha estructura.

3.9.1. Distribución Acumulada de tamaño de poro en volumen.

Si relacionamos la presión capilar con el diámetro en lugar del radio de poro obtenemos la siguiente expresión:

$$P_k = \frac{4 \cdot \sigma}{d_H} \quad (33)$$

donde d_H es el diámetro hidráulico. Cuando la presión capilar es igual a la presión capilar de entrada, comienzan a vaciarse los poros de mayor tamaño presentes en la estructura porosa, teniendo de esta forma que:

$$P_{ke} = \frac{4 \cdot \sigma}{d_{Hmax}} \quad (34)$$

Si igualamos estas dos expresiones y además hacemos uso de la ecuación N° 30, nos queda la siguiente ecuación:

$$P_k = P_{ke} \cdot (S^*_{\infty})^{-\xi} = P_{ke} \cdot \left(\frac{S_{\infty} - S_r}{1 - S_r} \right)^{-\xi} \quad (35)$$

con la cual se consigue la distribución de tamaños de poro, esta viene dada por la siguiente función: [Arias, 1998]

$$F_3(d_p) = S^*_{\infty} = \left(\frac{d_p}{d_{H\max}} \right)^{\frac{1}{\xi}} \quad (36)$$

Donde F_3 es una distribución en volumen, esto se debe a que físicamente la variación de S^*_{∞} entre una presión capilar (P_k) y otra está asociado a un volumen de poros de un determinado tamaño que se pudieron vaciar.

3.9.2. Distribución Acumulada en Números de Tamaño de poro (Modelo de Nicolaou)

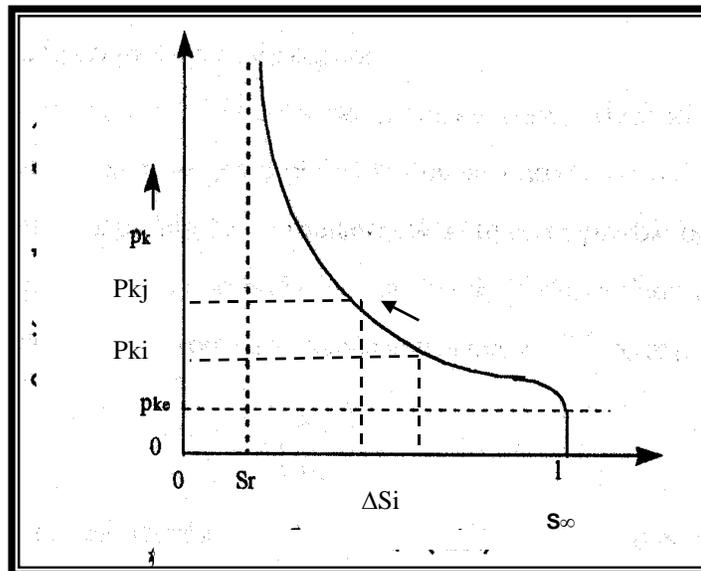


Figura N° 10. Variación de la saturación de equilibrio

Cuando se lleva a cabo el proceso de drenaje, se van vaciando poros de tamaño cada vez más pequeños a diferentes presiones de gas aplicadas, de esta forma la saturación de la estructura porosa disminuye desde 1 hasta

Sr, este último valor de saturación corresponde a la cantidad de líquido que permanece dentro de los poros de diámetro más pequeño.

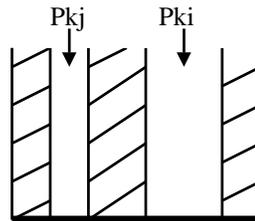


Figura N° 11. Representación de los poros de la estructura porosa

En una condición de equilibrio ($\Delta P = P_{ki}$) se empiezan a drenar los poros de tamaño r_i .

$$P_{ki} = \frac{2 \cdot \sigma}{r_i}$$

Cuando se incrementa la presión aplicada a ΔP_j , en la nueva condición de equilibrio $\Delta P_j = P_{kj}$ ya se han vaciado los poros (r_i) y se empezaron a drenar los poros de radio r_j . De esta forma entre P_{ki} y P_{kj} la saturación de equilibrio varía un ΔS_i , como se muestra en la figura N° 10, donde este valor representa el volumen líquido que se encontraba en los poros de radio r_i y que fue drenado de la estructura. Este volumen de líquido capilar drenado se puede considerar prácticamente como el volumen de poros con radio r_i que fueron drenados. Este análisis permite establecer que la relación entre saturación y tamaño de poro que se puede obtener a partir de la curva de presión capilar, representa una distribución volumétrica de tamaños de poro.

El modelo de Nicolaou para la distribución de tamaño de poro está restringido por las siguientes condiciones:

- Un mismo sentido de flujo para la fase gaseosa (no mojante) y líquida (mojante) dentro de los poros.



- Los fluidos involucrados tienen un comportamiento Newtoniano.
- La estructura porosa está formada por tubos capilares cilíndricos, rectos e ininterrumpidos que se pueden ordenar en grupos de diferente tamaño.
- La estructura porosa se considera con características isotrópicas e incompresible.

$$\Delta V_L = ni \cdot \pi \cdot ri^2 \cdot \Delta hc \quad (37)$$

donde ΔV_L es la variación de volumen de líquido correspondiente a un grupo de poro i que es drenado.

ni es la cantidad de poros de radio ri que fueron drenados

ri radio de poro que fue drenado

Δhc es la altura de los poros de radio ri que fueron drenados.

La ecuación N° 37 supone una geometría cilíndrica recta e ininterrumpida para los tubos capilares.

A partir de la ecuación N° 37 se obtiene que

$$\Delta V_L = \left(\frac{V_{EV}}{V_T} \right) \cdot V_T \cdot \left(\frac{\Delta V_L}{V_{EV}} \right) \quad (38)$$

$$V_T = A \cdot \Delta hc$$

Donde A es el área de sección transversal de la estructura porosa y Δhc espesor de la estructura porosa que es drenada. Si despejamos ni de la ecuación N° 37 se obtiene

$$ni = \frac{\Delta V_L}{\pi \cdot ri^2 \cdot \Delta hc} \quad (39)$$



si sustituimos $\varepsilon = \left(\frac{V_{EV}}{V_T} \right)$ y $S = \left(\frac{V_{LIQUIDO EN LOS POROS}}{V_{POROS}} \right) = \frac{V_L}{V_{EV}}$

entonces $\Delta S = \left(\frac{\Delta V_L}{V_{EV}} \right)$

así, la saturación asociada al drenaje del grupo de poros de radio r_i será ΔS_i .

De la ecuación N° 38 se tiene que:

$$\Delta V_L = \varepsilon \cdot A \cdot \Delta h_c \cdot \Delta S_i$$

sustituyendo en la ecuación N° 39

$$n_i = \frac{\varepsilon \cdot A \cdot \Delta h_c \cdot \Delta S_i}{\pi \cdot r_i^2 \cdot \Delta h_c} = \frac{\varepsilon \cdot A \cdot \Delta S_i}{\pi \cdot r_i^2} \quad (40)$$

si en la estructura porosa se tiene “n” grupos de poro de diferentes tamaños, la cantidad total de poros que habrá en ella será

$$n_1 + n_2 + \dots + n_n = \frac{\varepsilon \cdot A \cdot \Delta S_{i_1}}{\pi \cdot r_{i_1}^2} + \frac{\varepsilon \cdot A \cdot \Delta S_{i_2}}{\pi \cdot r_{i_2}^2} + \dots + \frac{\varepsilon \cdot A \cdot \Delta S_{i_n}}{\pi \cdot r_{i_n}^2} \quad (41)$$

esto quiere decir entonces que:

$$\sum_{i=1}^n n_i = \frac{\varepsilon \cdot A}{\pi} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\Delta S_i}{r_i^2} = \hat{Q}_o(r_i) \quad (42)$$



la cual es una distribución acumulada de tamaño de poro. En su forma diferencial

$$\hat{Q}_o(r) = \frac{\varepsilon \cdot A}{\pi} \int_{r_{\text{máx}}}^r \frac{dS}{r^2} \quad (43)$$

donde $r_{\text{máx}}$ es el radio de poro más grande que se puede tener en la estructura y está asociado a la presión capilar de entrada (P_{ke}) mediante la ecuación N° 34.

Tomando en cuenta que $(S^*_{\infty}) = \left(\frac{S_{\infty} - S_r}{1 - S_r} \right)$ y $\varepsilon^* = \varepsilon (1 - S_r)$

$$\hat{Q}_o(r) = \frac{\varepsilon^* \cdot A}{\pi} \int_{r_{\text{máx}}}^r \frac{dS^*_{\infty}}{r^2} \quad (44)$$

usando la ecuación de Laplace-Young

$$P_k = \frac{2 \cdot \sigma}{r} \Rightarrow r^2 = \frac{4 \cdot \sigma^2}{P_k^2}$$

sustituyendo en la ecuación N° 44 se obtiene

$$\hat{Q}_o(r) = \frac{\varepsilon^* \cdot A}{4 \cdot \sigma^2 \cdot \pi} \int_{\frac{2\sigma}{P_{ke}}}^{\frac{2\sigma}{P_k}} P_k^2 dS^*_{\infty} \quad (45)$$

adoptando el modelo de Wakeman para la curva de presión capilar según la ecuación N° 30.

$$P_k = P_{ke} \cdot (S^*_{\infty})^{-\xi}$$

$$S^*_{\infty} = \left(\frac{P_{ke}}{P_k} \right)^{\xi} \Rightarrow dS^*_{\infty} = -\xi \cdot P_{ke}^{\xi} \cdot P_k^{-(\xi+1)} \cdot dP_k$$



$$Pk = \frac{2 \cdot \sigma}{r} \Rightarrow dPk = -\frac{2 \cdot \sigma}{r^2} dr$$

y tomando en cuenta que:

$$r^* = \frac{r}{r_{\text{máx}}}$$

$$dS^*_{\infty} = \xi \cdot r^{*(\xi-1)} \cdot dr^* \quad (46)$$

$$\hat{Q}_o(r^*) = \frac{\varepsilon^* \cdot A}{\pi} \int_1^{r^*} \frac{dS^*_{\infty}}{(r_{\text{máx}})^2 \cdot (r^*)^2}$$

$$\hat{Q}_o(r^*) = \frac{\varepsilon^* \cdot A}{(r_{\text{máx}})^2 \cdot \pi} \int_1^{r^*} \frac{dS^*_{\infty}}{(r^*)^2} \quad (47)$$

sustituyendo (46) en (47) e integrando

$$\hat{Q}_o(r^*) = \frac{\varepsilon^* \cdot A}{(r_{\text{máx}})^2 \cdot \pi} \cdot \frac{\xi}{\xi - 2} \cdot [1 - r^{*(\xi-2)}] \quad (48)$$

en la ecuación N° 40, se tiene que ΔS se puede sustituir por la expresión

equivalente (en forma diferencial) $dS^*_{\infty} = \xi \cdot r^{*(\xi-1)} \cdot dr^*$, y

tomando también un incremento diferencial en el número de poros:

$$dn = \frac{\varepsilon^* \cdot A}{\pi \cdot r_{\text{máx}}^2} \cdot \xi \cdot (r^*)^{(\xi-3)} \cdot dr \quad (49)$$



físicamente, el número de poros que se encuentra entre dos tamaños consecutivos en la estructura es:

$$\Delta n = \frac{\varepsilon^* \cdot A}{\pi \cdot r_{max}^2} \cdot \xi \cdot (r^*)^{(\xi-3)} \cdot \Delta r \quad (50)$$

y el número total de poros que se pueden encontrar en la estructura porosa, se obtiene integrando la ecuación N° 49 desde r_{min} a $r_{máx}$, es decir, desde $r^*=r^*_{min}$ a $r^*=r^*_{máx}$, así:

$$N_{TOT} = \frac{\varepsilon^* \cdot A}{(r_{max})^2 \cdot \pi} \cdot \frac{\xi}{\xi - 2} \cdot \left[1 - r^*_{min}^{(\xi-2)} \right] \quad (51)$$

Una vez conocido el número total de poros, es posible establecer las funciones de distribución en número como sigue:

(52)

(53)

(54)



(55)

La función de distribución acumulada que representa la cantidad de poros (en número) que son menores o iguales a un tamaño dado es:

(56)



3.10. Definición de tamaño de partícula.

Una partícula irregular puede ser descrita por números diferentes dependiendo de cual dimensión o propiedad sea medida. Hay básicamente tres grupos de tamaños: diámetros de esfera equivalente, diámetros de círculo equivalente y diámetros estadísticos. (Svarovsky, 1988)

El primer grupo de tamaños son los diámetros de una esfera que tendría las mismas propiedades que la partícula; por ejemplo: el mismo volumen, igual área proyectada, igual velocidad de sedimentación, entre otros.

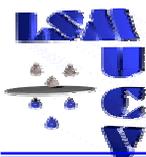
El segundo grupo de tamaños son los diámetros de círculos que tengan las mismas propiedades de proyección de contorno que las partículas, por ejemplo: igual área proyectada e igual perímetro. El tercer grupo son los diámetros estadísticos, éstos se obtienen cuando se mide con un microscopio una dimensión lineal paralela a una dirección fija; por ejemplo : distancia entre dos tangentes a lados opuestos de la partícula.

Los distintos métodos de medición de tamaños de partículas dan como resultado distintas medidas de tamaños, por lo que se debe tener en cuenta cuál tamaño representa mejor la propiedad o el proceso que se desea controlar. En el caso de la filtración, el diámetro superficie-volumen es el más utilizado.

3.11. Distribución de tamaño de partícula

La distribución de tamaño de partículas es la representación de la cantidad de partículas de cada tamaño que hay en una muestra.

Según la característica que se utilice para definir cuántas partículas pertenecen a cada tamaño, existen cuatro tipos de densidades de distribución y cuatro tipos de distribuciones acumuladas tal como se aprecia en la tabla N° 2



Tipo	Símbolo	Dimensiones	Definición
Densidad de Distribución	f_0	Por número	Número de partículas de tamaño X entre número total de partículas
	f_1	Por longitud	Longitud de las partículas de tamaño X entre longitud total
	f_2	Por superficie	Superficie de las partículas de tamaño X entre superficie total
	f_3	Por volumen	Volumen de las partículas de tamaño X entre volumen total
Distribución Acumulada	F_0	Por número	Número de partículas de tamaño menor que X entre número total de partículas
	F_1	Por longitud	Longitud de las partículas de tamaño menor que X entre longitud total
	F_2	Por superficie	Superficie de las partículas de tamaño menor que X entre superficie total
	F_3	Por volumen	Volumen de las partículas de tamaño menor que X entre volumen total

Tabla N° 2. Distribuciones de tamaño de Partícula.

3.11.1. Curvas de Distribución

3.11.1.1 Curva de Densidad de Distribución ($f(x)$)

La densidad de distribución es la fracción de partículas por unidad de tamaño, la cual se obtiene dividiendo la fracción



de partículas (o frecuencia de clase) entre el tamaño del intervalo (x). (Ver figura N° 12)



Figura N° 12. Curva típica de Densidad de Distribución

3.11.1.2 Curva de Distribución Acumulada ($F(x)$)

La distribución acumulada de tamaño de partículas, $F(x)$, representa la fracción o porcentaje de las partículas que poseen un tamaño menor o igual que un valor x (Ver figura N° 13).

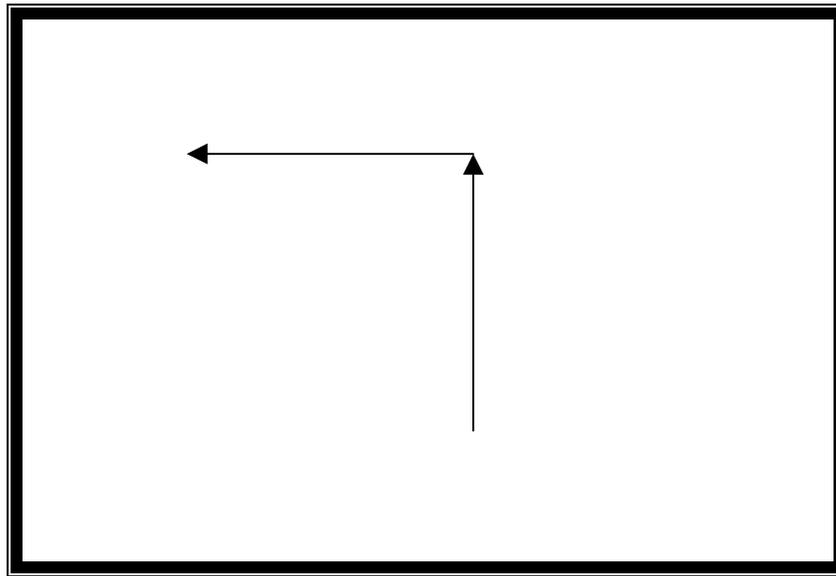


Figura N° 13. Curva Típica de Distribución Acumulada.

La relación que existe entre la Densidad de Distribución ($f(X)$) y la Frecuencia Acumulada ($F(X)$) viene dada por la siguiente expresión:

(57)

3.11.2. Medidas de Tendencia Central:

3.11.2.1 La mediana (X_{50}):

Se define como el valor que divide a la curva de densidad de distribución de tal manera que a cada lado queden áreas iguales. De acuerdo con esta definición, para determinar la mediana es necesario ordenar los datos.

El valor de la mediana puede o no coincidir con un valor de la serie; todo depende si el número de datos es par o impar; en el primer caso no coincide y en el segundo sí [Rivas, 1985].

3.11.2.2 La moda (MD):

Se define como el valor más alto de la serie, el que más se repite, el valor más típico. En una densidad de distribución, es el valor alrededor del cual los términos tienden a concentrarse más densamente. Desde el punto de vista analítico, se puede definir como el valor de la variable correspondiente a la ordenada máxima de una curva de densidad de distribución [Rivas, 1985]. La moda puede no existir, incluso si existe puede no ser única. En la figura N° 14, se puede apreciar con más detalle el concepto de mediana y moda:



Figura N° 14. Representación de la moda y la mediana.

3.11.2.3 Diámetro equivalente superficie – volumen ($D_{3,2}$):

Es el diámetro de la partícula que posea la misma relación superficie-volumen a la esfera con la que se está comparando. (Sorrentino, J. A., 1998). Este diámetro proporciona un tamaño representativo de la partícula.



3.11.3. Medidas de dispersión

La dispersión o variación de las muestras se refiere al grado en que los datos numéricos tienden a extenderse alrededor de un valor representativo de la muestra [Spiegel, 1991]. En el caso en estudio, para las distribuciones de tamaño de partícula se tomarán como valor de medida de dispersión la desviación estándar geométrica.

3.11.3.1 La desviación estándar, relaciona las desviaciones de los valores con respecto a su media aritmética. Su símbolo es DS y se expresa por la siguiente ecuación:

$$(58)$$

y por la siguiente ecuación cuando es geométrica:

$$(59)$$



4. ANTECEDENTES

En el laboratorio de Separaciones Mecánicas, se han desarrollado algunos trabajos relacionados con la influencia de la distribución de tamaños de partículas en el proceso de filtración. Leves variaciones en la distribución de tamaños de partículas pueden ocasionar cambios de importancia en la permeabilidad y porosidad de la estructura porosa, en la curva de presión capilar, en la rapidez de remoción de líquido de la estructura porosa y en el consumo de gas. En las investigaciones que se mencionaran más adelante, se ha trabajado con suspensiones de diferentes tamaños de partícula, diferentes concentraciones y se ha variado la amplitud de la DTP, así como el sesgo y el tamaño representativo de las partículas, ya sea este el X_{50} o el $D_{3,2}$.

Guada y Trocóniz, [en 1996] trabajaron con suspensiones de carbonato de calcio al 40% y ajustaron las curvas de presión capilar por el Modelo Potencial de Wakeman linealizado y por el Modelo Potencial con ajuste por Parámetros Libres. Realizaron pruebas tanto con fracciones estrechas como con mezclas de granulometría controlada de igual tamaño representativo, sesgo constante y diferentes amplitudes. Al no disponer sino al final de sus experiencias del Mastersizer para la DTP por difracción láser, encontraron que la formulación de la granulometría controlada no era correcta, puesto que las fracciones estrechas se cruzaban entre sí, lo que arrojó resultados erróneos al preparar las mezclas.

La mayoría de los problemas reportados por Guada y Trocóniz fueron solucionados por Ugas y Arias [en 1998], quienes estudiaron la influencia del tamaño representativo de las partículas en la curva de presión capilar para una suspensión de CaCO_3 . Para ello trabajaron con fracciones estrechas y mezclas, a partir de una suspensión de CaCO_3 al 50% en peso y mediante el



uso del Filtratest-UCV; utilizaron como medio filtrante acetato de celulosa de $0,2 \mu\text{m}$, el cual permitió la retención de aire en la celda impidiendo el efecto de secado; aunque presentaron problemas en lo que respecta a la evaporación del filtrado debido a la larga duración de las pruebas. De sus resultados, se pudo observar que las fracciones estrechas presentan mayor porosidad que las mezclas debido a que las partículas más pequeñas incluidas en las mezclas ocupan los espacios vacíos, reduciendo de esta forma la porosidad. Al realizar pruebas aumentando la amplitud de la DTP, tanto la presión capilar de entrada como la saturación remanente aumentaron. Determinaron que para un mismo tamaño representativo de partícula, al aumentar la desviación estándar disminuía el diámetro de poro (d_{p50}) y lo mismo ocurrió para el factor de distribución de tamaño de poro. Las curvas de distribución de tamaño de poro arrojaron como resultado que al disminuir el tamaño de las partículas, disminuía también el diámetro de poro; obtuvieron las curvas de distribución de tamaño de poro a partir de la ecuación N° 36:

Cayama [en 1999] estudió la influencia del tamaño de partícula y de la desviación estándar geométrica sobre la curva de presión capilar a partir de fracciones estrechas de CaCO_3 . Para ello trabajó con una suspensión al 50% en peso de CaCO_3 , la cual introdujo en la celda Filtratest utilizando como medio filtrante una membrana Pall® y tomó como datos experimentales, presión, masa de filtrado que se recoge a cada presión, altura de la estructura porosa, masa de la estructura porosa húmeda y masa de la estructura porosa seca. Los problemas reportados por Ugas y Arias en cuanto a la evaporación del filtrado debido a la larga duración de las pruebas fue resuelto colocando un envase de boca estrecha en lugar de un beaker; la



evaporación se redujo, por lo que se pudo alargar el tiempo de supervisión de las pruebas.

A partir de estos datos se determinó la curva de presión capilar experimental y la curva de presión capilar ajustada por el método de los parámetros libres. Entre los resultados obtenidos en ese trabajo se encontró que la saturación remanente y la presión capilar de entrada aumentan cuando disminuye el tamaño de partícula. Al aumentar la desviación estándar geométrica también aumentó la presión capilar de entrada.

En cuanto a las curvas de distribución de tamaño de poro se encontró que el diámetro de poro representativo (d_{p50}) disminuye con el aumento de la mediana y al aumentar la desviación estándar geométrica. También se encontró que el parámetro de distribución de tamaño de poro (ξ) aumentó con el aumento del tamaño de las partículas, de aquí que este parámetro sea función del tamaño de las partículas. En cambio, al variar la desviación estándar, este parámetro no varió

Ramírez [en 2002], caracterizó discos porosos por métodos prácticos y por microscopía óptica: La caracterización por métodos prácticos consistió en la determinación de la porosidad, la solidosidad y la permeabilidad de los discos antes y después de la filtración. La forma de cuantificar la penetración de sólidos al seno del medio poroso, fue a través de la masa depositada en los discos y la pérdida de permeabilidad. La porosidad de los discos se obtuvo por medio del método de intrusión de agua en los poros del medio (permeación a 40 psi). La solidosidad se cuantificó a través de la densidad aparente de los discos, que para el caso específico de los discos de $10\ \mu\text{m}$ esta reportó un valor igual a $3,315\ \text{g/cm}^3$. Por otro lado, encontró que el valor de la permeabilidad para discos porosos de $10\ \mu\text{m}$ era aproximadamente 79,6 md. En general determinó que los discos más porosos son los de menor

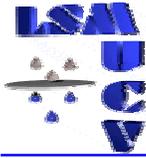


tamaño de cuello de poro, su solidosidad es menor, presentan mayor cantidad de espacios vacíos y son menos permeables.

Dentro de las principales conclusiones obtenidas en su trabajo, se puede resaltar la siguiente: los métodos prácticos se ajustan muy bien para los discos porosos entre 5 y 60 μm .

Sorrentino [en 2002], en su Disertación Doctoral trabajó con fracciones amplias y estrechas de Carbonato de Calcio (CaCO_3) variando la desviación estándar de las granulometrías empleadas. Realizó pruebas de filtración en el equipo Filtratest- UCV para obtener curvas de presión capilar. Las curvas que obtuvo a partir de sus experiencias, fueron ajustadas por el Modelo de Rosin – Rammler.

Dentro de las principales conclusiones que obtuvo se tiene que: a) La Saturación remanente disminuye al aumentar el $D_{3,2}$ b) El factor de distribución de tamaño de poro aumenta al aumentar la desviación estándar geométrica c) La presión Capilar Promedio (P_k) , que está asociada al tamaño de poro, es una función de P_k' y el factor de distribución de tamaño de poro (ξ).



5. DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS

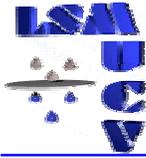
5.1. Tamizador Vibrante

El equipo para realizar el tamizado en húmedo consta de: siete tamices para diferentes tamaños de partícula (h), los cuales poseen las medidas en mesh que se observan en la tabla N° 3.

Fracciones estrechas	Abertura del tamiz en mesh
38-45	400-325
45-53	325-270
53-63	270-250
63-75	250-200
75-90	200-170
90-106	170-150
106-125	150-120

Tabla N° 3. Aberturas en mesh para los tamices [Cayama, 1999].

El tamizador vibratorio mostrado en la figura N° 15, será empleado para la obtención de partículas gruesas de granulometría estrecha comprendida entre 38 y 125 μm , para lo cual usa cierta cantidad de agua, que facilita el movimiento de las partículas a través de las mallas de los tamices. Este equipo está constituido por una base metálica **a**, que sostiene al motor **b** y al soporte **c**. El movimiento es generado cuando el motor acciona dos tubos verticales **d**, que se encuentran dentro de la carcasa metálica **e**, en el cual se ubica el controlador de movimiento **f**, que a su vez sirve como cronómetro. El agua es alimentada por el tope de los tamices, a través de la manguera de alimentación **g**, y fluye a través de estos por gravedad. evitar su desajuste durante el tamizado. El conjunto de tamices **h** está constituido por ocho platos con tamaño nominal de: 38, 45, 53, 63, 75,



Descripción de equipos

90, 106 y 125 micrones, en la parte superior de los mismos se coloca un plato asegurador **i**, se utiliza con la finalidad de ajustar la torre de tamices. En la parte inferior de los tamices se ubica un plato con desagüe **j**, cuya función es desalojar el agua del sistema de tamices por la parte inferior. Para optimizar el tamizado el brazo **k** golpea los tamices.

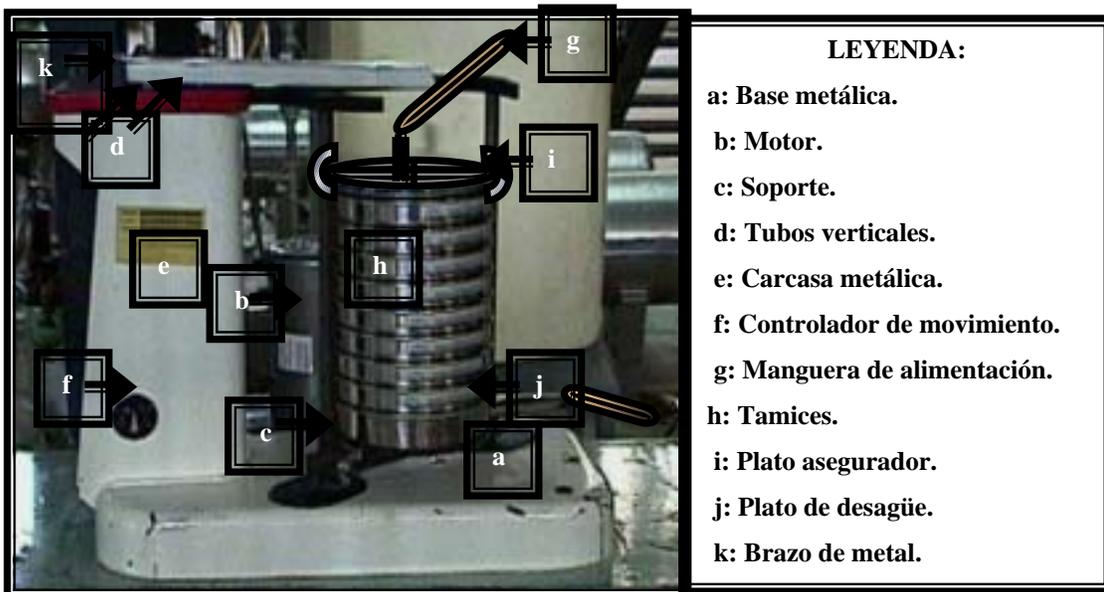
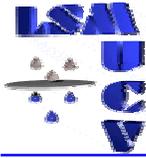


Figura N° 15. Tamizador vibrante

5.2. Tamizador en seco

El tamizador en seco se observa en la figura N° 16. Este equipo se emplea para tamizar el carbonato de calcio antes del tamizado húmedo. Consta de un motor (M), un soporte (S), tamices (T), barra de ajuste de los tamices (B) y un ventilador (V).



Descripción de equipos

Al finalizar se desecha la porción de la muestra que quedó en cada tamiz y se recupera como producto lo que quedó en el envase del fondo. Este producto se lleva al tamizado en húmedo.

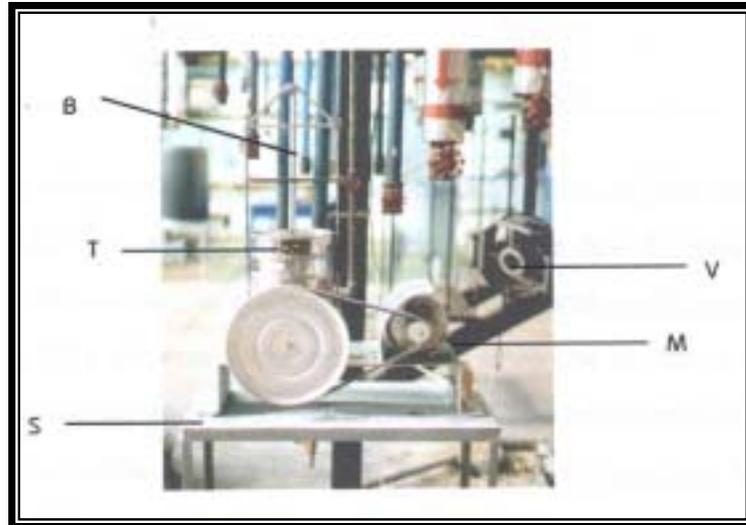
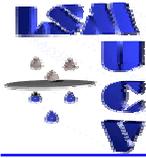


Figura N° 16. Tamizador en seco



5.3. Clasificador Centrífugo

El clasificador centrífugo (Figura N° 17) consta de las siguientes partes: una sección de descarga para la alimentación (A), un compartimento para la regulación de la velocidad (B), un interruptor para el clasificador (B1), un rotámetro (C), una unidad de alimentación (D) con su interruptor (D1) que a su vez posee una perilla para la regulación de la alimentación (D2), un recipiente recolector para las partículas finas (F) y uno para las gruesas (G), un filtro pequeño (FP), un ciclón (H), una válvula de estrangulación de aire (I), un silenciador (K), un ventilador (M) con su interruptor (M1), un indicador de la velocidad del clasificador (N) y un panel de control (O) donde se encuentra el interruptor principal (O1), todo esto colocado en soporte metálico con ruedas (P).

La alimentación se coloca en el recipiente (E), ésta es añadida lentamente a la sección de descarga (A), donde ocurre el proceso de separación mediante la aplicación de una fuerza centrífuga y un flujo de aire. Las partículas más finas son recogidas en el recipiente (F) y las restantes en el recipiente (G).

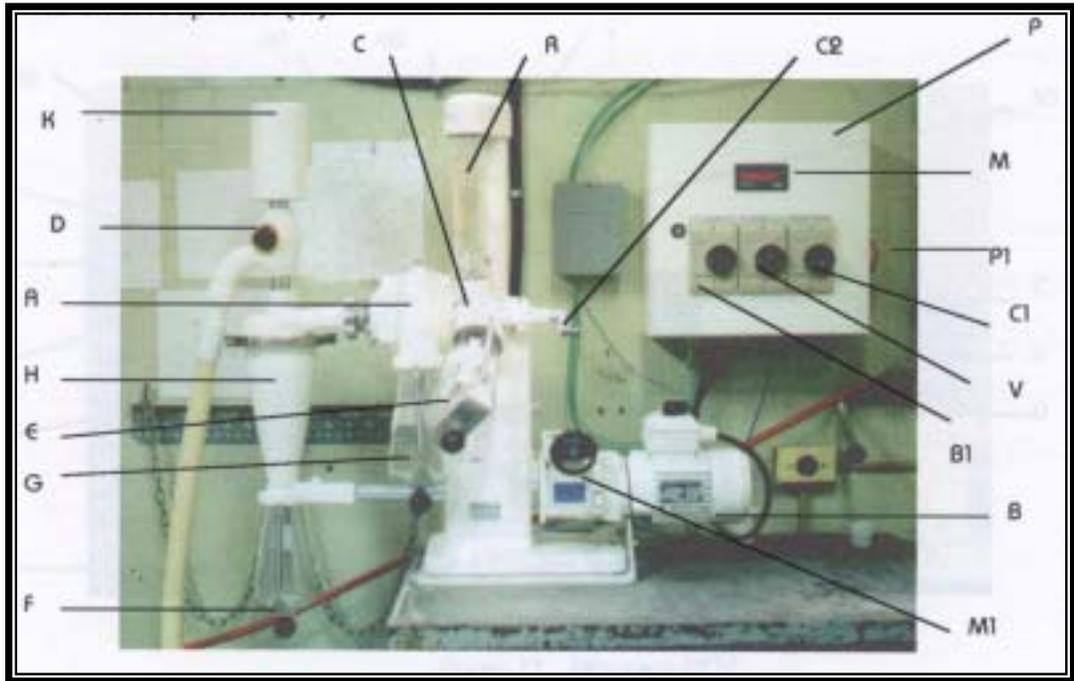


Figura N° 17. Clasificador centrífugo

Leyenda:

A: sección de descarga para la alimentación	G: recolector para partículas gruesas
B: compartimiento de regulación de la velocidad	H: ciclón
B1: interruptor del clasificador	K: silenciador
C: unidad de alimentación	M: indicador de la velocidad del clasificador
C1: interruptor de la unidad de alimentación	M1: regulador de las r.p.m.
C2: perilla para regulación de la alimentación	P: panel de control
D: válvula de paso de aire	P1: interruptor principal
E: recipiente para la alimentación	R: rotámetro
F: recolector para partículas finas	V: ventilador

5.4. Filtratest-UCV

El equipo utilizado para realizar la filtración por formación de tortas a partir de suspensiones de carbonato de calcio es el denominado "FILTRATEST-UCV", el cual se muestra en la figura N° 18. Este consta de una conexión para el sistema suplidor de gas (G), un filtro de gas comprimido (F), una válvula reductora de presión de precisión (V1), cinco rotámetros de diferentes capacidades (R_i), dos manómetros de Bourdon de diferente apreciación (M_i), una válvula de tres vías (V2), una válvula de bola (V3), una celda de filtración a presión (C), una tapa (TC) y una base (BC) para la celda de filtración, una pieza de drenaje para el filtrado (D) y una balanza (B).

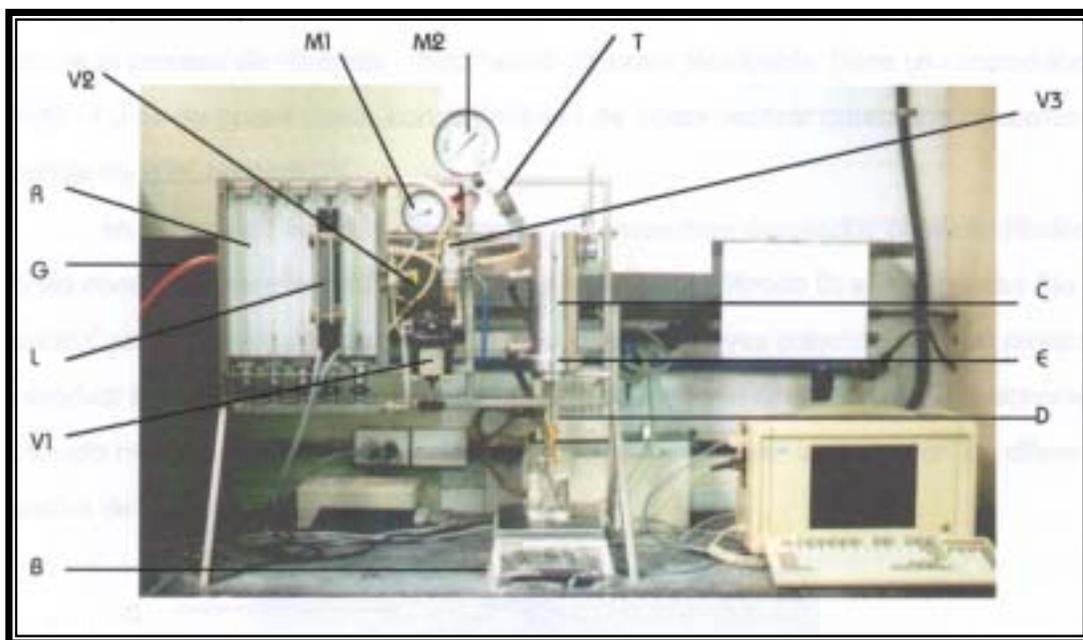


Figura N° 18. Filtratest-UCV

Leyenda:

B: balanza	M1 y M2: manómetros
C: celda de filtración	R: rotámetros
D: pieza de drenaje	T: tapa de la celda de filtración
E: base de la celda de filtración	V3: válvula de bola
G: sistema suplidor de gas	V2: válvula de tres vías
L: lector óptico	V1: válvula reductora de presión



Descripción de equipos

Se hace pasar gas comprimido al sistema mediante la conexión (G), luego éste es enviado a un filtro (F), donde se eliminan todas las impurezas que pueda contener el gas, antes de entrar a la válvula (V1), donde se fija la presión deseada.

Luego se encuentran cinco rotámetros de diferentes diámetros conectados en paralelo, los cuales permiten usar distintos caudales según sea necesario y a continuación un manómetro de Bourdon que registra presiones en un rango de 0 a 10 bar.

Manipulando la válvula (V2), es posible observar en cualquier instante, tanto la presión de descarga como la presión de la celda de filtración (C).

Mediante la válvula de bola (V3) se presuriza o despresuriza la celda de filtración manipulándola adecuadamente.

El componente principal del equipo es la celda de filtración a presión (C), en la que ocurre el proceso de filtración. El material con que está hecha es acero inoxidable. Tiene una capacidad de 400 ml y es de pared doble, con la finalidad de que se puedan realizar pruebas a temperaturas desde los 20 °C hasta 120 °C.

En la base de la celda de filtración (BC), se encuentran acoplados al medio filtrante el anillo donde se forma la torta y la pieza de drenaje del filtrado (D), esta última se fija a la celda (C) por medio de una cerradura tipo bayoneta. Una vez colocada ésta se procede a introducir la suspensión por el tope de la celda de filtración (C), que queda herméticamente cerrada mediante la tapa de la celda (TC).

En la figura N° 19 se muestra las diferentes partes de la base de la celda. *Para ensamblar la base de la celda:* sobre la base de la celda (A) se coloca el aro de goma (B), el medio filtrante (C) y la pieza perforada (D); luego se enrosca la pieza de drenaje (E) y por último la pieza cilíndrica (F), la cual entra en la celda. La pieza (G) es un saca torta y facilita la remoción de la torta formada al final de la prueba.



Descripción de equipos

El área de filtración es de $19,63 \text{ cm}^2$ y el espesor de la torta que se forma en (C) no puede exceder los 5 cm.

El transductor de señal es el dispositivo mediante el cual se transforma la señal de posición del flotador del rotámetro en una señal eléctrica que se transmite al computador y por medio del software que éste posee es posible cuantificar el consumo de gas para cada instante de tiempo.

En el momento en que la celda de filtración (C) es presurizada, el transductor de señal se encarga de transmitir al computador el instante en el cual comienza la filtración, mediante un cambio brusco de posición del flotador en el rotámetro.

El computador también recibe señales eléctricas provenientes de la medición del proceso que se registra en la balanza, correspondientes a la masa del filtrado obtenido durante la prueba.



Figura N° 19. Piezas de la base de la celda



5.5. Equipo de filtración estática HPHT

El equipo de filtración estática (figura N° 20) consta principalmente de una celda de filtración para alta presión y alta temperatura (HPHT), la cual se soporta dentro de una camisa de calentamiento (2). En esta celda se debe medir la temperatura, ya que es diferente a la de la camisa, para lo cual se cuenta con un termómetro (7).

Para inyectar la presión a la celda se emplea una bombona que contiene nitrógeno (6). Adicionalmente, se tiene una balanza digital (9) conectada a una computadora (10) en la que se registran los datos de filtración.

La masa de filtrado que sale por la parte inferior de la celda se recoge en dos tubos de ensayo (8) colocados sobre la balanza digital. La balanza registra la masa de filtrado en cada instante de la filtración y tiene una apreciación de $\pm 0,01$ g. Los datos de filtración (volumen y tiempo de filtrado) se registran en el computador que se encuentra conectado a la balanza.

La camisa de calentamiento esta diseñada especialmente para introducir la celda de filtración, permitiendo que se caliente por el contacto de las paredes. La temperatura se fija a través de un regulador, registrando la temperatura de la camisa con un termómetro (7).

El programa que se utiliza para recolectar los datos de la filtración está codificado en Visual Basic 5.0 para Windows 95. La balanza es del tipo Mettler PM 4000.

La celda de filtración mostrada en la figura N° 21 esta formada por el cuerpo, dos tapas, doce pernos y dos válvulas vástago con sus respectivas empaaduras. En esta celda se emplea papel de filtro y discos porosos como medios filtrantes.



Figura N° 20. Equipo de filtración estática



Figura N° 21. Celda HPHT

5.6. Mastersizer 2000

El Mastersizer 2000 es un equipo analizador de partículas, cuyo rango de medición está entre 0.2 y 2000 μm , basado en el principio de difracción láser. El equipo está constituido por tres secciones mostradas en la Figura N° 22.

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

Accesorios de dispersión (b): su objetivo es preparar la muestra y posteriormente llevarla a la unidad óptica para ser medida. Está constituida por un 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.

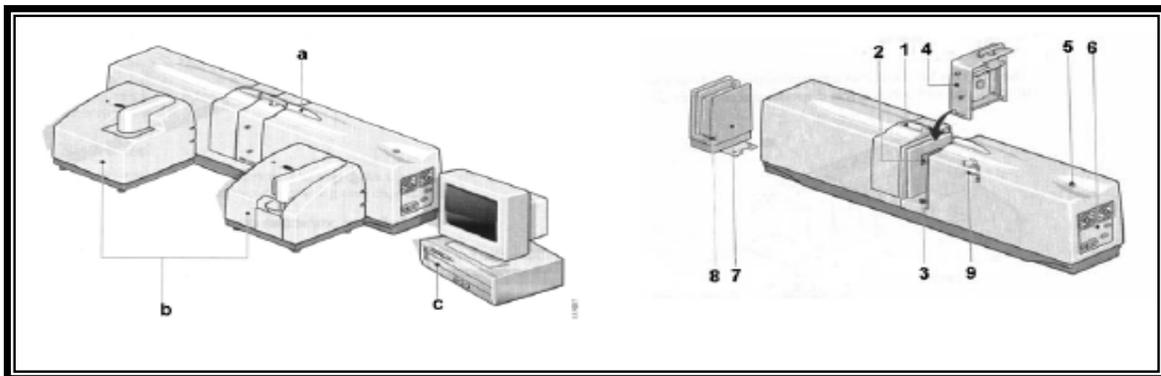


Figura N° 22. Mastersizer. Unidad óptica (a) y unidad interna de muestreo (b)

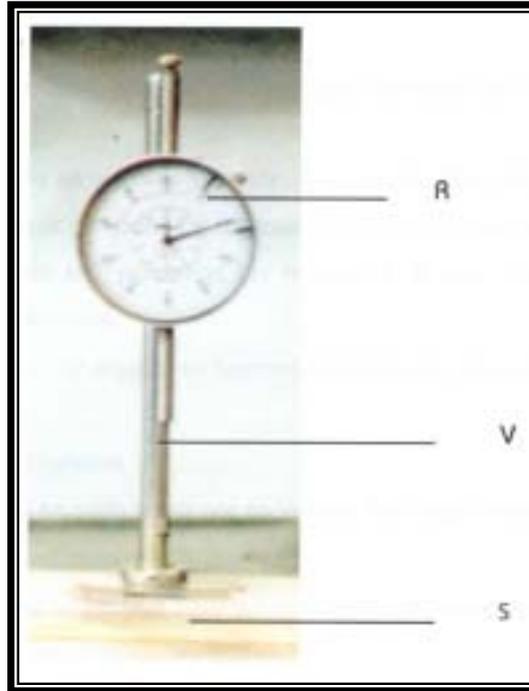


Figura N° 22. Mastersizer 2000 empleado en el LSM - UCV

5.7. Micrómetro

La determinación de la altura de las tortas se puede obtener a partir del micrómetro (Figura N° 23). Este consiste en un vástago que se desliza verticalmente (V), un reloj calibrado que varía su lectura de acuerdo con la posición del vástago (R) y un soporte donde se apoya el equipo (S). La calibración se lleva a cabo ajustando a cero la altura de la base sobre la cual se apoya la torta. Para este ajuste se debe incluir el medio filtrante y la base donde éste es colocado, para luego medir la altura que corresponde a la torta.

El deslizamiento del vástago debe ser suave para impedir que se pierda la calibración realizada para el medio filtrante. La apreciación del equipo es de $\pm 0,01$ mm.



R: Reloj Calibrado
V: Vástago
S: Soporte

Figura N° 23. Micrómetro

5.8. Divisor de muestras PT 1000.

El divisor de muestras es empleado para dividir tanto cuantitativamente como cualitativamente una muestra a granel. El equipo consta de las siguientes partes (Figura N° 24):

- 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.



Descripción de equipos

- Una corona divisora que gira a 800 rpm 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 N° 24. Divisor de muestra PT 1000

5.9. Balanza.

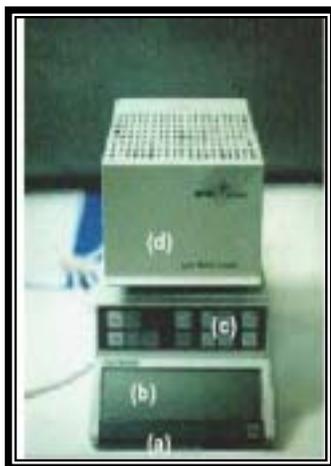
La balanza digital con desecador infrarrojo se muestra en la Figura N° 25, se utiliza para determinar el contenido de humedad presente en una muestra y la masa de la misma. Por medio de este equipo el revoque se forma durante la filtración se seca uniformemente a una temperatura constante a una temperatura constante. La apreciación de la balanza es ± 0.001 g.



Descripción de equipos

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.

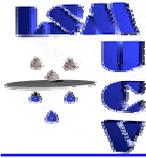
La balanza posee una interfase que le permite reportar al computador en una hoja de cálculo de Excel los valores correspondientes a la masa medida a cada intervalo de tiempo.



Leyenda:

- (a) Tecla de mando principal
- (b) Pantalla
- (c) Teclado al desecador
- (d) Unidad de desecación

Figura N° 25. Balanza con desecador infrarrojo.



6. PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES

6.1. Uso del tamizador Vía Húmeda

El procedimiento a utilizar para preparar las muestras de granulometría estrecha es el siguiente:

1. Preparar una suspensión con 300 gr de muestra de carbonato de calcio que previamente se ha tamizado en seco.
2. Ordenar los tamices en el tamizador en forma creciente en número de mesh de arriba hacia abajo.
3. Verter la suspensión formada en el tamiz superior. Poner en funcionamiento el equipo a través del interruptor de corriente colocando el regulador de tiempo en 15.
4. Con ayuda de un flujo de agua, hacer pasar la muestra a través de todos los tamices. Es importante tener cuidado de no inundar los tamices, pues se perderían las fracciones.
5. Retirar los tamices cuando se apague el equipo.
6. Colectar la muestra presente en cada tamiz por separado. Secar en la estufa a 60 °C durante 24 horas.
7. Pasado este período guardar en un sitio seco y fresco para luego ser empleadas en pruebas de filtración.

6.2. Uso del clasificador centrífugo

1. Encender el equipo.
2. Colocar el recipiente para la recolección de finos (F) y para la recolección de gruesos (G).
3. Encender (B1) y (M1).
4. Colocar la alimentación en el recipiente (E).
5. Regular las revoluciones por minuto necesarias para obtener la clasificación deseada.



Procedimientos Experimentales

6. Fijar la altura del rotámetro deseada.
7. Subir el recipiente (E) y ajustarlo para que no se caiga.
8. Añadir lentamente la alimentación en (C) mediante la ayuda de la perilla (C2).
9. Una vez terminada la alimentación retirar las partículas más finas del recipiente (F) y guardarlo en un lugar limpio y fresco.
10. Disminuir las revoluciones por minuto hasta cero y apagar el soplador.
11. Retirar el resto de los recipientes.
12. Proceder a limpiar todo el equipo.
13. Colocar el recipiente que se encontraba anteriormente con las partículas gruesas como alimentación.
14. Colocar los recipientes (F) y (G).
15. Repetir los pasos 3 al 14 hasta obtener las fracciones deseadas.

6.3. Uso del Filtratest –UCV

6.3.1. Conexión del sistema de suministro de aire comprimido al equipo Filtratest.

1. Conectar, mediante un acople manual de acción rápida (A), el sistema suplidor de aire comprimido al equipo. Cabe destacar que si el sistema suplidor de aire comprimido a utilizar corresponde a una bombona de gas, se debe verificar, antes que nada, que la válvula de descarga de la bombona esté completamente cerrada.
2. Verificar que el tornillo de la válvula reguladora de presión de precisión (V1) se encuentre completamente desenroscado.
3. Verificar que la válvula de bola (V3) que permite el paso de gas a la celda de filtración (C), esté cerrada.
4. Abrir completamente la válvula de descarga de la bombona de gas o en su defecto la conexión de aire directa (por tubería).



Procedimientos Experimentales

5. Fijar la presión de descarga de la bombona, manipulando convenientemente, la válvula de aguja de la misma. Debe tenerse en cuenta que la presión de descarga fijada no debe ser mayor de 10 bar por razones de seguridad, ya que la máxima diferencia de presión que puede soportar el equipo corresponde a este valor.
6. Abrir la válvula del rotámetro (R) que corresponda (antes de la realización de cada prueba debe seleccionarse el rotámetro a utilizar de acuerdo a la presión de trabajo), asegurándose que las correspondientes a los otros rotámetros del equipo permanezcan cerrados.
7. Colocar la válvula de tres vías (V2) en posición vertical para observar en el manómetro el valor de presión que será fijado a continuación. Cabe destacar que colocando la válvula en posición horizontal, el manómetro señala la caída de presión en la celda de filtración (C).
8. Fijar la presión de trabajo enroscando el tornillo de la válvula reguladora de precisión (V1).

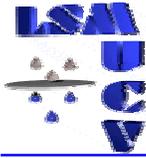
6.3.2. Uso del equipo Filtratest

1. Verificar que todas las válvulas estén cerradas.
2. Ensamblar las piezas de la base de la celda de filtración en el orden siguiente:
 - Colocar la base de la celda de filtración con la rosca hacia arriba.
 - Colocar en el interior de la celda la empacadura correspondiente después de chequear que ésta se encuentra limpia.
 - Colocar el medio filtrante.
 - Colocar la pieza metálica perforada.
 - Enroscar la base para la celda de filtración a la pieza de drenado del filtrado y ajustarla correctamente con la llave correspondiente.



Procedimientos Experimentales

- Girar la base de la celda de filtración a manera de colocar en la parte superior de la misma (por el lado donde queda visible el medio filtrante), el anillo donde tendrá lugar la formación de la Estructura porosa.
- Colocar la base de la celda de filtración así conformada, en la parte inferior de la celda de filtración ajustándola en forma adecuada.
- 3. Tarar la balanza (B) una vez que se haya colocado sobre ésta el recipiente de recolección del filtrado, cuidando que éste quede justamente debajo de la pieza de drenado del filtrado (D).
- 4. Estrangular la manguera de goma colocada en la salida de la pieza de drenado con una pinza, cuidando que ésta no toque el recipiente de recolección del filtrado.
- 5. Abrir completamente la válvula de la línea de aire.
- 6. Preparar en un beaker la suspensión de CaCO_3
- 7. Abrir la tapa de cerrado rápido (T) de la celda de filtración (C), levantando la palanca que se encuentra del lado derecho de la misma hasta que el dispositivo cargado con un resorte libere la tapa.
- 8. Agitar la suspensión y verterla en la celda de filtración (C) a fin de evitar que se pierda algo de muestra en las paredes del beaker.
- 9. Cerrar la tapa de cerrado rápido (T) cuidando que la palanca quede paralela a la celda.
- 10. Abrir la llave correspondiente al rotámetro a usar.
- 11. Presurizar la celda (C) colocando la válvula de bola (V3) en posición vertical.
- 12. Regular con (V1) la presión mínima.
- 13. Determinar visualmente, con la ayuda de una linterna, el momento en el que se haya completado la formación de la torta, cuando



Procedimientos Experimentales

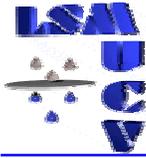
aproximadamente la mitad de la superficie visible de ésta esté opaca. En este momento se inicia el proceso de deslicorización de la torta.

14. Después de cumplido el tiempo previamente establecido para la deslicorización, se procede a despresurizar la celda mediante la manipulación de la válvula (V3), además se debe cerrar (V2), y cerrar completamente (V1) para luego abrir la tapa de la celda.
15. Retirar la base de la celda de filtración girando la manilla de la misma hacia el frente, para proceder a la descarga de la torta.
16. Cerrar completamente la válvula de la línea de aire.
17. Cerrar la llave del rotámetro usado.
18. Medir la altura de la torta en cinco puntos diferentes con el micrómetro.
19. Pesar en la balanza un plato de aluminio vacío y anotar esta lectura; sacar la torta de la pieza con el sacatorta y echarla en este plato, pesar la masa del plato más la torta húmeda.
20. Secar la torta en el secador infrarrojo.
21. Anotar la masa de la torta seca leída en la balanza.
22. Para más detalles sobre el uso del Filtratest-UCV, se recomienda revisar el Trabajo Especial de Grado de Caryuly Sánchez.

6.4. Uso del Mastersizer

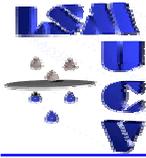
6.4.1. Medición de la distribución de tamaño de partícula

La medición de la distribución de tamaño de partícula para las mezclas en el estudio se realiza con el equipo Mastersizer, el cual se observa en la figura N° 22. El procedimiento general se cita a continuación [Marvel Instruments, 1995]:



Procedimientos Experimentales

1. Encender el equipo.
2. Entrar en el programa con el que funciona el equipo.
3. Llenar el beaker con 500 ml de agua aproximadamente y colocarlo en la unidad interna de muestreo.
4. Introducir el agitador dentro del beaker con agua para comenzar la limpieza interna del equipo.
5. Repetir los pasos 1 y 2 dos veces más.
6. Alinear el equipo (ajustar el láser para la medición), siguiendo las instrucciones presentadas en el manual del equipo.
7. Realizar el blanco siguiendo los pasos que se indican en el manual.
8. Tomar una pequeña porción de muestra a analizar, luego introducirla poco a poco en el beaker hasta que el parámetro, que en el computador se indica como "obscuration", sea aproximadamente 13% (no debe exceder el 20%).
9. Proceder a realizar los cálculos correspondientes con el programa que contiene el computador anexo al equipo.
10. Crear un archivo con los datos generados por el programa y guardarlos.



7. METODOLOGÍA Y PLAN DE EXPERIENCIAS

Para poder cumplir con los objetivos planteados, se llevó a cabo un plan de trabajo dividido en dos fases según el medio poroso empleado:

En este trabajo se utilizaron medios consolidados (discos Fann) con un tamaño de poro nominal de $10\ \mu\text{m}$ y medios no consolidados (tortas de CaCO_3 con DTP controladas).

7.1. Primera fase: Medios consolidados

PROCESO DE LAVADO DEL DISCO POROSO

Dado que los discos porosos (discos FANN de $10\ \mu\text{m}$) no eran nuevos, el proceso de lavado consistió en la recuperación de los mismos, sumergiéndolos en una solución diluida de ácido clorhídrico (HCl) al 3% durante un lapso de tiempo de 30 minutos; destacando que este ácido con esta concentración, no ataca al disco FANN compuesto de aloxita. El tiempo que se fijó es el necesario para remover prácticamente todo el carbonato de calcio que se encontrase depositado en estos discos [Ramírez, 2002]. Posteriormente, se procedió a permear con agua a 400 psi una cantidad aproximada de 15 discos, con la finalidad de retirar los restos de solución de ácido que hayan podido quedar dentro de los poros de los mismos. De todos estos discos lavados, uno solo resultó apto para realizar las pruebas de permeabilidad.



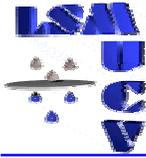
DETERMINACIÓN DE LA PERMEABILIDAD

Como la permeabilidad es una propiedad característica del medio, se realizó en primer lugar una prueba de permeación utilizando agua como fluido a una diferencia de presión de 40 psi y 30° C en la celda HPHT. Los valores de líquido permeado fueron registrados cada segundo hasta agotarse el fluido; esto fue posible a través de la conexión de la balanza al computador, el cual recopilaba la información mediante el programa Balance-Link. La limpieza del disco se verificó realizando la gráfica respectiva de acuerdo al método de permeación explicado en la sección 3.3.1.1 del Marco Teórico; procurando que el valor de la pendiente de la recta obtenida a partir de dicho método reportara un valor aproximado entre 7 y 8, donde estos valores están relacionados con la permeabilidad del disco poroso de 10 μm [Ramírez, 2002], los mismos son la única referencia que se tiene para el lavado de los discos.

DETERMINACIÓN DE LA POROSIDAD DEL DISCO POROSO.

Método de intrusión de líquido:

Para determinar el volumen de espacios vacíos se pesó el disco limpio y seco. Luego, se colocó dentro de la celda HPHT el disco en compañía de agua para someter este sistema a una diferencia de presión de 40 psi, haciendo pasar el agua a través del disco pero evitando que ésta drene completamente, con la finalidad de que los poros del disco queden completamente saturados. Posteriormente, se pesa el disco saturado para determinar la masa del sólido mojado (M_{SM}), a la cual se le resta la masa del sólido limpio y seco, para obtener como resultado la masa de agua dentro de los poros del medio. Dividiendo este valor entre la densidad del agua, se obtiene directamente el volumen de espacios vacíos (V_{EV}). Al dividir este volumen entre el volumen total del medio se obtiene la porosidad (ϵ).



Metodología y Plan de Experiencias

Método de densidad:

Para utilizar este método se necesita conocer la densidad (ρ) del disco poroso de $10\ \mu\text{m}$, para ello se utilizó el valor de $3,315\ \text{g}/\text{cm}^3$ [Ramírez, 2002], obtenido por Ramírez en su Trabajo Especial de Grado. Posteriormente, se pesó el disco poroso limpio y seco para obtener la masa de sólido (M_s) y se dividió entre la densidad del medio (ρ) para obtener el volumen de sólido (V_s). Luego, se determinó el volumen total del medio (V_{TM}), multiplicando el área de sección transversal del disco por su espesor. Restando este volumen al volumen de sólido (V_s) se obtiene el volumen de espacios vacíos (V_{EV}), que al dividirlo entre el volumen total del medio (V_{TM}), arroja el valor de la porosidad (ε).

VELOCIDAD DE DRENAJE CAPILAR

Una vez pesado el disco poroso limpio y seco se procedió a aplicarle al sistema disco poroso – agua ubicado en la celda HPHT, los siguientes valores de diferencia de presión (ΔP , psi) 0; 1; 2; 3; 4; 20; 25; 30; 50; 100; 150; 200 y 300; con la finalidad de saturar el disco poroso (esto se logra drenando solamente una parte del líquido). Posteriormente, para cada presión se fijaron intervalos de tiempo que iban desde los 10 s. 20, 50, 100, 150, 250, 300, 350 hasta los 400 s.; pesando al término de cada intervalo de tiempo la masa del disco húmedo, con la finalidad de garantizar que para cada presión aplicada se pueda alcanzar el valor de saturación de equilibrio (S_∞).

Por último, se realizaron gráficas de saturación contra tiempo para cada una de las experiencias realizadas. Estas curvas de drenaje capilar fueron ajustadas por el modelo de Nicolaou, explicado en la sección 3.5 del Marco Teórico.



DETERMINACIÓN DE LA CURVA DE PRESIÓN CAPILAR

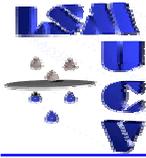
Para determinar la curva de presión capilar se fijaron los siguientes valores de diferencial de presión (ΔP , psi) 0; 1; 2; 3; 4; 20; 25; 30; 50; 100; 150; 200 y 300 en la celda HPHT, de tal manera que este rango abarcara desde la presión capilar de entrada (P_{ke}) hasta el valor de ΔP para el cual se alcanza la saturación remanente (S_r).

Para cada presión aplicada, se procedió de la siguiente manera: se colocó el disco poroso dentro de la celda HPHT junto con 100 ml de agua y se le aplica un ΔP hasta saturar el disco completamente, se detiene en este punto la experiencia para desalojar el agua que queda en la celda y luego se continúa el drenado únicamente con el disco saturado. La saturación de equilibrio se alcanza teóricamente para un tiempo infinito, pero a partir de las pruebas preliminares se supuso que se alcanza este valor para un tiempo de 400 segundos.

Una vez obtenidos los datos necesarios (Presión capilar (P_k) y Saturación de equilibrio (S_{∞})) se realizaron las curvas de presión capilar, que posteriormente son ajustadas por el Modelo Potencial con ajuste de Parámetros Libres y por el Modelo de Rosin Rammler adaptado, ambos explicados en la sección 3.8 del Marco Teórico.

DETERMINACIÓN DE LA CURVA DE DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PORO

A partir de la curva de presión capilar y utilizando la ecuación de Laplace-Young se obtuvo el radio hidráulico de poro (r_H). Posteriormente, para obtener las curvas, se usó el modelo de distribución en volumen de poro y el modelo de distribución en número de tamaños de poro (Modelo de Nicolaou), ambos modelos explicados en la sección 3.9 del Marco Teórico.



7.2. Segunda fase: Medios porosos no consolidados

Se utilizaron como medios no consolidados, tortas de CaCO_3 con Distribución de Tamaño de Partículas (DTP) controladas.

PREPARACIÓN DE LAS TORTAS DE CaCO_3

Las granulometrías que se utilizaron fueron las siguientes:

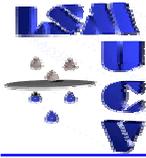
a) Tres fracciones estrechas

- Fracción a 5000 r.p.m., denominada como la fracción “finos”, obtenidos por tamizado vía seca y por la técnica de clasificación centrífuga.
- Fracción de 38-45 μm , denominada como la fracción de “intermedios”, obtenidos mediante tamizado vía seca – vía húmeda.
- Fracción de 53-63 μm , denominada como la fracción de “gruesos”, obtenidos mediante tamizado vía seca – vía húmeda.

Para cada uno de estas fracciones se comprobó la DTP con el Mastersizer 2000.

b) Una mezcla amplia, teniendo como límites superior e inferior las fracciones de gruesos y finos, respectivamente; con un X_{50} parecido al de la fracción de intermedios.

Para obtener la mezcla amplia, se utilizó el programa de elaboración de mezclas diseñado en Excel y disponible en el Laboratorio de Separaciones Mecánicas; para realizar el diseño y la simulación de la misma. Una vez obtenida la mezcla por simulación se verificaba su DTP en el Mastersizer 2000, hasta que esta cumpliera con los parámetros requeridos: mantener constante el X_{50} de la fracción de intermedios, que la mezcla fuera lo más amplia posible y monomodal.



Metodología y Plan de Experiencias

Cuando se obtuvo la mezcla requerida, esta se hizo pasar por el divisor de muestra con la finalidad de obtener muestras con la misma característica granulométrica de la base.

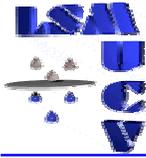
Para cada DTP (estrechas y mezcla) se preparó una suspensión con 20% en peso de carbonato (CaCO_3) en agua, con el fin de obtener las tortas en el equipo Filtratest-UCV con un ΔP máximo de 2 bar y temperatura ambiente. Para el caso de los finos se trabajó hasta 4 bar, verificándose que en el rango de 0 – 4 bar las tortas de CaCO_3 no son compresibles. Además, se procuró mantener una altura de la torta de aproximadamente 30 mm, para evitar un cuarteo de la torta.

DETERMINACIÓN DE LA PERMEABILIDAD Y LA POROSIDAD

El valor de permeabilidad se obtiene a partir del método de filtración estática explicado en la sección 3.3.1.2 del Marco Teórico. Por su parte, el valor de porosidad se obtiene a partir de los datos de drenaje capilar, estos son masa de torta húmeda, masa de torta seca y altura de la torta, usando el método de densidad mencionado en la sección 3.1.2.

CINÉTICA DE DRENAJE CAPILAR

Para cada fracción usada se pesó una muestra de 90 gr., que era mezclada con 360 ml de agua y que posteriormente se le aplicaron las siguientes diferencias de presión (ΔP , mbar) 200, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1600 y 2000 (para el caso de los finos hasta 4000 mbar), en el equipo Filtratest UCV, fijando para cada presión los siguientes intervalos de tiempo (t, seg) 10, 50, 100, 200 y 300. Una vez completada la prueba de drenaje para un tiempo fijado, se desmontaba la celda y se medía la altura de la torta



Metodología y Plan de Experiencias

obtenida mediante el uso del micrómetro, obteniéndose también datos de masa de torta húmeda y masa de torta seca.

Posteriormente se realizaron las correspondientes gráficas de saturación vs. tiempo para cada una de las experiencias realizadas, ajustándose estas curvas por el modelo de Nicolaou, presentado en la sección 3.5 del Marco Teórico.

DETERMINACIÓN DE LA CURVA DE PRESIÓN CAPILAR.

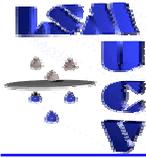
Las curvas de presión capilar son generadas a partir de los datos de drenaje capilar en la cual se obtienen datos de saturación de equilibrio (S_{∞}) para cada diferencia de presión (la diferencia de presión es igual a la presión capilar solamente en el equilibrio), lo cual representa un punto en la curva de presión capilar. Posteriormente estas curvas son ajustadas mediante el modelo Potencial con ajuste por Parámetros Libres y el Modelo de Rosin Rammler adaptado, explicados con anterioridad en la sección 3.8 del Marco Teórico.

DETERMINACIÓN DE LA CURVA DE DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PORO.

Para obtener la distribución de tamaños de poro, se realizó la misma metodología usada para los medios porosos consolidados.

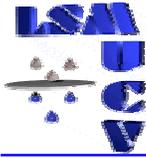
CONSUMO DE GAS.

Para realizar las curvas de consumo de gas se utilizaron los datos reportados durante el proceso de drenaje capilar de las tortas, estos datos son consumo de gas y tiempo. Posteriormente, con los valores de consumo



Metodología y Plan de Experiencias

de gas (dQ/dt) vs. tiempo (t) se realizan las representaciones gráficas respectivas, con la finalidad de determinar el consumo de gas en el equilibrio (Q_{∞}) para cada diferencia de presión utilizada. Posteriormente se representa el consumo de gas en el equilibrio vs. ΔP , para obtener la curva de consumo de gas en el equilibrio.



8. ANÁLISIS DE DATOS

En esta sección se analizan los datos obtenidos en el laboratorio. Este análisis se divide en dos partes: la primera referida a la caracterización de medios porosos consolidados (Disco Poroso de 10 μm) y la segunda referida a la caracterización de los medios porosos no consolidados (Estructura porosas de CaCO_3 con DTP controladas). Seguidamente se describe la secuencia llevada a cabo para obtener los datos experimentales de las pruebas realizadas así como su análisis.

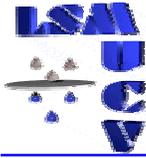
8.1 Medios Porosos Consolidados

Para el estudio de los medios porosos consolidados se habían seleccionados discos porosos Fann de diámetro de poro nominal de 10 μm y 20 μm . Debido a que la presión capilar de entrada del disco de 20 μm , (valor estimado por cálculo con la ecuación de Laplace-Young usando el tamaño nominal de 20 μm) es una presión absoluta por debajo de la atmosférica se decidió no utilizar el disco de 20 μm porque se tendría que trabajar con presión de vacío y no se cuenta con el equipo necesario para realizar estas pruebas. El principal inconveniente presentado por los discos de 20 μm es que al poseer un tamaño de poro mayor su presión capilar de entrada es menor que la del disco de 10 μm , por lo tanto a presión atmosférica ya existe un proceso de drenaje de los poros de estos discos.

8.1.1 . Obtención de los Datos de Porosidad

Los valores de porosidad del disco fueron obtenidos utilizando los métodos de intrusión de líquido y por el método de densidad, como se describe en la metodología y plan de experiencias.

Es necesario destacar que el método de intrusión de líquido puede conducir a cometer muchos errores debido a que, para



aplicarlo, se debe suponer que el disco queda completamente saturado, lo cual es difícil de asegurar.

Se debe hacer notar que este procedimiento fue utilizado debido a su fácil aplicación y a la carencia dentro del Laboratorio de Separaciones Mecánicas de un equipo que permita calcular la porosidad con una mayor precisión.

También se calculó la porosidad del disco poroso de 10 μm utilizando el método de densidad. Para utilizar este método es necesario conocer la densidad del sólido, por lo que se utilizó el valor de densidad del sólido calculada por Ramírez en su Trabajo Especial de Grado (3.315 g/cm³).

8.1.2 Obtención de datos de Permeabilidad

Para la obtención de la permeabilidad del disco poroso de 10 μm se realizó una prueba de permeación a una diferencia de presión aplicada de 40 psi, utilizando agua como fluido y controlando la temperatura en 30 °C [Salazar, 2001]. En este proceso las variables tomadas en consideración fueron el volumen de líquido permeado y el tiempo.

A partir de la representación gráfica del volumen de líquido permeado vs tiempo y aplicando la ecuación de Darcy (ecuación N° 4 del marco teórico) se pudo obtener la permeabilidad del disco.

En la figura N° 26 se ilustra la curva de permeación correspondiente al disco poroso de 10 μm .

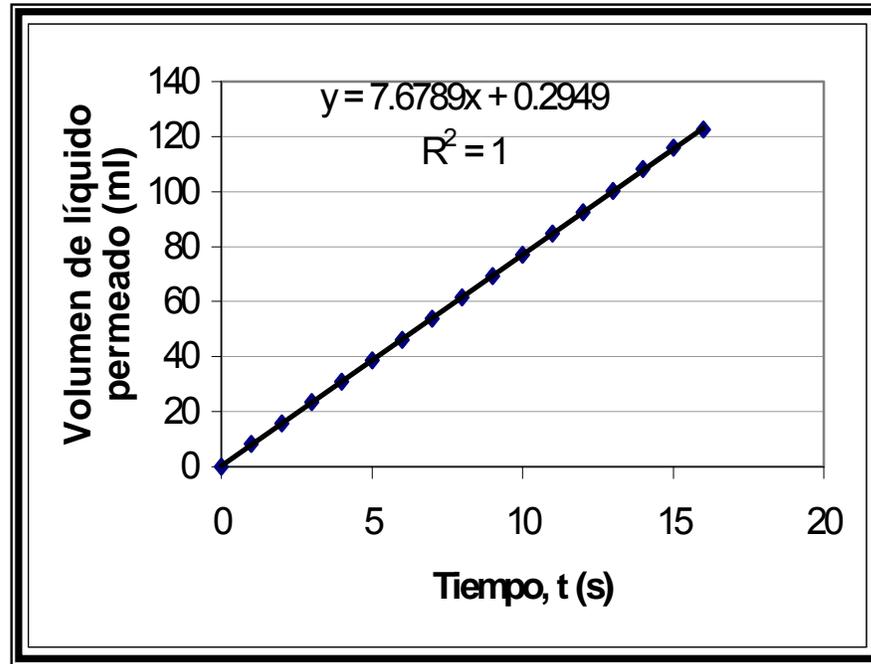
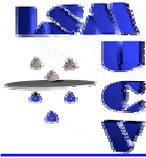


Figura N° 26. Curva de permeación para el disco poroso de 10 μm a ΔP de 40 psi y $T = 30^\circ \text{C}$.

Es importante destacar que el comportamiento de la curva de permeación debe ser el de una línea recta que pasa por el origen cuando la diferencia de presión aplicada es 40 psi. La *temperatura* de operación será de 30°C (86°F) o hasta 90°F aproximadamente, contemplada en la norma API RP-13B- 2 [Salazar, 2001].

Se puede notar que la pendiente de la curva de permeación tiene un valor de 7,68 por lo que se encuentra ubicada dentro de los límites establecidos en la metodología (que la pendiente de la curva de permeación esté entre 7 y 8) para considerar que el disco ha sido recuperado.



8.1.3 Obtención de los datos para la curva de cinética de Drenaje y Presión Capilar.

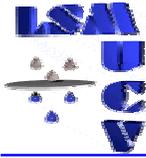
Las experiencias para obtener la curva de cinética de drenaje y de presión capilar para disco poroso de 10 μm fueron realizadas en el equipo de filtración estática HPHT. En estas experiencias se obtuvieron los valores de la saturación de equilibrio (S_{∞}) para cada ΔP y para ello se tomaron las siguientes mediciones.

- Masa del disco húmedo y masa del disco seco.
- El espesor del disco poroso.

Donde los valores de masa del disco seco y espesor del disco permanecen constantes por lo que se realiza una sola medición de estos valores.

Para garantizar el valor de saturación de equilibrio para cada ΔP se realizó una gráfica de los valores de saturación contra tiempo. A partir de esta gráfica se determinó el tiempo para el cual la saturación permanecía constante lo que indica que se alcanzó la condición de equilibrio, por lo tanto se asumió este valor como la saturación de equilibrio para ese ΔP .

Es necesario destacar que a ΔP menores a 4 psi, la presión no permanecía constante a lo largo de toda la experiencia. Para solventar este problema se tuvo que manipular la válvula para mantener la presión constante durante todas las experiencias para ΔP menores a 4 psi.



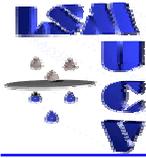
8.2. Medios Porosos No Consolidados

El estudio de los medios porosos no consolidados se realizó construyendo tortas de Carbonato de Calcio comercial INTECARB, grado 40-45, el cual fue procesado vía tamizado y aeroclasificación para obtener las fracciones estrechas estudiadas.

8.2.1 Distribución de Tamaño de Partículas (DTP) para las fracciones estrechas.

Para caracterizar los medios porosos no consolidados fueron consideradas fracciones estrechas de carbonato de calcio las cuales están clasificadas en ocho fracciones gruesas que van desde 38 μm hasta 125 μm identificadas así con el tamaño nominal promedio del tamiz por medio del cual fueron separadas en el tamizador Vía Húmeda descrito en la sección 5.1 y un grupo de tres fracciones finas que abarcan un rango desde 3000 hasta 5000 rpm, representadas de esta manera con el número de revoluciones por minuto (rpm) con el que se obtuvieron en el clasificador centrífugo. En la sección 8.2.2 se seleccionarán las fracciones a emplear en este trabajo.

La distribución de tamaño de partícula de estas fracciones se obtuvieron a través del Mastersizer 2000 y en la figura N° 27 se representan la distribución de frecuencia acumulada $F(x)$ vs el tamaño de partícula. En las tablas N° 4 y 5 se muestran las características granulométricas de todas las fracciones estrechas de carbonato de calcio.



Análisis de Datos

Tabla N° 4. Características granulométricas de las fracciones estrechas mayores de 38 μm .

	Fracción 38-45	Fracción 45-53	Fracción 53-63	Fracción 63-75	Fracción 75-90	Fracción 90-106	Fracción 106-125	Fracción > 125
Mediana X50 (μm)	49,93	58,55	67,10	81,42	97,42	114,53	137,21	197,70
Tamaño promedio D_{3,2}	48,13	56,42	64,66	78,75	94,39	110,96	132,87	188,59
Desviación estándar geométrica DS_g (adim)	1,3122	1,3076	1,3081	1,2936	1,2875	1,2866	1,2888	1,3709

Tabla N° 5. Características granulométricas de las fracciones estrechas menores de 38 μm .

	Fracción 3000 rpm	Fracción 4000 rpm	Fracción 5000 rpm
Mediana X50 (μm)	50,97	25,35	20,20
Tamaño promedio D_{3,2}	39,67	23,49	23,47
Desviación estándar geométrica DS_g (adim)	1,7904	1,4764	1,5186

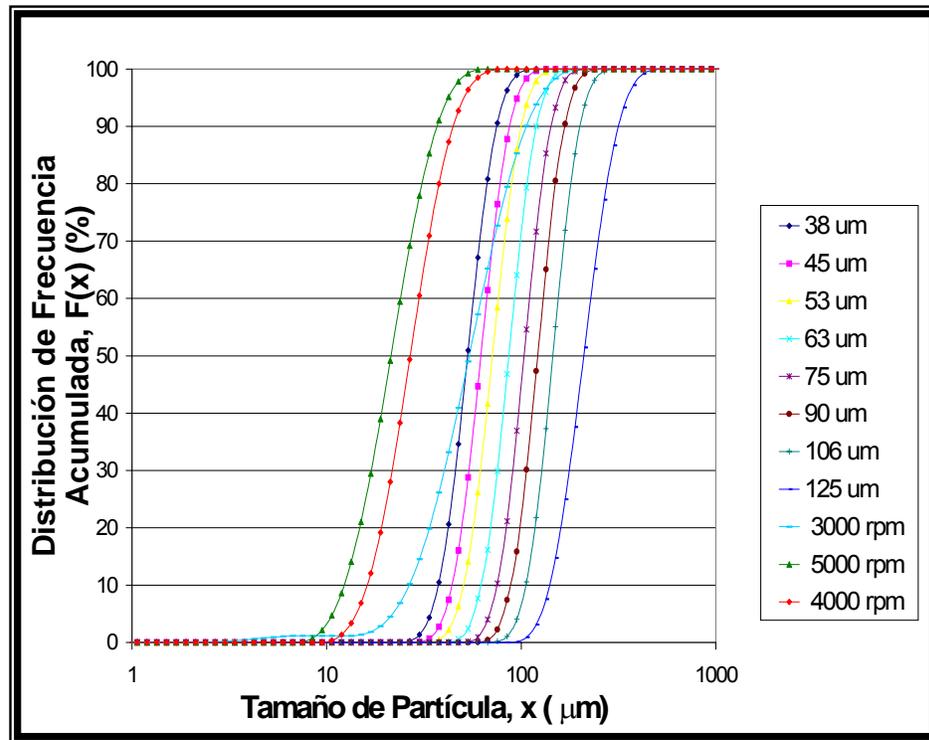
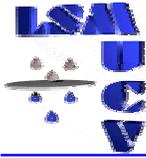


Figura 27. Curvas de distribución de frecuencia acumulada de las fracciones estrechas de Carbonato de Calcio.

Como se puede apreciar en la figura N° 27 las curvas de distribución de frecuencia acumulada para las fracciones gruesas (mayores a 38 μm) son prácticamente paralelas entre sí, esto se debe a que su desviación estándar geométrica es similar (alrededor de 1,30). Sin embargo se puede notar que no existe este paralelismo entre las fracciones finas y las fracciones gruesas debido a que la desviación estándar de las fracciones finas es mayor (entre 1,5 y 1,8). Es necesario resaltar que todas estas fracciones son monomodales por lo tanto son útiles para este estudio.

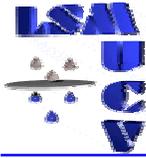


8.2.2 Distribución de tamaño de partícula de las fracciones seleccionadas.

En este estudio se trabajó con una fracción fina, una intermedia y una fracción gruesa para observar el comportamiento de la curva de presión capilar al variar la distribución de tamaño de partícula. En este sentido, se seleccionaron como fracción fina la correspondiente a 5000 rpm ($X_{50} = 20,2 \mu\text{m}$; DSg 1,52), la fracción intermedia correspondiente a 38-45 μm ($X_{50} = 49,9 \mu\text{m}$; DSg 1,31) y la fracción gruesa correspondiente a 53-63 μm ($X_{50} = 67,1 \mu\text{m}$; DSg 1,30). En la figura N° 28 se muestran las fracciones seleccionadas.



Figura 28. Curva de distribución de frecuencia acumulada para las fracciones estrechas seleccionadas.



8.2.3 Distribución de tamaño de partícula (DTP) para la mezcla.

Para estudiar el comportamiento de la curva de drenaje y la curva de presión capilar al variar la desviación estándar de las fracciones estrechas seleccionadas, se procedió a elaborar una mezcla cuyas características principales eran que su amplitud fuera mayor que la de las fracciones estrechas y que conservara el X_{50} de la fracción intermedia ($49,9 \mu\text{m}$).

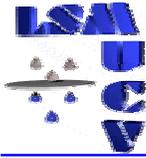
Para realizar esta mezcla se utilizaron las fracciones de 5000 rpm, 4000 rpm, 3000 rpm, $38 \mu\text{m}$, $45 \mu\text{m}$ y $53 \mu\text{m}$. Es necesario resaltar que en un principio se pensó en elaborar la mezcla a partir únicamente de las fracciones estrechas seleccionadas (5000 rpm, $38\mu\text{m}$ y $53 \mu\text{m}$), pero al utilizar el programa de elaboración de mezclas del LSM no se obtuvo la mezcla, en la fase de simulación, con las características requeridas e incluso esta mezcla contenía una bimodalidad debido a que faltaban partículas de tamaños intermedios y por lo tanto no resultó útil para este trabajo.

Para corregir este problema se decidió colocar todas las fracciones obtenidas entre 5000 rpm y $53 \mu\text{m}$, de esta manera se pudo evitar que la mezcla preparada presentara bimodalidades.

8.2.3.1 Diseño y simulación de mezcla.

Se utilizó el programa de Definición de Mezclas del Laboratorio de Separaciones Mecánicas (LSM-UCV) utilizando como base la fracción de intermedios y se modificó hasta obtener (por diseño) la granulometría con las características deseadas (amplitud y X_{50}).

Con el programa de elaboración de mezcla se realizó un balance de masa en partículas tomando como base todas las fracciones estrechas comprendidas entre 5000 rpm y $53 \mu\text{m}$ para reproducir la mezcla con la granulometría diseñada y así obtener las fracciones en peso de cada granulometría para posteriormente preparar la mezcla.



8.2.3.2 Distribución de tamaño de partícula (DTP) de la mezcla diseñada.

Una vez diseñada y simulada la mezcla que cumplía con las características mencionadas (en cuanto a amplitud y X_{50}) se procedió a realizar el estudio granulométrico, a través de la técnica de difracción láser, en el equipo Mastersizer 2000 para verificar que la mezcla preparada correspondía a la mezcla diseñada mediante el uso del programa de Definición de Mezcla (LSM-UCV). En la figura N° 29 se representa la granulometría de la mezcla preparada así como la de las fracciones estrechas seleccionadas.

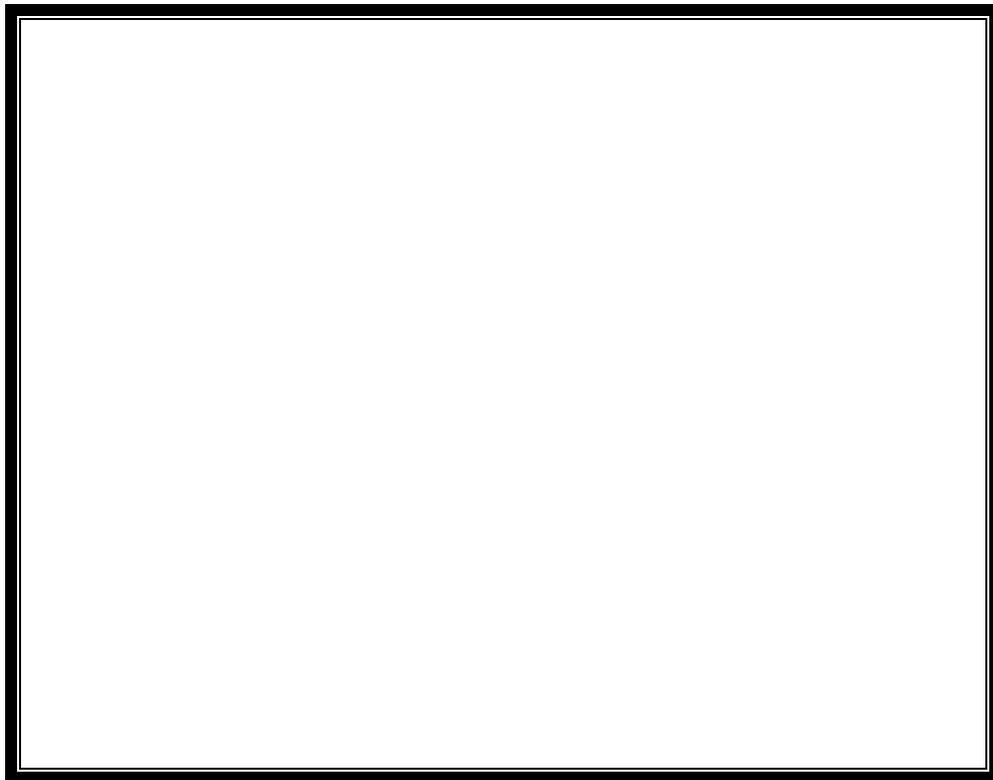


Figura N° 29. Curvas de distribución de frecuencia acumulada para las fracciones estrechas seleccionadas y la mezcla preparada.



Como se puede observar en la figura N° 29, la mezcla preparada tiene una desviación estándar mayor que las fracciones estrechas y además posee un X_{50} muy cercano al X_{50} de la fracción 38-45 la cual representa la fracción intermedia. Estos valores se encuentran en la tabla N° 6. De esta manera se verifica que la mezcla preparada cumple con las características requeridas y por lo tanto pudo ser utilizada en este trabajo.

Tabla N° 6. Características granulométricas de las fracciones estrechas y la mezcla utilizadas en este trabajo.

	X_{50}	$D_{3,2}$	DSg
Finos	20.20	23.472	1.5186
Intermedios	49.93	48.143	1.3122
Gruesos	67.10	64.658	1.3081
Mezcla	48.90	38.369	1.7544

8.2.4 Obtención de datos de porosidad

Para obtener los datos de porosidad se determinó la altura promedio de las tortas formadas para cada granulometría. Debido a que la altura de la torta es muy sensible para el cálculo de la porosidad, se decidió medirla en cinco puntos diferentes de la misma y promediarlas.

Además de la altura es necesario conocer también la masa de la torta seca. Con la altura de la torta, la masa de la torta seca y otros parámetros característicos del sólido como la densidad del carbonato (cuyo valor es 2,71 g/ml) y el área de la sección transversal (que es 19,63 cm²) se pudo determinar la porosidad de las tortas.



8.2.5 Obtención de datos de permeabilidad

Para la obtención de la permeabilidad de las tortas se realizaron pruebas de filtración según el método de filtración estática descrito en la sección 3.3.1.2 del marco teórico. En este proceso las variables tomadas en consideración fueron el volumen de filtrado y el tiempo.

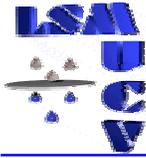
El volumen de filtrado se determinó utilizando los programas DRUNU y DRUAUS, que opera en un computador conectado al equipo de filtración Filtratest-UCV. Este programa permitió el registro, en un archivo de complemento de Microsoft Excel, de las masas provenientes del proceso de filtración y el tiempo.

A partir de la representación gráfica del volumen de filtrado vs tiempo y aplicando la ecuación de Darcy se pudo obtener la permeabilidad de las tortas.

En el archivo de complemento de Microsoft Excel es presentado directamente el valor de resistencia específica de la estructura porosa (r_c) además de la resistencia del medio filtrante (R_m). A partir de la ecuación N° 7 del marco teórico se puede calcular la permeabilidad de las estructuras porosas de Carbonato de Calcio partiendo de la información de resistencia específica de la torta. Es necesario destacar que para valores de ΔP aplicada mayores a 800 mbar no se tienen registros de r_c debido a que el proceso de filtración es tan rápido que el programa no es capaz de registrar los valores de volumen de filtrado contra tiempo.

8.2.6. Obtención de datos para la curva de cinética de drenaje y curva de presión capilar.

Las experiencias para obtener los datos de la curva de presión capilar y cinética de drenaje fueron realizadas en el equipo Filtratest – UCV, descrito

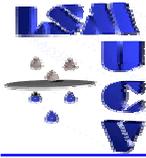


anteriormente en la sección 5.4; estas experiencias se aplicaron a un grupo de tres fracciones estrechas y una mezcla amplia con una concentración de aproximadamente 20% p/p. A cada una de las tortas de filtración se les realizaron las siguientes mediciones de:

- Masa de la torta húmeda y masa de la torta seca.
- Altura de la torta en cinco puntos distintos que posteriormente fueron promediados a un solo valor.

8.2.7 Obtención de datos de Consumo de Gas

Los datos de consumo de gas son obtenidos a partir de los programas DRUNU y DRUAUS asociados al equipo Filtratec-UCV. Estos programas generan un archivo de complemento de Microsoft Excel donde se muestran los valores de consumo de gas y tiempo para cada estructura porosa de filtración formada en este equipo. Mediante la representación gráfica de consumo de gas contra tiempo se obtiene una curva que tiende a un valor constante para un tiempo de 300 s. Los valores de consumo de gas para 300 s. son los valores que se asumen como el consumo de gas en el equilibrio, ya que este es el tiempo que se determinó en la cinética de drenaje como tiempo de equilibrio.



9. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos en las diferentes pruebas experimentales realizadas en este trabajo especial de grado siguiendo el plan de experiencias propuesto en la sección N° 7, así como también la discusión de dichos resultados. Esta sección está dividida en dos sub-secciones: medios porosos consolidados y medios porosos no consolidados.

9.1. Medios porosos Consolidados

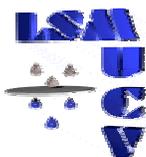
9.1.1. Porosidad (ϵ) del disco de 10 μm .

A continuación se presentan los valores de porosidad del disco poroso de 10 μm obtenidos por dos métodos diferentes, explicados en la Metodología y Plan de Experiencias.

Tabla N° 7. Porosidad del disco de 10 μm .

Método Empleado	Porosidad, ϵ (adim)	Porosidad, ϵ (adim) determinada por Ramírez	Porcentaje de desviación, (%)
Densidad	0,352	0,366	3,830
Intrusión de líquido	0,349	0,337	3,560

Como se puede notar existe una diferencia entre los valores obtenidos por el método de intrusión de líquido en los poros del disco y los valores obtenidos utilizando el método de densidad en el presente trabajo. Si se cuantifica esta diferencia con un porcentaje de error, se consigue que el mismo es de 0,85%, lo cual es aceptable. Esto se debe a que en el método de intrusión de líquido solamente se está considerando los espacios vacíos disponibles para el flujo de fluido (aunque pueden



Discusión de Resultados

haber volúmenes de poro muerto donde quede atrapado el líquido y posteriormente no salir) y no todos los espacios vacíos contenidos dentro del disco poroso. Además en el método experimental es difícil asegurar que todos los poros estén completamente saturados. Esto explica también el hecho de que la porosidad calculada por el método de densidad sea mayor que la obtenida por el método de intrusión de líquido.

Si se comparan los valores de porosidad con los obtenidos por Ramírez [en 2002], se puede notar que son similares, reportándose para una desviación de menos del 4 % para ambos métodos.

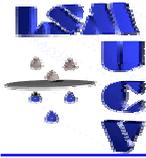
9.1.2. Permeabilidad específica (k) del disco de 10 μm .

En cuanto a la permeabilidad del disco poroso, el valor obtenido difiere en 27,3% con respecto al valor reportado por Ramírez [en 2002] como puede verse en la tabla N° 8, que hasta ahora es la única referencia para el valor de permeabilidad del disco.

Tabla N° 8. Permeabilidad del disco poroso de 10 μm .

Permeabilidad , k (md)	Permeabilidad , k (md) obtenida por Ramírez	Porcentaje de desviación (%)
57,8	79,6	27,3

Es necesario destacar que al igual que en la porosidad el valor de la permeabilidad puede variar con respecto a los obtenidos por Ramírez, debido a que los discos no estaban completamente limpios, el hecho de que los espacios vacíos de los discos pudieran estar invadidos por partículas de agentes contaminantes pudiera provocar una disminución en el valor de permeabilidad del disco poroso.



9.1.3 Curvas de drenaje capilar.

Las curvas de drenaje capilar se obtuvieron graficando la saturación vs. el tiempo de drenaje tal como puede apreciarse en la figura N° 30, ajustando los valores de saturación por el modelo propuesto por Nicolaou [en 1996], a través de la ecuación:

donde los valores de los parámetros a y b dependen de la presión y la sustancia. La aplicación de este modelo tuvo como objetivo minimizar los errores en la estimación de los valores de saturación de equilibrio (S_{∞}), que son primordiales para establecer las curvas de presión capilar.

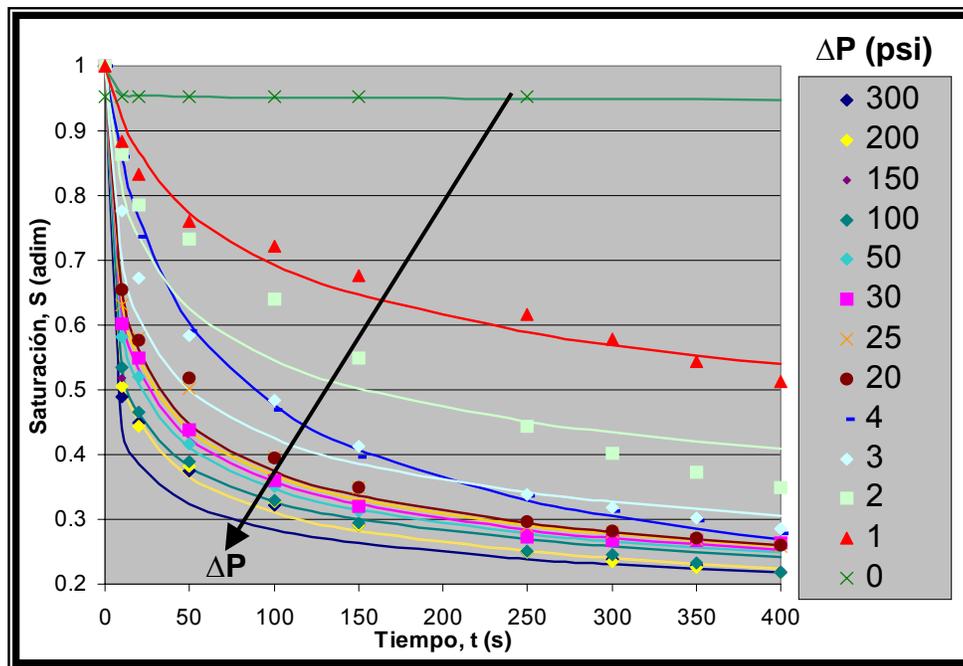
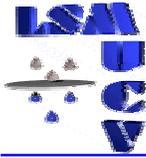


Figura N° 30. Curva de drenaje capilar para el disco poroso de 10 μm.

En la figura N° 30 se observa que para 400 s a casi todas las diferencias de presión aplicadas les hace falta más tiempo para alcanzar el valor de saturación de equilibrio, esto parece indicar que hay un problema de



Discusión de Resultados

secado por el excesivo flujo de gas que se tuvo. Para corregir este problema se colocó una membrana impermeable al aire y permeable al agua en la parte inferior del disco y de esta manera disminuir el consumo de gas y el problema de secado.

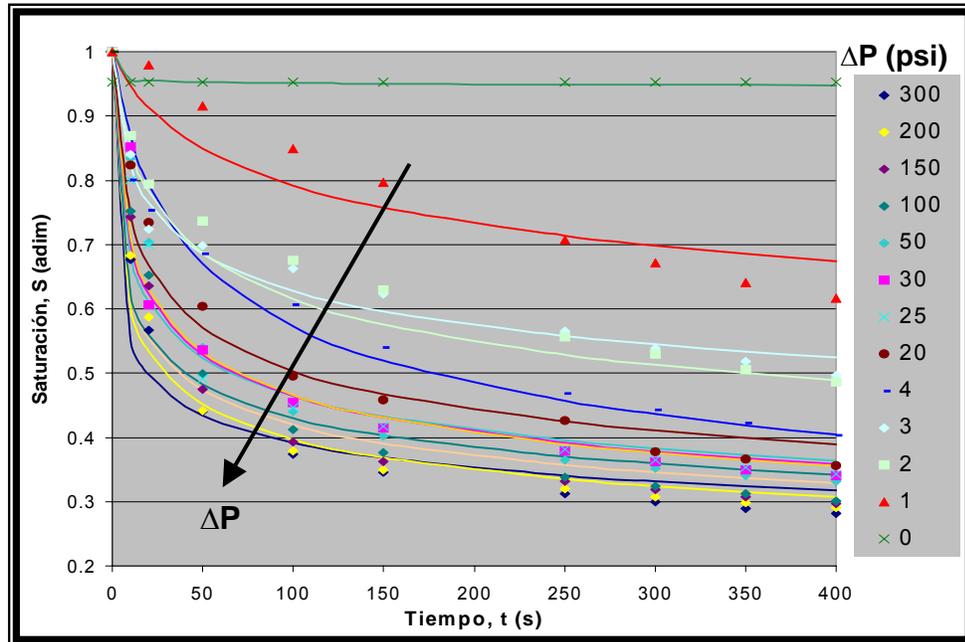


Figura N° 31. Curva de drenaje capilar utilizando Membrana

En la figura N° 31 se muestra la curva de drenaje capilar obtenida utilizando la membrana donde se logra disminuir el problema de secado. Se observa que para todas las diferencias de presión aplicadas, la saturación disminuye al aumentar el tiempo. A medida que aumenta el tiempo se va drenando el líquido contenido en los poros del disco y por consiguiente la saturación tiende a disminuir debido a que la saturación es una relación entre el volumen de líquido contenido en los poros y el volumen de espacios vacíos de la estructura. Por lo tanto el comportamiento de la curva de drenaje capilar coincide con el esperado.



Discusión de Resultados

También se puede notar que al comienzo la velocidad de drenaje capilar es más alta y tienden a disminuir con el paso del tiempo hasta que la saturación alcanza un valor prácticamente constante conocida como saturación de equilibrio.

También se puede observar en la figura N° 31 que para valores de ΔP menores a 4 psi existe dispersión de los valores experimentales. Esto se debe a que la diferencia de presión aplicada no permanecía constante para estas experiencias por lo que se tuvo que manipular la válvula tratando de mantener la presión constante, lo cual afectó los valores experimentales obtenidos. Los valores experimentales y los cálculos tipo para la realización de esta gráfica son presentados en el apéndice C.

En la figura N° 32 se muestra la variación de la velocidad inicial de drenaje para cada diferencia de presión aplicada.

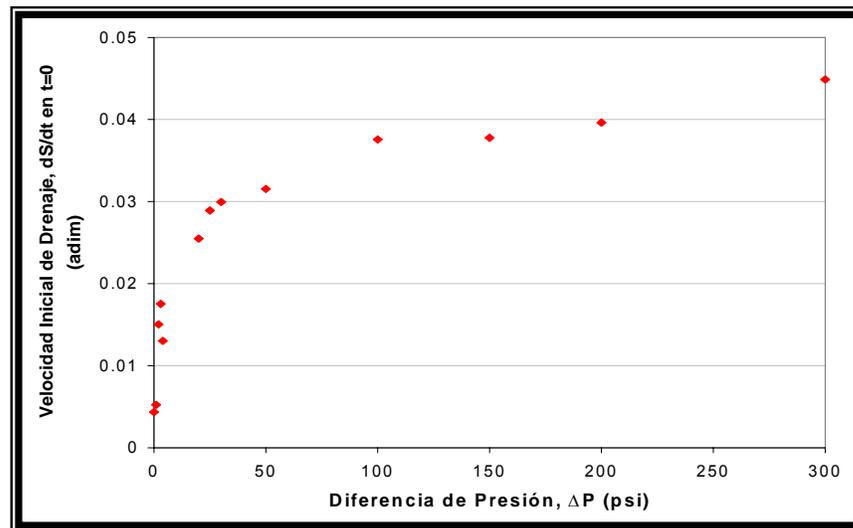
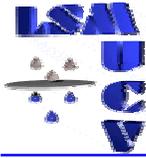


Figura N° 32. Velocidad Inicial de Drenaje Capilar.

En la figura N° 32 se observa que a presión atmosférica existe drenaje capilar, esto indica que la presión capilar de entrada es menor que la presión atmosférica. También se observa en la figura N° 32 que al aumentar la



Discusión de Resultados

diferencia de presión, existe una mayor velocidad inicial de drenaje lo que indica una mayor variación de la saturación en los primeros instantes del proceso.

9.1.4. Curva de Presión Capilar

Una vez obtenida la curva de drenaje capilar se posee la información necesaria para construir la curva de equilibrio del proceso de drenaje o curva de presión capilar mediante la representación gráfica de los valores de presión capilar ($P_k = \Delta P$ aplicada) y la saturación de equilibrio alcanzada para cada ΔP .

En la figura N° 33 se muestra la curva de presión capilar obtenida experimentalmente.

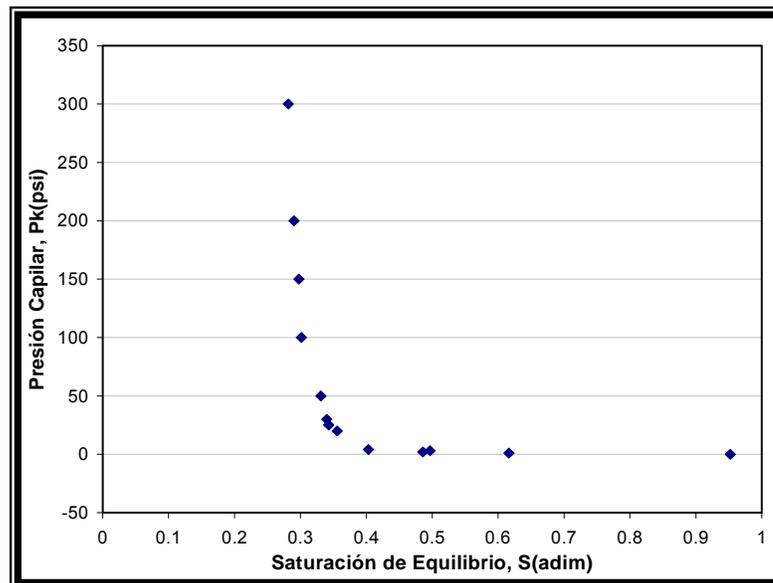


Figura N° 33. Curva de presión Capilar para el disco de 10 μm obtenida experimentalmente.



Discusión de Resultados

En la figura N° 33 se observa que la curva de presión capilar tiene una forma bastante plana, lo cual indica que casi todos los poros que la conforman son del mismo tamaño tal y como se esperaba ya que los discos están diseñados para poseer esta característica.

9.1.4.1. Estimación de los parámetros de la curva de presión capilar

Una vez realizada la representación gráfica de la saturación de equilibrio alcanzada para cada presión, es necesario realizar un ajuste a dicha curva para obtener una ecuación que permita representar el comportamiento de los valores experimentales. Para realizar este ajuste se utilizaron dos modelos los cuales se describen a continuación.

9.1.4.1.1. Modelo Potencial con ajuste por Parámetros Libres

Este método consiste en ajustar los puntos experimentales mediante la ecuación N° 30 del marco teórico.

Dejando como parámetros ajustables el valor de la saturación remanente (S_r), la presión capilar de entrada (P_{ke}) y el factor de distribución de tamaño de poro (ξ).

Este modelo fue aplicado para ajustar la curva de presión capilar del disco poroso de 10 μm como puede observarse en la figura N° 34.

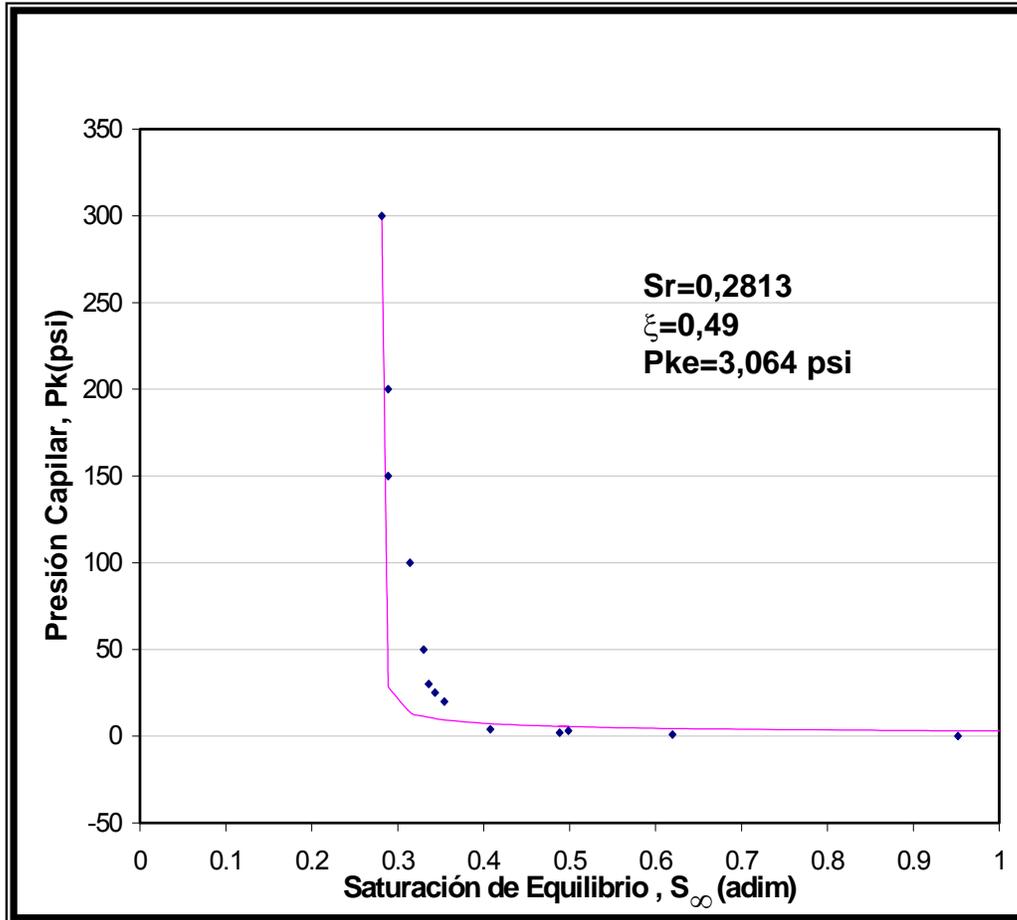
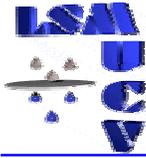


Figura N° 34. Curva de presión capilar y ajuste por el Modelo Potencial.

En figura N° 34 se observa que la curva de ajuste pasa por casi todos los valores experimentales, lo cual significa que este modelo proporciona un buen ajuste para la curva de presión capilar. También puede observarse que entre 300 psi y 4 psi el valor de saturación de equilibrio es similar (entre 0,22 y 0,24) lo cual origina una verticalidad de la curva para este rango de presiones y que a partir de 4 psi hasta presión atmosférica existe una variación de la saturación de equilibrio de 0,24 a 0,95 para un rango de presiones pequeño, lo que origina una horizontalidad de la curva entre estas presiones. Este comportamiento coincide con el esperado para los discos



Discusión de Resultados

porosos debido a que son fabricados de manera que todos sus poros posean el mismo tamaño lo cual origina que su curva de presión capilar tenga una forma bastante plana.

9.1.4.1.2. Modelo Adaptado de Rosin – Rammler

Este modelo es una adaptación del modelo de Rosin-Rammler para distribución de tamaño de partícula. La ecuación de este modelo que representa la curva de presión capilar es la ecuación N° 32 del marco teórico.

Donde

La representación gráfica de este modelo se debe realizar utilizando la saturación relativa a la residual (S^*_{∞}) en lugar de la saturación de equilibrio (S_{∞}). La representación gráfica de los valores experimentales de presión capilar (P_k) contra saturación relativa a la residual (S^*_{∞}) y el ajuste por el método de Rosin-Rammler puede ser observados en la figura N° 35.

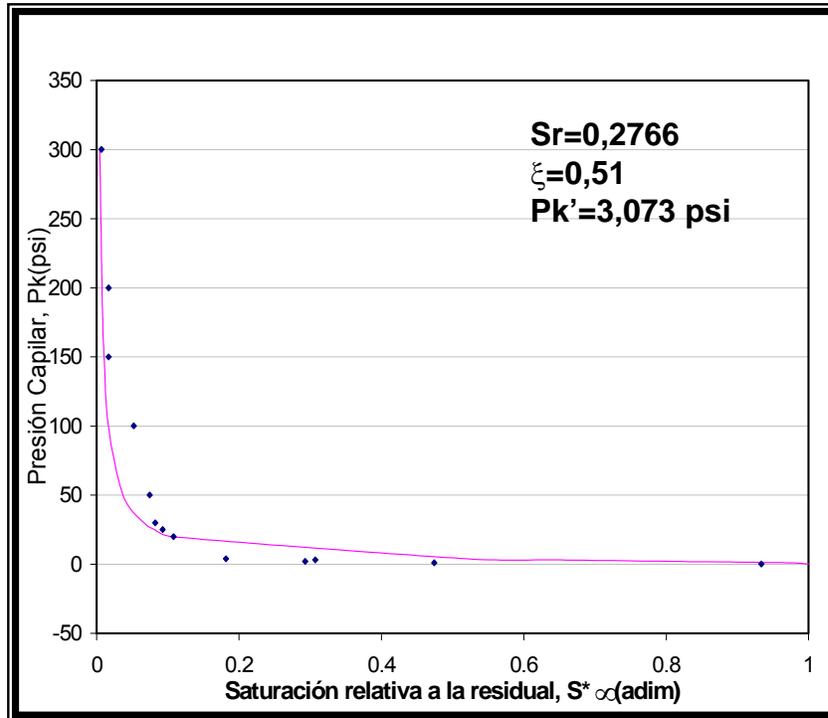
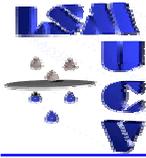


Figura N° 35. Curva de presión capilar y ajuste por el Método de Rosin - Rammler

En la figura N° 35 se observa el mismo comportamiento que en el ajuste por el modelo potencial, es decir, una verticalidad entre 300 psi y 4 psi y una horizontalidad entre 4 psi y presión atmosférica tal y como se esperaba. Debido a que en este modelo se utilizan los valores de la saturación relativa a la residual (S^*_{∞}) en lugar de la saturación de equilibrio (S_{∞}), no es posible comparar los dos modelos utilizando las figuras N° 34 y N° 35. Para comparar los dos modelos de ajuste se representaron en una misma figura los valores de presión capilar contra la saturación de equilibrio (S_{∞}) donde los valores obtenidos por el modelo adaptado de Rosin-Rammler fueron convertidos de (S^*_{∞}) a saturación de equilibrio (S_{∞}) utilizando la



Discusión de Resultados

ecuación N° 23 del marco teórico. En la figura N° 36 se puede observar la curva de presión capilar y los dos modelos de ajuste.

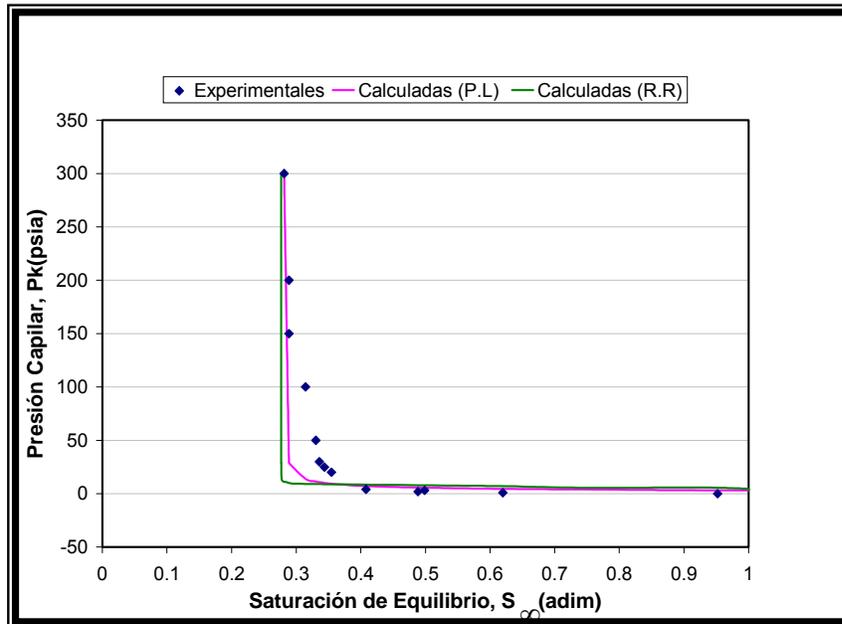
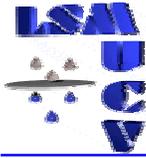


Figura N° 36. Curva de presión capilar y ajuste por los dos modelos utilizados.

Al comparar los dos ajustes se puede observar que aparentemente el método de los parámetros libres proporciona un mejor ajuste para la curva de presión capilar para la zona comprendida entre 25 psi y 4 psi. Para valores de saturación cercanos al valor S_r y para valores de saturación cercanos a 1, los dos modelos se comportan de manera similar por lo que no se puede establecer una diferencia entre ellos.



9.1.5. Curva de Distribución de Tamaño de Poro

9.1.5.1. Distribución Volumétrica de Tamaños de Poro

Este modelo está basado en la relación existente entre la presión capilar y el diámetro hidráulico de poro. Esta relación es conocida como la Ecuación de Laplace- Young (ecuación N° 26 del marco teórico), donde el diámetro hidráulico de poro es inversamente proporcional a la presión capilar aplicada. Para obtener los valores de diámetros hidráulicos de poro se utilizaron los valores de P_k , ξ y S_r obtenidos ajustando la curva de presión capilar por el modelo potencial. El valor de diámetro de poro máximo está asociado a la presión capilar de entrada y tiene un valor de $13,66 \mu\text{m}$, mientras que el diámetro de poro mínimo está asociado a la presión para la cual se alcanza el valor de la saturación remanente que en este estudio se asumió como la presión de trabajo más alta (300 psi) y tiene un valor de $0,13 \mu\text{m}$.

Una vez obtenidos los diámetros hidráulicos de poro, se representa la distribución acumulada descrita por la ecuación 36. En la figura N° 37 se observa esta distribución.

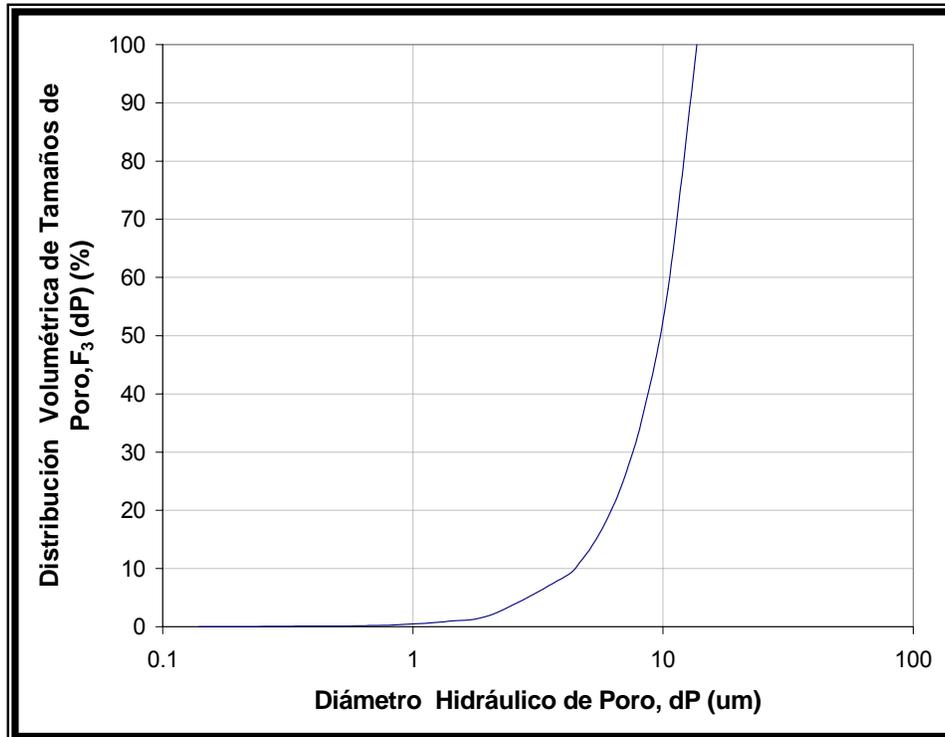
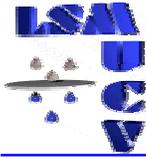
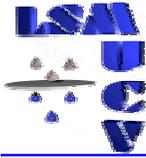


Figura N° 37. Curva de Distribución Acumulada de Tamaño de Poro en volumen a partir de la curva de presión capilar.

En la figura N° 37 se observa que la distribución de tamaño de poro es estrecha, esto indica que la mayor parte de los poros tienen el mismo tamaño. Este comportamiento coincide con el esperado ya que el factor de distribución de tamaño de poro del disco es bajo ($\xi = 0,49$), lo que indica que prácticamente todos los poros poseen el mismo tamaño. Es importante destacar que el dP_{50} de la distribución acumulada en volumen es aproximadamente de $10 \mu\text{m}$ como se indica en las especificaciones del disco poroso el cual está diseñado para poseer el mismo tamaño de diámetro de poro (alrededor de $10 \mu\text{m}$).



9.1.5.2. Distribución en Número de Tamaño de Poro (Modelo de Nicolaou).

Este modelo permite obtener la cantidad (en número) de poros con tamaño cercano al tamaño de poro mínimo o al tamaño de poro máximo presentes en un medio poroso. Este comportamiento está relacionado con el valor del factor de distribución de tamaño de poro (ξ). En la figura N° 38 se observa la distribución en número de tamaño de poro para el disco poroso de $10\ \mu\text{m}$.

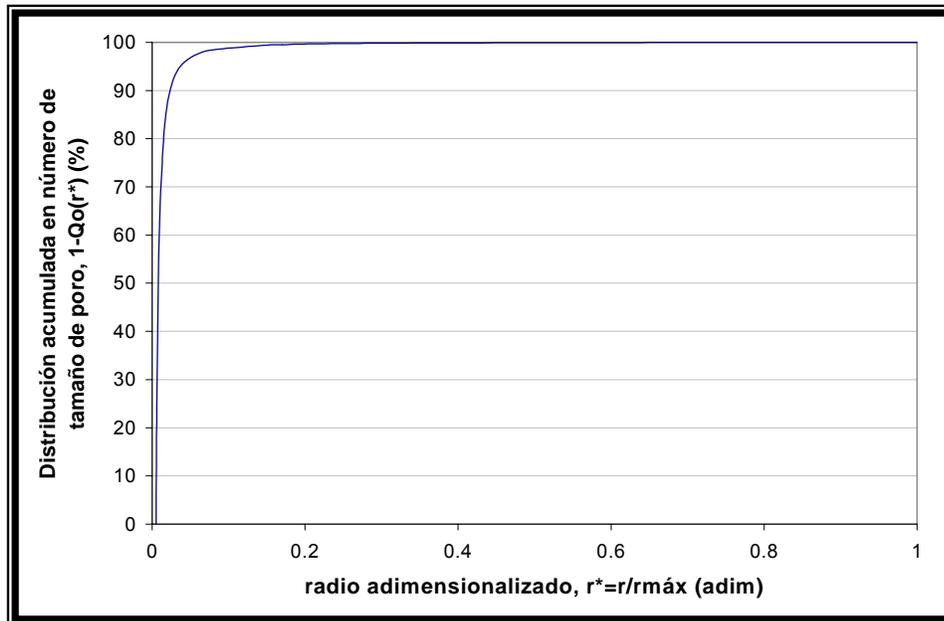
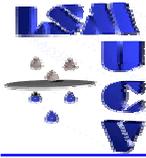


Figura N° 38. Curva de distribución en número de tamaño de poro obtenida por el modelo de Nicolaou.

En la figura N° 38 se nota que la distribución de tamaño de poro es estrecha, lo que indica que existe una gran cantidad de poros cercanos al tamaño de poro máximo del disco, que corresponde al valor de presión capilar de entrada. Este comportamiento coincide con el observado en la curva de presión capilar (figura N° 33) la cual tiene una forma bastante plana lo que implica que todos los poros tienen prácticamente el mismo tamaño, el cual está asociado a la presión capilar de entrada.



9.2. Medios porosos no consolidados (tortas de filtración).

En esta sección se presentan los resultados obtenidos para los medios porosos no consolidados (tortas de CaCO_3) de diferentes granulometrías. Se utilizaron tres fracciones estrechas, Finos (5000 rpm), Intermedios (38-45) y Gruesos (53-63) y una mezcla amplia, las cuales de ahora en adelante serán mencionadas como finos (con un X_{50} de 20,20), intermedios (con un X_{50} de 49,93), gruesos (con un X_{50} de 67,10) y mezcla (con un X_{50} de 48,90).

9.2.1. Porosidad

Se determinó la porosidad para cada diferencia de presión (ΔP) a cada fracción estrecha utilizada y a la mezcla. En las figuras N° 39 y 40 se muestra la variación de la porosidad con la presión para la fracción de finos. Es necesario destacar que todas las fracciones y la mezcla presentan el mismo comportamiento horizontal, por lo tanto se realizará el análisis a una sola fracción; en este caso la fracción de finos por ser la que posee el mayor intervalo de presiones. Se debe destacar que esta fracción fue la única que se trabajó a presiones de 3 y 4 bar, con la finalidad de estimar un valor correcto de saturación remanente (S_r).

En la figura N° 39 se observa que los valores de porosidad son prácticamente constantes con la presión, razón por lo cual se puede considerar que las estructuras porosas estudiadas son incompresibles para el rango de presiones utilizadas en este trabajo. La variación de la porosidad con la presión para las demás fracciones y los datos necesarios para calcularlas pueden observarse en el apéndice C.

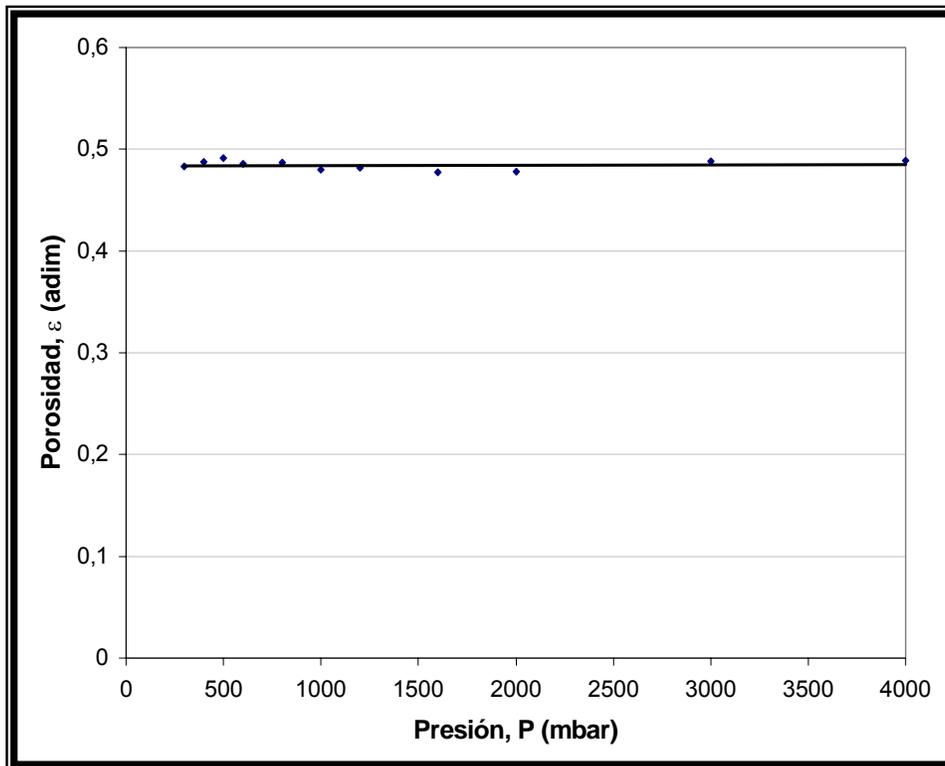
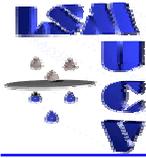


Figura N° 39. Variación de la Porosidad con la Presión para la Fracción de Finos

Si se acota un poco la escala para los valores de porosidad entre 0,45 y 0,50, se puede notar que los valores de porosidad presentan un alto grado de dispersión. Este comportamiento se puede visualizar en la Figura N° 40.

El hecho de que el valor de la porosidad sea tan disperso, se debe a que el método utilizado para determinarla es muy sensible a los valores de altura de la torta, los cuales son muy difíciles de determinar con precisión debido a que la misma no presenta una superficie uniforme y también al hecho de que si el drenaje es realizado a presiones muy bajas, la torta queda



Discusión de Resultados

con un alto contenido de agua lo cual dificulta medir su altura con el micrómetro.

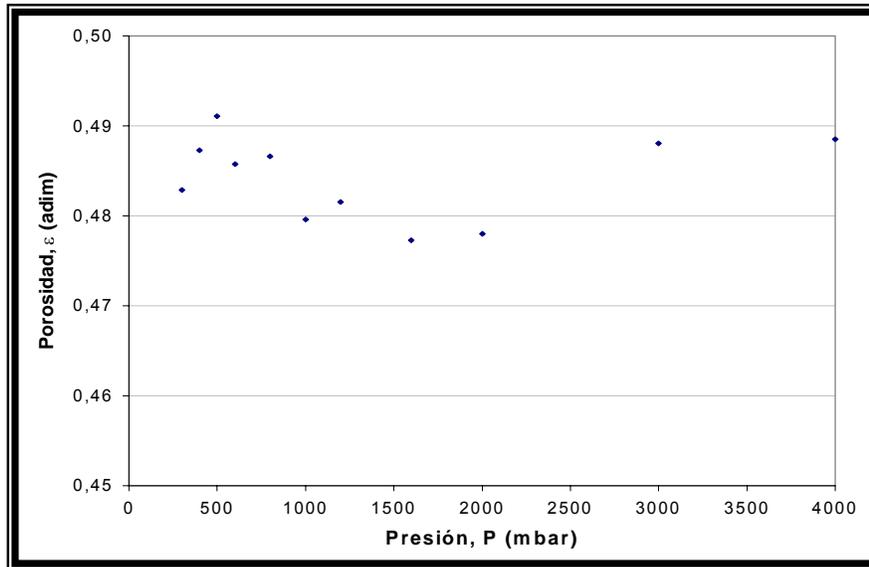


Figura N° 40. Variación de la porosidad con la presión para la fracción de finos

Si se representan los valores de porosidad en función de la presión para todas las granulometrías utilizadas se obtiene un gráfico donde se observa la variación de la porosidad para cada una de estas.

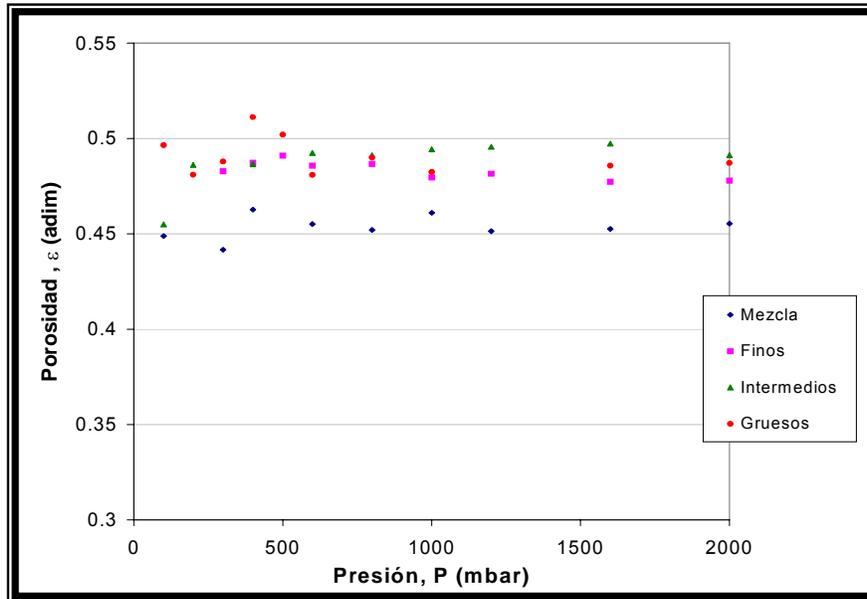


Figura N° 41. Porosidad de todas las granulometrías utilizadas.

En la figura N° 41, se observa que las fracciones estrechas presentan entre sí, diferencias para los valores de porosidad. La mezcla también presenta un comportamiento diferente ya que su porosidad es menor que la de las fracciones estrechas, debido a que las partículas más pequeñas incluidas en la mezcla ocupan los espacios vacíos, reduciendo de esta forma la porosidad de las tortas formadas. Esta característica en la porosidad de la mezcla, también fue observada en el trabajo de Arias y Ugas [en 1998], tal como se menciona en los antecedentes.

Para discutir un poco más la variación de los valores de porosidad con respecto a las características de las fracciones estrechas, se han realizado las figuras N° 42, 43 y 44, las cuales están basadas en una porosidad promedio (ε) para cada fracción. Este valor se soporta en el hecho explicado de que las tortas son incompresibles en el rango de presiones trabajado.

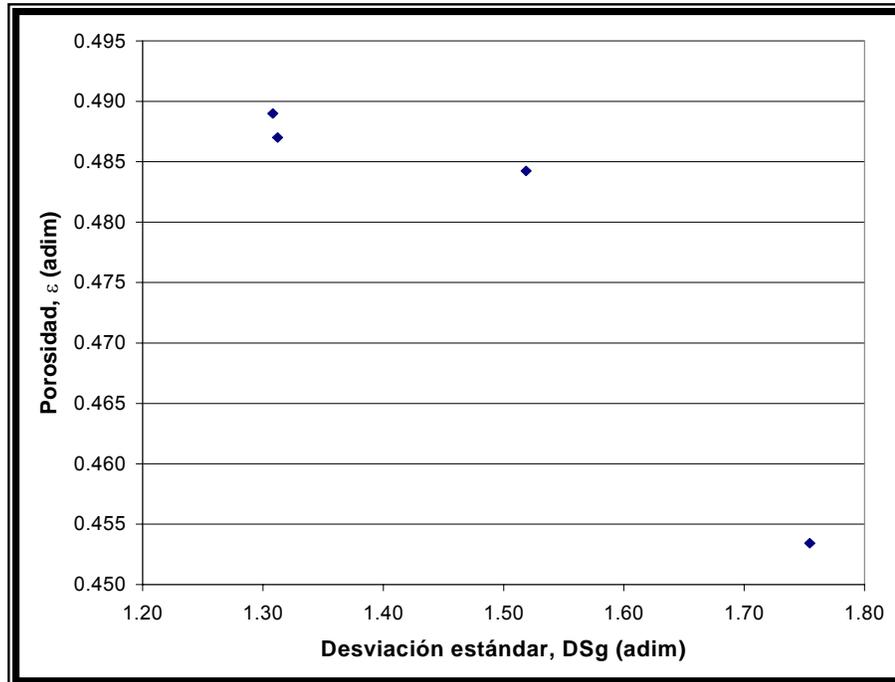


Figura N° 42. Variación de la porosidad promedio con la desviación estándar geométrica (DS_g)

En la figura N° 42 se obtiene que la porosidad tiende a disminuir con el aumento de la desviación, esto igualmente concuerda con la teoría, ya que al haber mayor variedad de tamaños de partícula, se reduce la cantidad de espacios vacíos.

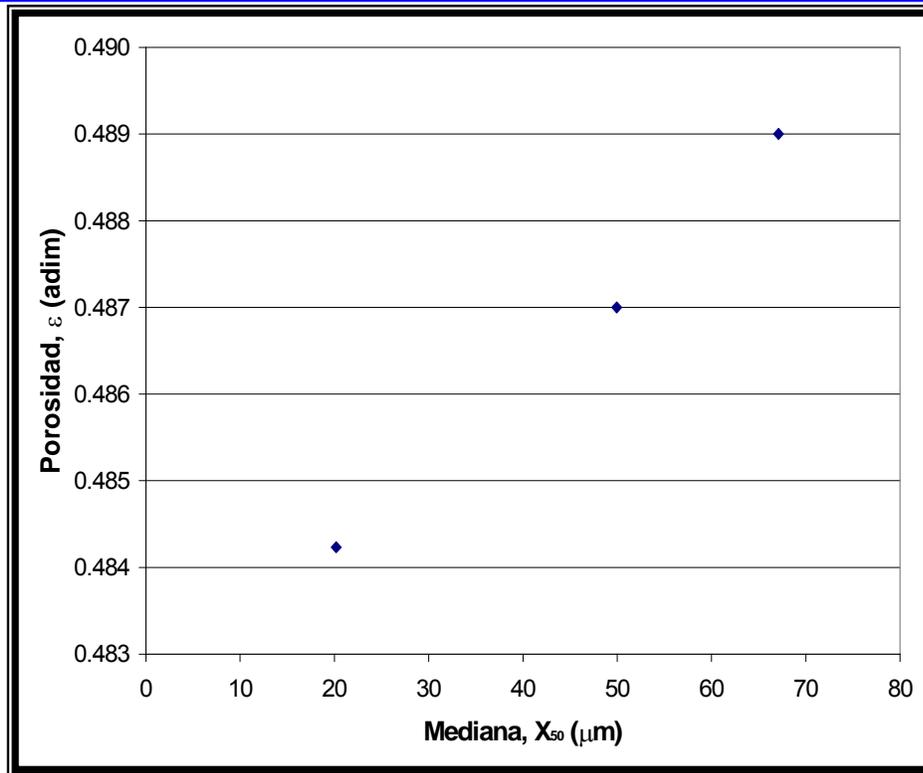
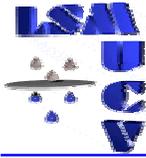


Figura N° 43. Variación de la porosidad promedio con la mediana (X_{50})

En la figura N° 43 se observa que para las fracciones estrechas a medida que aumenta la mediana, también aumenta la porosidad, lo que concuerda con la teoría ya que al aumentar el valor de X_{50} , esta aumentando el tamaño de partícula y por ende aumenta la cantidad de espacios vacíos.

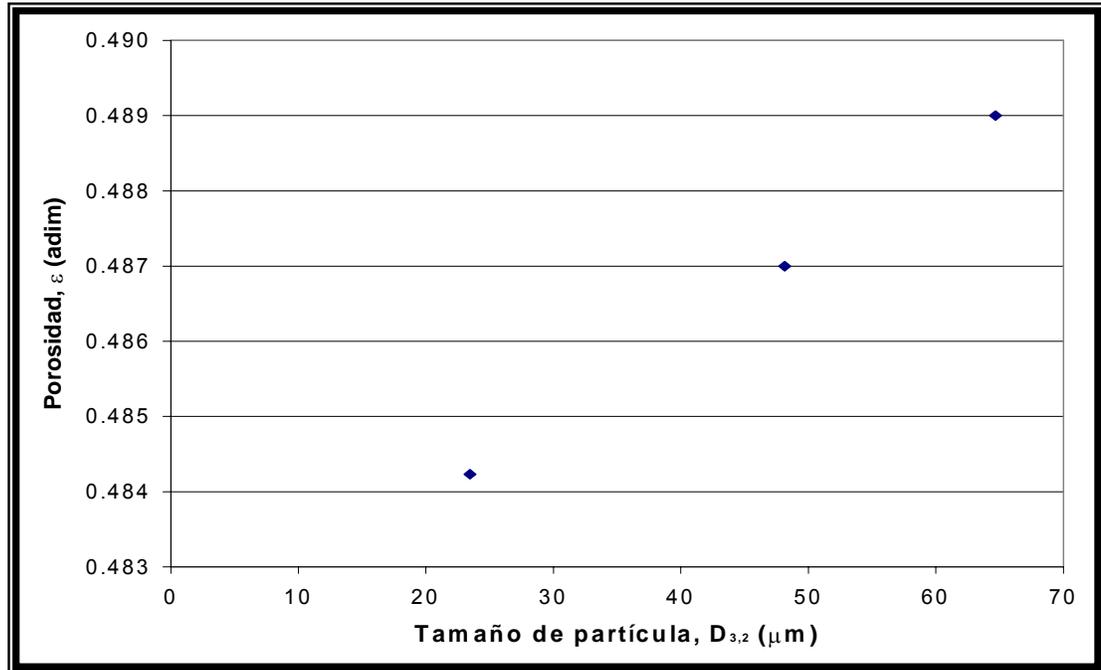
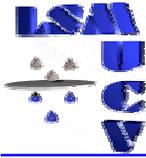


Figura N° 44. Variación de la porosidad promedio con el $D_{3,2}$

Igual explicación se tiene para el $D_{3,2}$ de las fracciones estrechas, en la figura N° 44, ya que al aumentar este valor indica que está aumentando el tamaño de partícula y por lo tanto aumenta la cantidad de espacios vacíos.



9.2.2. Permeabilidad

En la figura N° 45 se muestran los valores de permeabilidad obtenidos para todas las fracciones utilizadas en función de la presión aplicada.

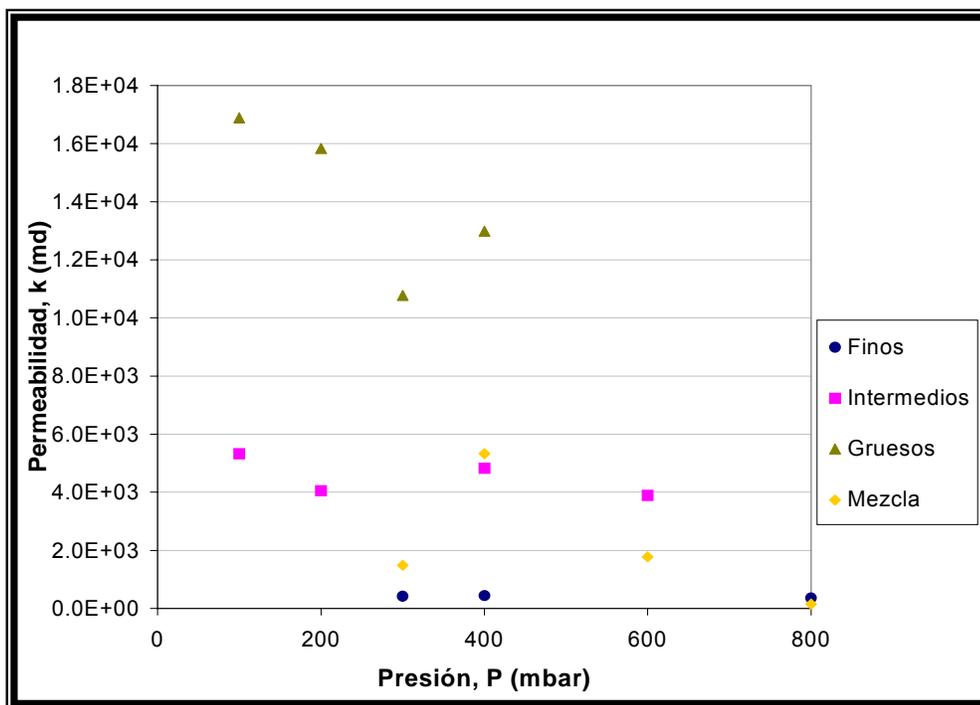
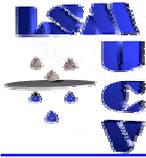


Figura N° 45. Permeabilidad de todas las fracciones utilizadas

Con respecto a los valores de permeabilidad se puede decir que presentan una elevada dispersión para cada granulometría. La permeabilidad también está afectada por los valores de altura de la torta, por lo que esta variación en los valores obtenidos resulta razonable. Lo que sí es importante destacar es que la fracción de gruesos tiene una mayor permeabilidad que la de intermedios y ésta a su vez es mayor que la de finos. Los valores de permeabilidad de la mezcla se ubican entre los valores de la fracción de finos y los de intermedios. Por lo tanto, se puede decir que la permeabilidad



Discusión de Resultados

aumenta a medida que aumenta el tamaño de partícula. Para discutir aún más las variaciones de la permeabilidad con respecto a las características granulométricas de las fracciones estrechas, se han elaborado las figura N° 46, 47 y 48.

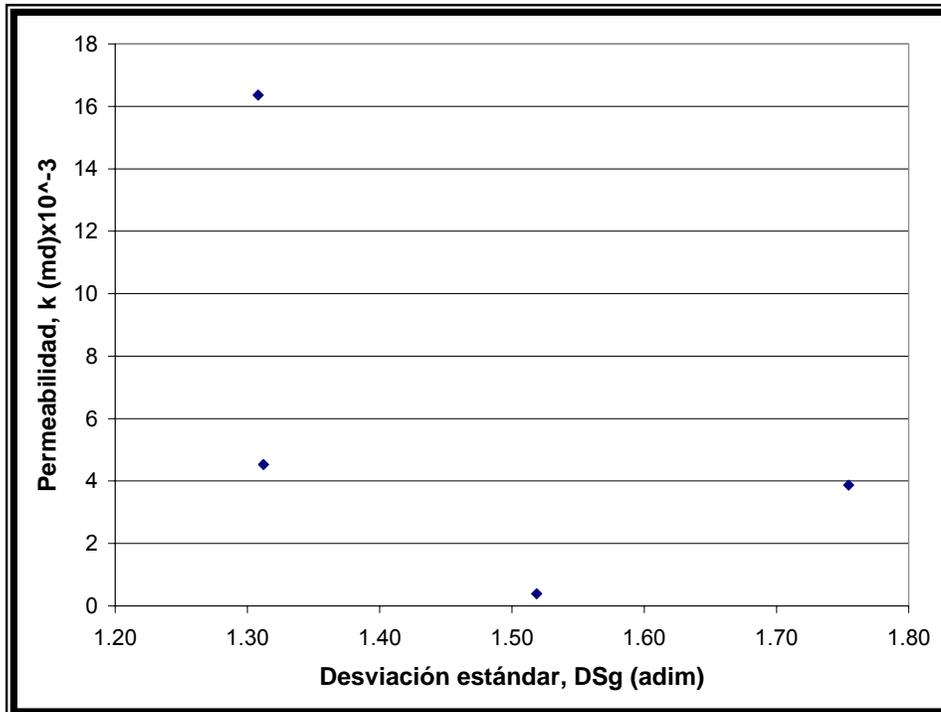


Figura N° 46. Variación de la permeabilidad con la desviación estándar geométrica.

Puede apreciarse en la figura N° 46, que la permeabilidad disminuye con el aumento de la desviación estándar, lo cual concuerda con la teoría ya que al aumentar el valor de la desviación, implica que hay mayor variedad de tamaños de partícula, reduciéndose la cantidad de espacios vacíos y por ende la permeabilidad.

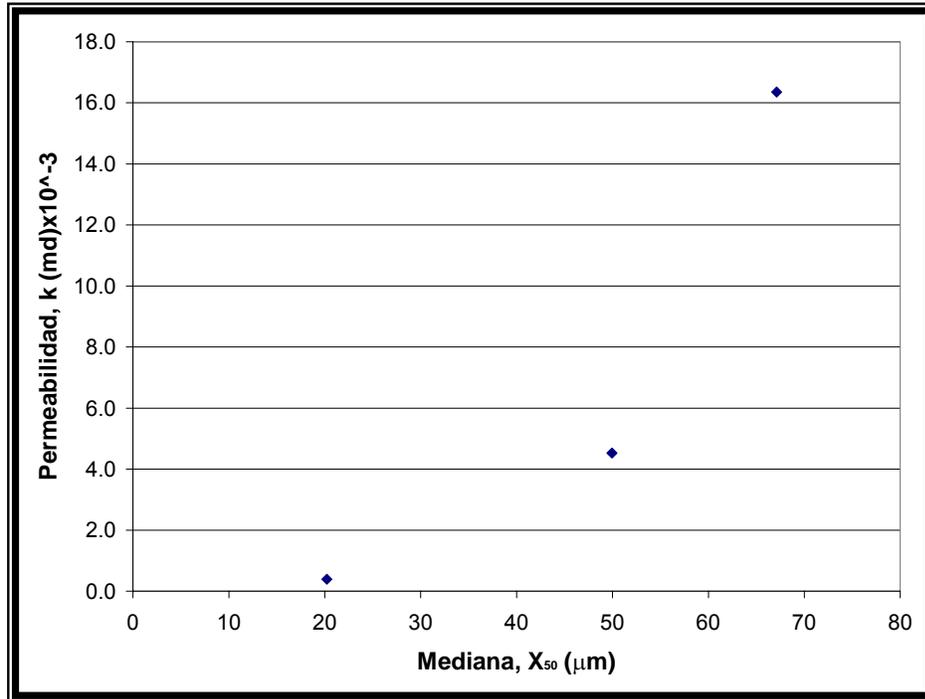
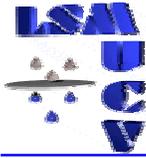


Figura N° 47. Variación de la permeabilidad con la mediana.

En la figura N° 47 se aprecia que la permeabilidad aumenta con el aumento de la mediana. Esto concuerda con la teoría, ya que al aumentar el tamaño de partícula va a aumentar la permeabilidad de la estructura porosa.



Discusión de Resultados

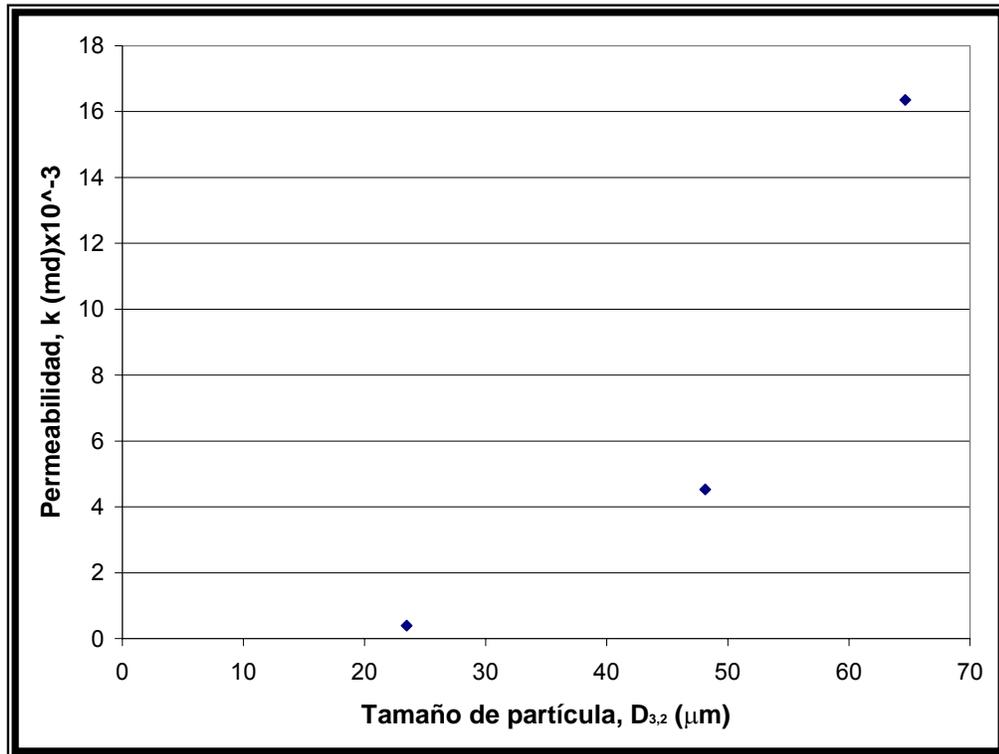
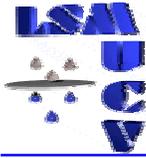


Figura N° 48. Variación de la permeabilidad con el $D_{3,2}$.

Una explicación similar se obtiene cuando se observa la figura N° 48, donde la permeabilidad aumenta con el aumento del $D_{3,2}$.

Otro de los factores que impiden establecer un valor para la permeabilidad para cada una de las granulometrías utilizadas es el hecho de que se poseen muy pocos datos experimentales, debido a que cuando se trabajó a presiones elevadas, el programa del equipo Filtratec-UCV no logró reportar ningún valor de resistencia específica de la torta, por lo que no se obtienen valores de permeabilidad para todas las diferencias de presión aplicadas.



9.2.3. Curvas de Drenaje Capilar

Las pruebas de drenaje capilar se realizaron en el equipo Filtratest – UCV, empleando una masa de 90 grs. de carbonato de calcio para obtener tortas de filtración con una concentración de 20% p/p y una altura aproximada de 30 mm. Para casi todas las granulometrías utilizadas se trabajó con diferencias de presión desde 0,05 hasta 2 bar (la fracción de finos se trabajo hasta 4 bar) y para cinco tiempos de drenaje capilar desde 10 hasta 300 s. En la figura N° 49, se muestra la curva de drenaje capilar para la mezcla.

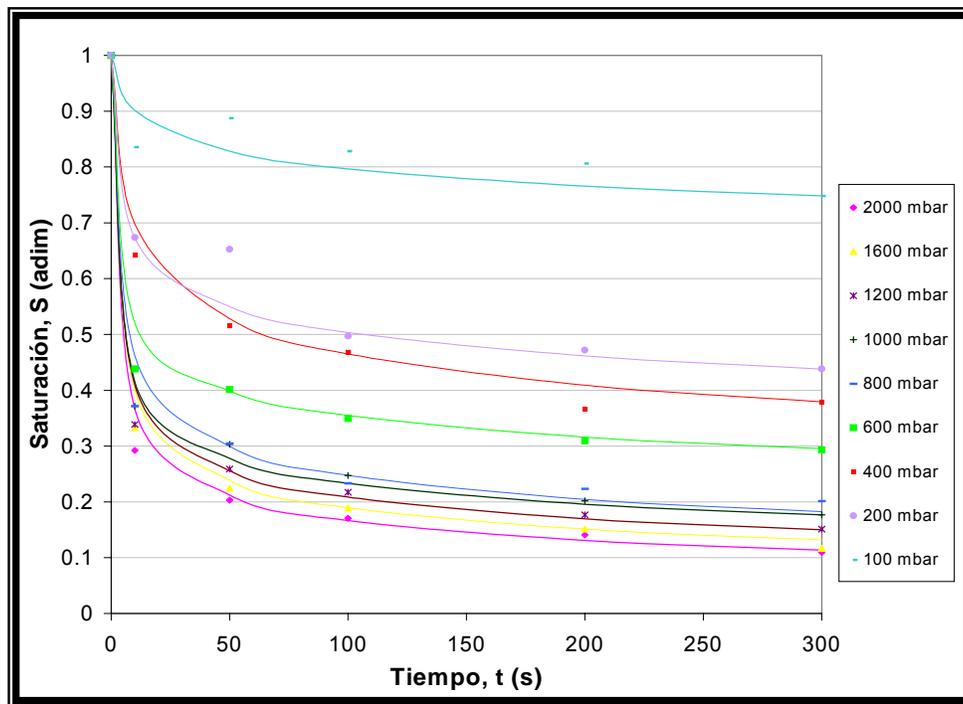


Figura N° 49. Cinética de Drenaje capilar para la Mezcla

Los valores experimentales fueron ajustados por el modelo propuesto por Nicolaou [Nicolaou, 1996] a través de la siguiente ecuación:

donde los valores de las constantes “a” y “b” son diferentes para cada presión y sustancia. Esto fue hecho con el propósito de obtener una mejor estimación de los valores de la saturación de equilibrio (S_{∞}).

En la figura N° 49 se puede observar que en general, la saturación disminuye a medida que aumenta el tiempo, para cada diferencia de presión aplicada hasta que llega a un valor constante que representa el valor de la saturación de equilibrio. Por lo tanto el comportamiento de la curva de drenaje capilar coincide con el esperado.

En la figura N° 50 se muestra la curva de drenaje capilar de todas las granulometrías utilizadas para un mismo ΔP (400 mbar).

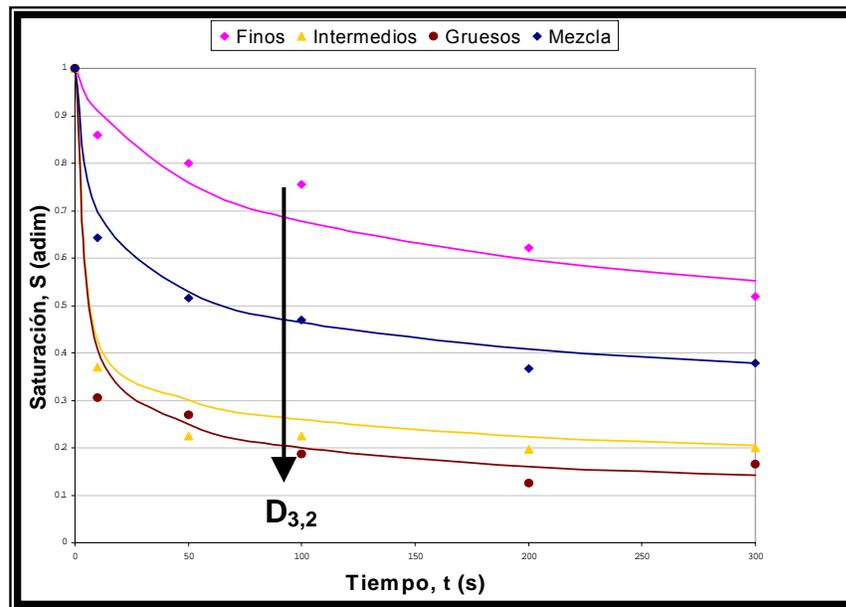
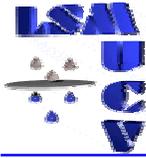


Figura N° 50. Velocidad de drenaje a ΔP fijo (400 mbar) para todas las granulometrías utilizadas.

En la figura N° 50 se observa que para una diferencia de presión fija, el valor de saturación de equilibrio (S_{∞}) disminuye al aumentar el tamaño de partícula. También se puede observar, en la figura N° 50, que la



Discusión de Resultados

velocidad inicial de drenaje aumenta al aumentar el tamaño de partícula. Este comportamiento de la curva de drenaje coincide con el esperado, explicado en la sección 3.5 del marco teórico.

9.2.4 Consumo de Gas

A continuación se muestran los valores de consumo de gas para todas las diferencias de presión aplicadas.

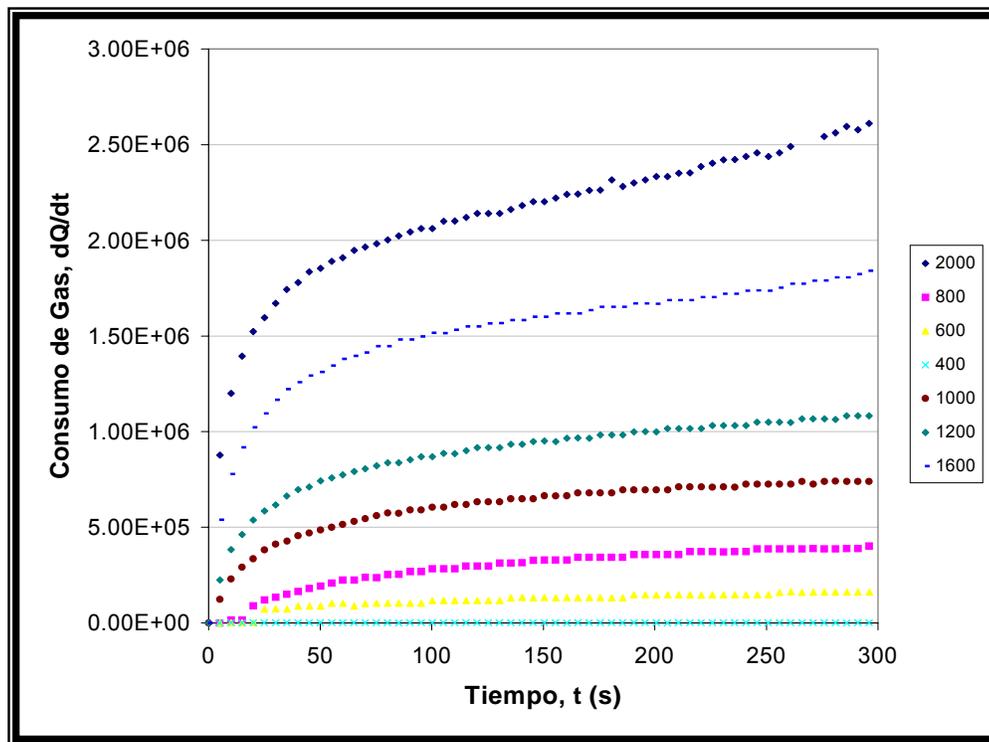


Figura N° 51. Consumo de Gas para la Mezcla

En la figura N° 51 se observa que los valores de consumo de gas tienden a aumentar a medida que transcurre el tiempo hasta alcanzar un valor prácticamente constante para un tiempo de 300 segundos. Al aumentar la diferencia de presión aplicada se observa que el comportamiento de las curvas es similar, por lo que se puede asumir que el valor de consumo de



Discusión de Resultados

gas para un tiempo de 300 seg corresponde al valor de consumo de gas en el equilibrio para cada diferencia de presión aplicada.

En la figura N° 52 se representa los valores de consumo de gas en el equilibrio para todas las granulometrías estudiadas.

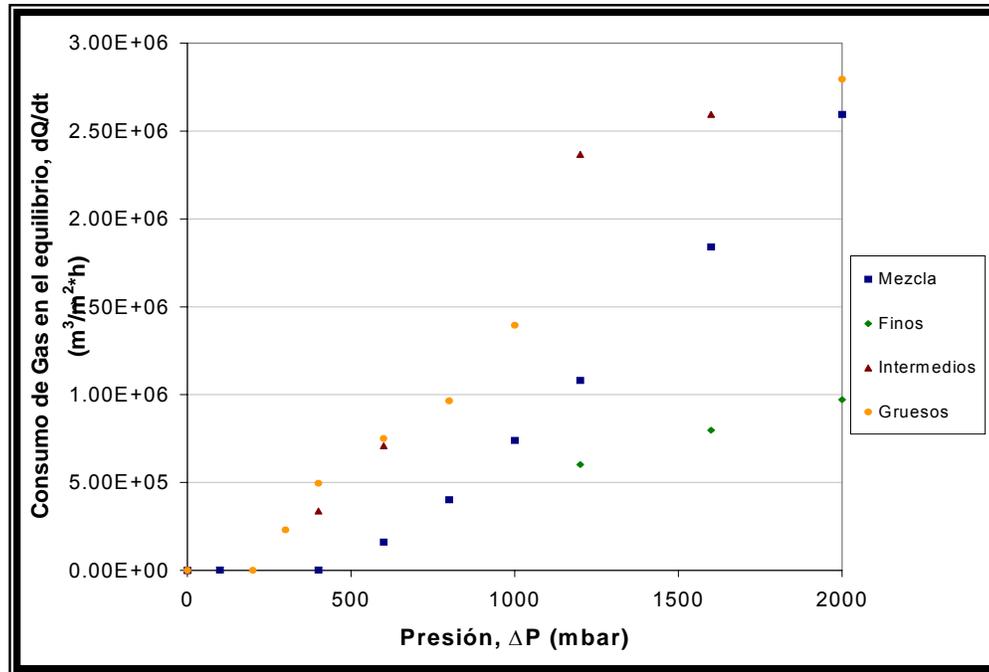
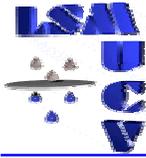


Figura N° 52. Consumo de Gas en el equilibrio para todas las fracciones utilizadas y la mezcla.

En la figura N° 52 se puede observar que el valor de consumo de gas en el equilibrio para un ΔP fijo es menor para la fracción de finos y aumenta a medida que aumenta el tamaño de partícula. Se observa que en la fracción de gruesos e intermedios no se puede establecer claramente una dependencia de la curva de consumo de gas en el equilibrio con el tamaño de partícula. Sin embargo, y a pesar del comportamiento mencionado anteriormente, se puede decir que las tendencias de las curvas es la correcta, porque se necesita una mayor cantidad de gas para vaciar los poros de mayor tamaño como es el caso



Discusión de Resultados

de la fracción de gruesos. Una vez que se vence la presión capilar de entrada pasa menos gas por un poro pequeño que por un poro grande.

9.2.5 Curva de Presión Capilar

Una vez obtenidos los datos a partir de la cinética de drenaje capilar, se realizan a continuación las respectivas curvas de presión capilar para cada una de las granulometrías empleadas, las cuales son ajustadas por el Modelo Potencial con ajuste por parámetros libres (P.L) y el Modelo de Rosin Rammler (R-R).

9.2.5.1. Modelo Potencial con ajuste por parámetros libres

Este modelo consiste en ajustar los puntos experimentales mediante la ecuación N° 30 del marco teórico. En la figura N° 53 se muestran las curvas de presión capilar de todas las granulometrías utilizadas y su ajuste por el modelo potencial.

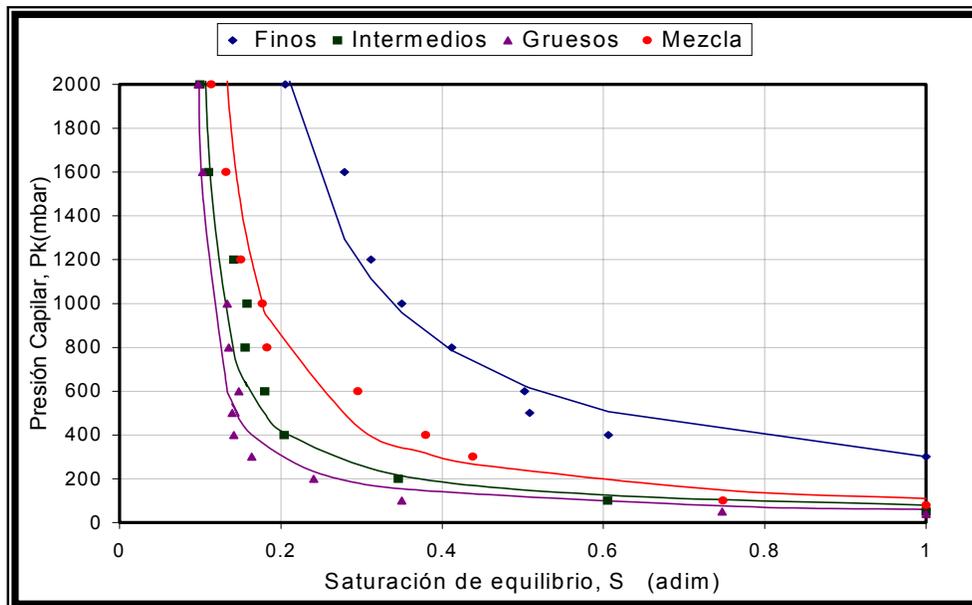


Figura N° 53. Curva de presión capilar y ajuste por el modelo potencial para todas las granulometrías estudiadas



Discusión de Resultados

En la figura N° 53, se compara la curva de presión capilar para todas las granulometrías y su ajuste por el modelo potencial. En esta gráfica se observa que la curva de presión capilar varía con la distribución de tamaño de partícula.

La presión capilar de entrada (P_{ke}) disminuye al aumentar el tamaño de partícula (como se observa en la figura N° 54), este resultado es lógico ya que al aumentar el tamaño de partícula aumenta también el tamaño de diámetro de poro por lo que es más fácil realizar el proceso de drenaje.

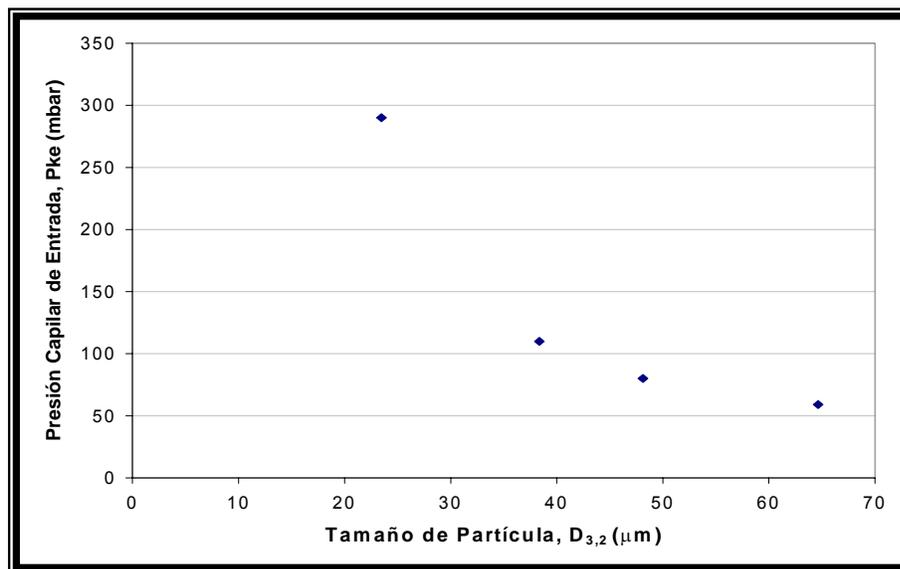


Figura N° 54. Variación de la presión capilar de entrada (P_{ke}) con respecto al tamaño de partícula.

En cuanto al valor de la saturación remanente se puede observar que disminuye al aumentar el tamaño de partícula (ver figura N° 55), esto sucede porque el tamaño de poro también aumenta y se puede remover una mayor cantidad de líquido presente en la estructura porosa por lo que la saturación remanente disminuye. Este comportamiento de las curvas de presión capilar concuerda con los resultados obtenidos por Cayama [en 1999].

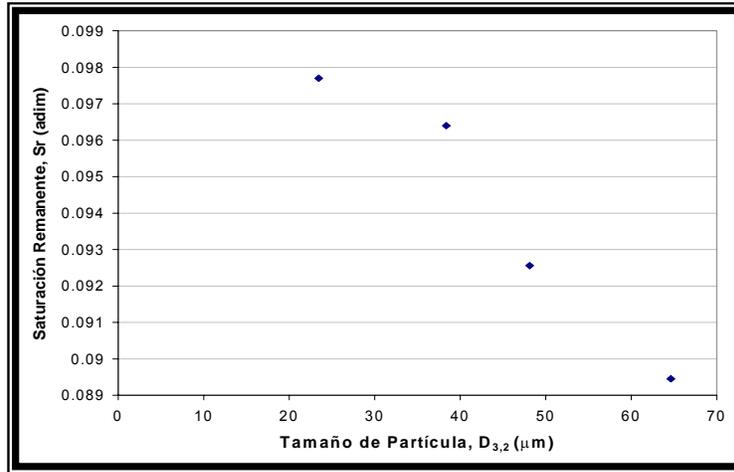
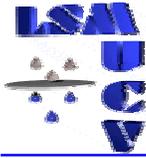


Figura N° 55. Variación de la Saturación remanente (S_r) con respecto al tamaño de partícula.

En la figura N° 56 se observa que el valor del parámetro de distribución de tamaño de poro aumenta al aumentar la desviación estándar geométrica y para las fracciones estrechas disminuye al aumentar el tamaño de partícula como se observa en la figura N° 57.

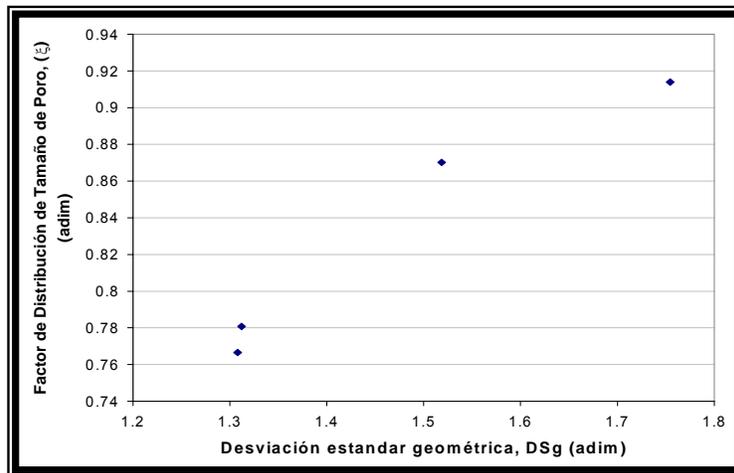


Figura N°56. Variación del factor de distribución de Tamaño de Poro con respecto a la desviación estándar geométrica

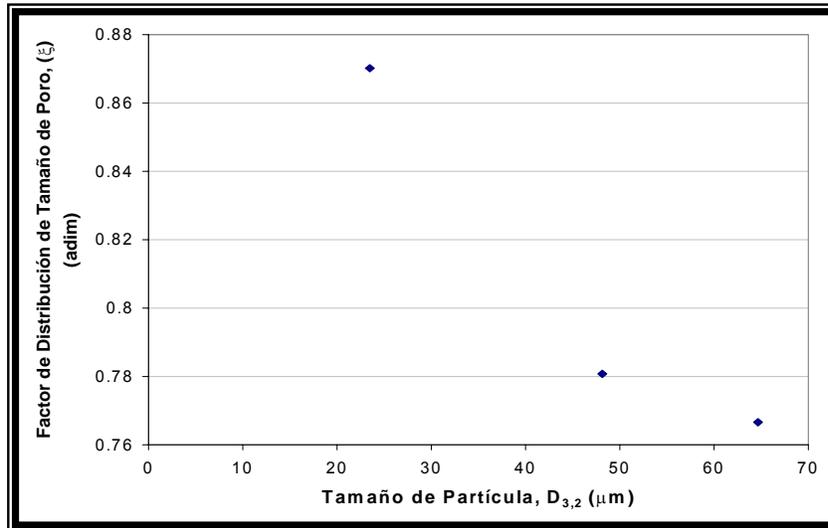
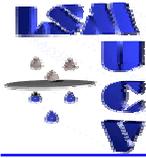
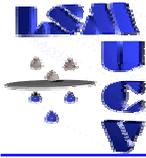


Figura N° 57. Variación del Factor de Distribución del Tamaño de Poro con respecto al Tamaño de Partícula de la fracciones estrechas



9.2.5.2 Modelo de Rosin-Rammler Adaptado.

Este modelo consiste en ajustar los valores experimentales utilizando la ecuación N° 32 del marco teórico. En la figura N° 58 se muestran las curvas de presión capilar y el ajuste por este modelo para todas las granulometrías utilizadas.

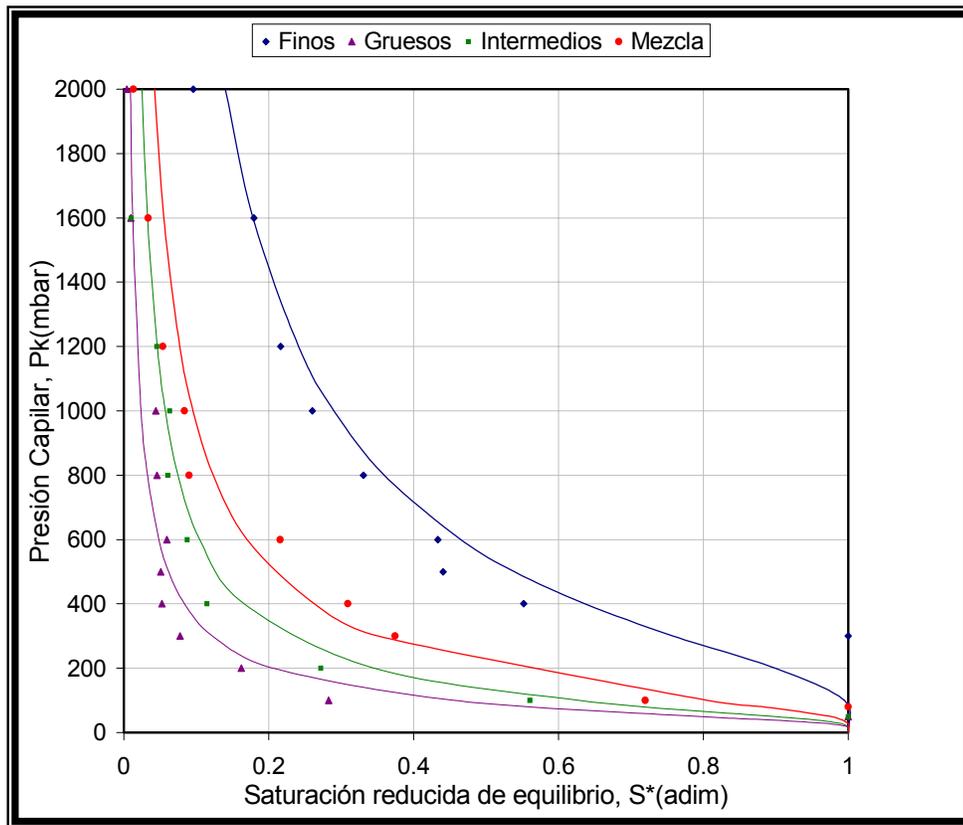
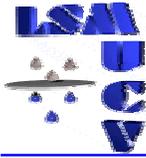


Figura N° 58. Curva de presión capilar y ajuste por el modelo de Rosin-Rammler para todas las granulometrías utilizadas

En la figura N° 58 se compara la curva de presión capilar y su ajuste por el Modelo de Rosin- Rammler para las granulometrías utilizadas en este trabajo. Es importante destacar que este modelo tiene asociado un



Discusión de Resultados

parámetro PK' en lugar de la presión capilar de entrada del modelo Potencial; este parámetro no está asociado a la presión necesaria para comenzar el proceso de drenaje sino a la presión capilar promedio de la curva de presión capilar [Sorrentino, 2002]. En este modelo se nota un comportamiento similar al observado en el modelo potencial. En la figura N° 59 se observa que PK' disminuye al aumentar el tamaño de partícula. En cuanto al valor de saturación remanente se observa que posee el mismo comportamiento que en el modelo potencial, es decir, disminuye al aumentar el tamaño de partícula (ver figura N° 60) y el factor de distribución de tamaño de poro aumenta al aumentar la desviación estándar al igual que en el modelo Potencial y para las fracciones estrechas disminuye al aumentar el tamaño de partícula (ver figuras N° 61 y N° 62 respectivamente).

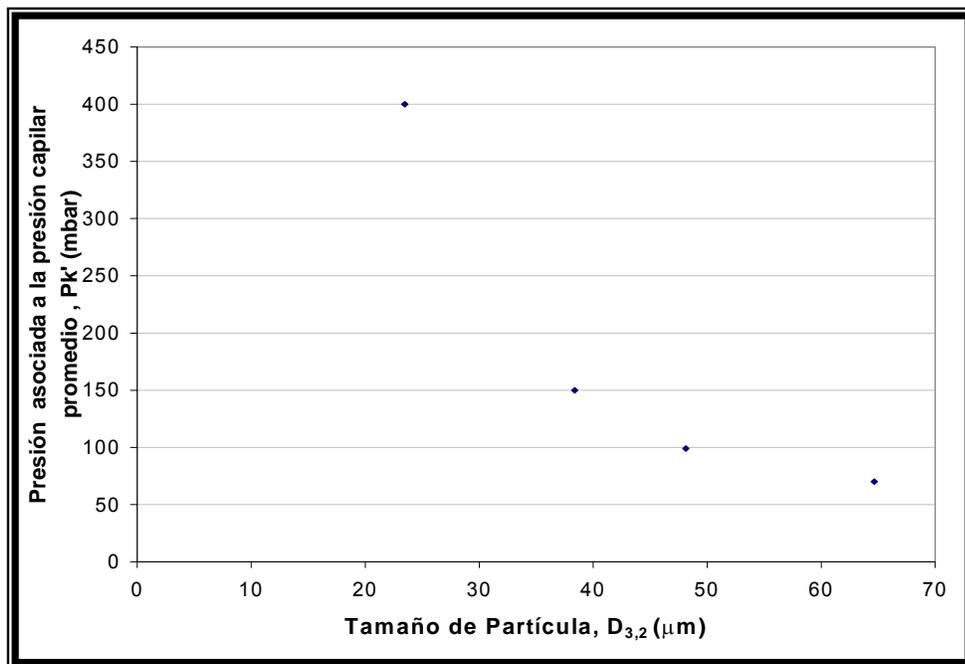
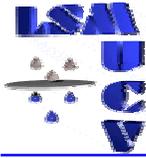


Figura N° 59. Variación de la presión asociada a la presión capilar promedio (PK') con respecto al Tamaño de Partícula



Discusión de Resultados

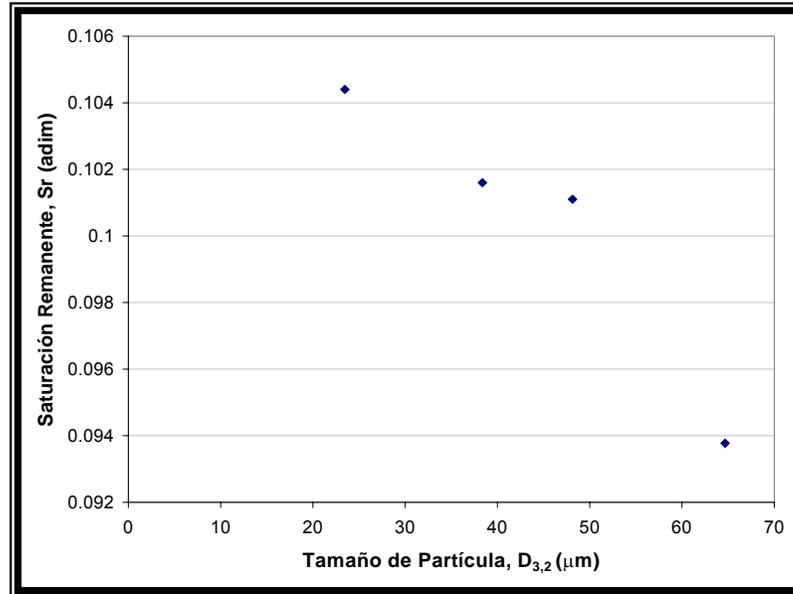


Figura N° 60. Variación de la Saturación Remanente (S_r) con respecto al tamaño de partícula.

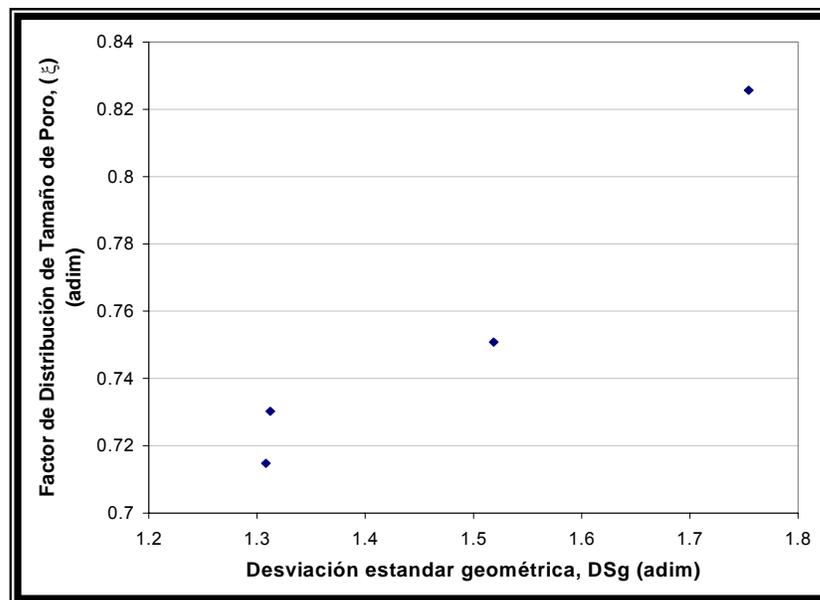


Figura N° 61. Variación del factor de Distribución del Tamaño de poro (ξ) con respecto a la desviación estándar geométrica

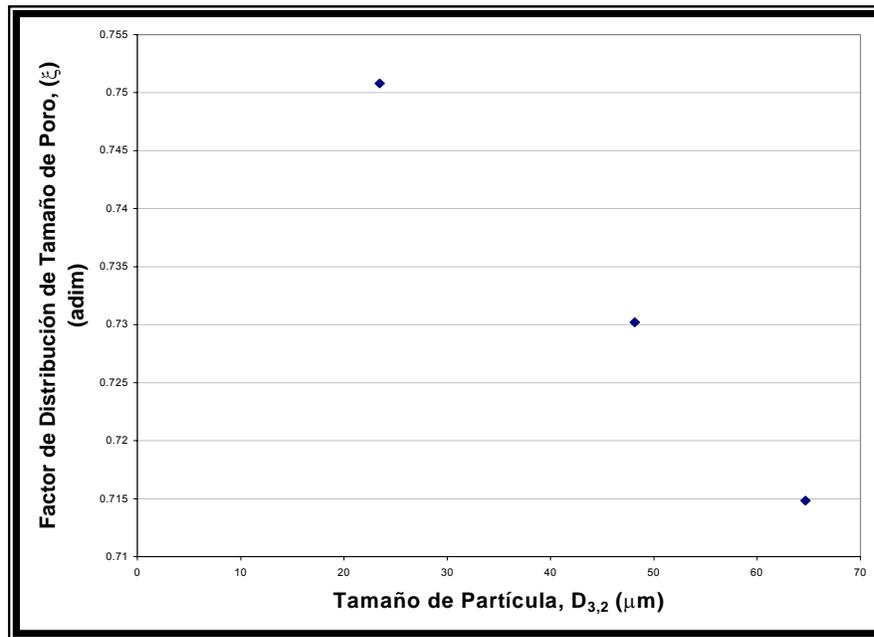
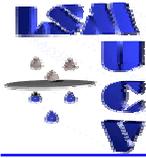


Figura N° 62. Variación del factor de Distribución del Tamaño de poro (ξ) con respecto al tamaño de partícula de las fracciones estrechas.

9.2.5.3. Comparación de los dos modelos de ajuste para la curva de presión capilar

Debido a que el modelo adaptado de Rosin-Rammler utiliza la saturación reducida de equilibrio ($S^*\infty$) y no la saturación de equilibrio ($S\infty$), se calcularon los valores de saturación de equilibrio para este modelo para compararlos en una misma escala de saturación.

En las figuras N° 63, 64, 65 y 66 se comparan los dos modelos de ajuste para cada granulometría utilizada.

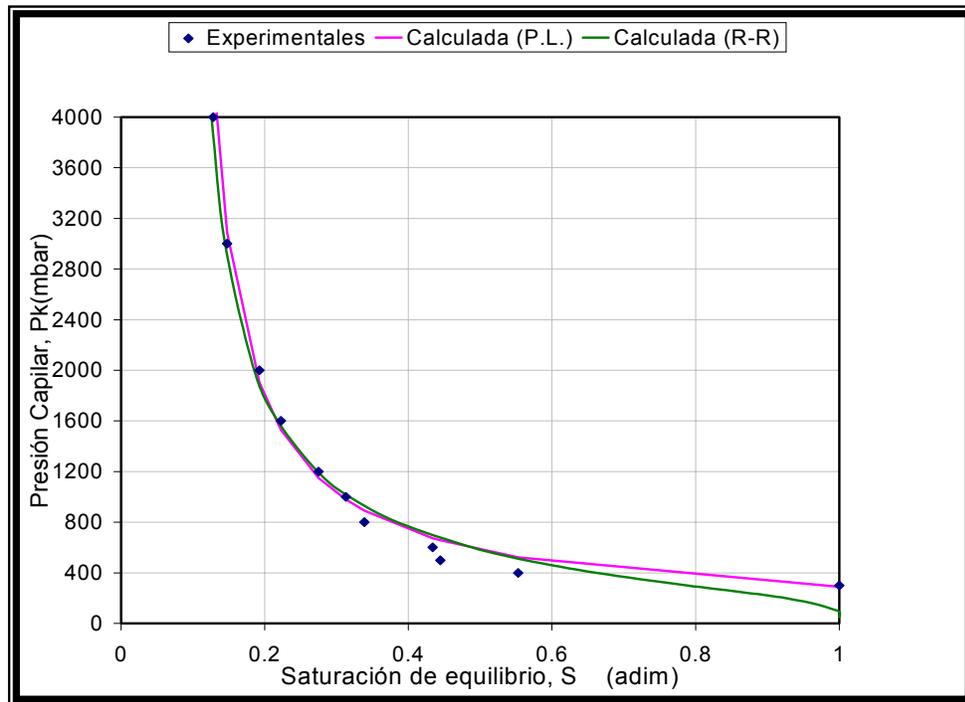
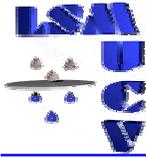


Figura N° 63. Curva de presión capilar ajustada por Parámetros Libres y Rosin-Rammler para la fracción de finos.

En la figura N° 63, se observa que ambos modelos ajustan bien a la curva para valores de S_{∞} cercanos a S_r . Para valores de S_{∞} cercanos a 1, se observa una pequeña diferencia entre ambos modelos, siendo el modelo Potencial el que mejor ajusta en esta zona de la curva, debido a que el valor de presión capilar de entrada para este modelo es similar al obtenido experimentalmente. Se debe destacar que para obtener un buen ajuste por el modelo de Rosin- Rammler es necesario tener un buen estimado experimental del valor de saturación remanente. Debido a que el valor de saturación remanente tomado para esta fracción (saturación de equilibrio para una presión de 4 bar) no es lo suficientemente confiable, como se



Discusión de Resultados

puede observar en la curva de presión capilar, el ajuste por el modelo de Rosin-Rammler no es el más indicado para esta fracción.

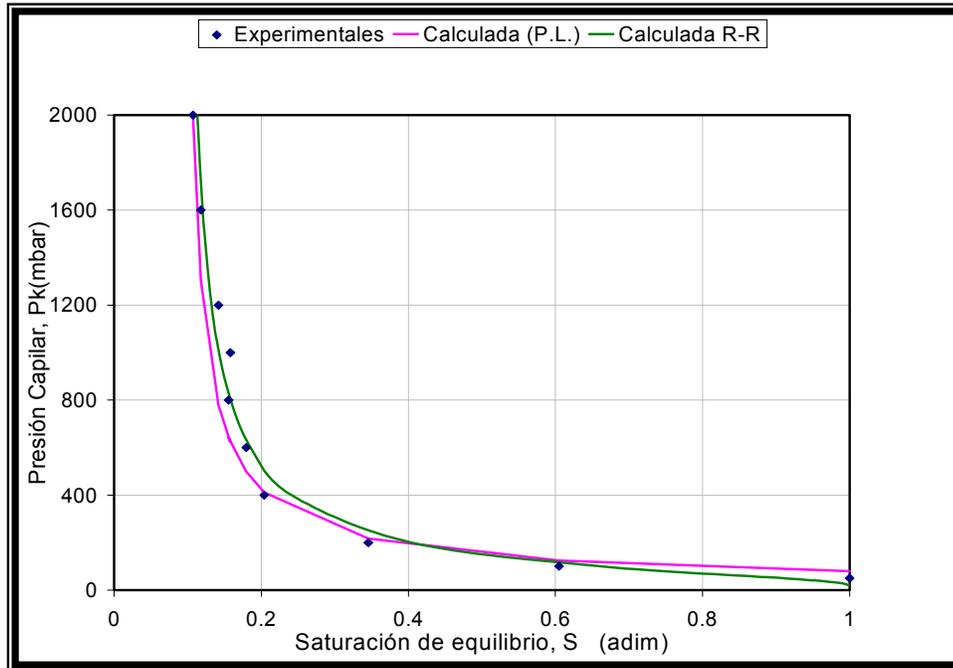


Figura N° 64. Curva de presión capilar ajustada por Parámetros Libres y Rosin-Rammler para la fracción de Intermedios.

En la figura N° 64, se puede apreciar que ambos modelos ajustan bien la curva tanto en la parte superior (valores de S_{∞} cercanos a S_r) como inferior de la misma (valores de S_{∞} cercanos a 1), destacándose que para esta fracción se ha estimado un valor de saturación remanente experimental más aceptable, por lo que el ajuste por el Modelo de Rosin –Rammler ha sido tan bueno como el obtenido por el Modelo Potencial. Se observa que los valores de presión capilar de entrada son similares para ambos modelos.

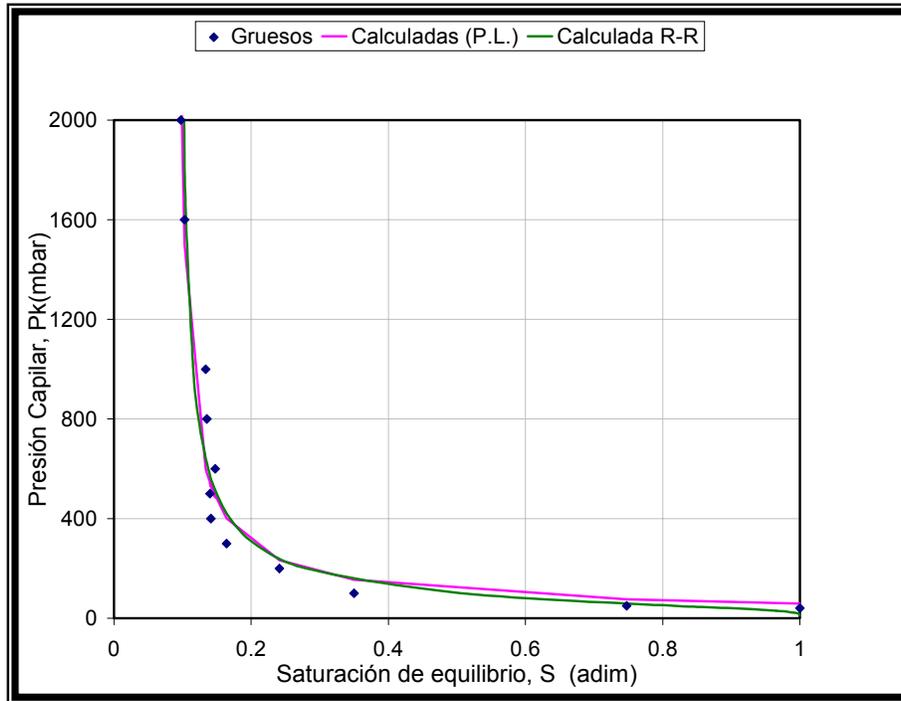
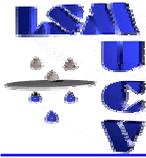


Figura N° 65. Curva de presión capilar ajustada por Parámetros Libres y Rosin-Rammler para la fracción de Gruesos.

Como se aprecia en la figura N° 65, el valor estimado experimentalmente de saturación remanente para esta fracción, ha sido bueno, lo cual trae como consecuencia que ambos modelos hayan arrojado un buen ajuste para la curva. Se puede decir entonces, que para la fracción de gruesos ambos modelos ajustan muy bien la curva de presión capilar.

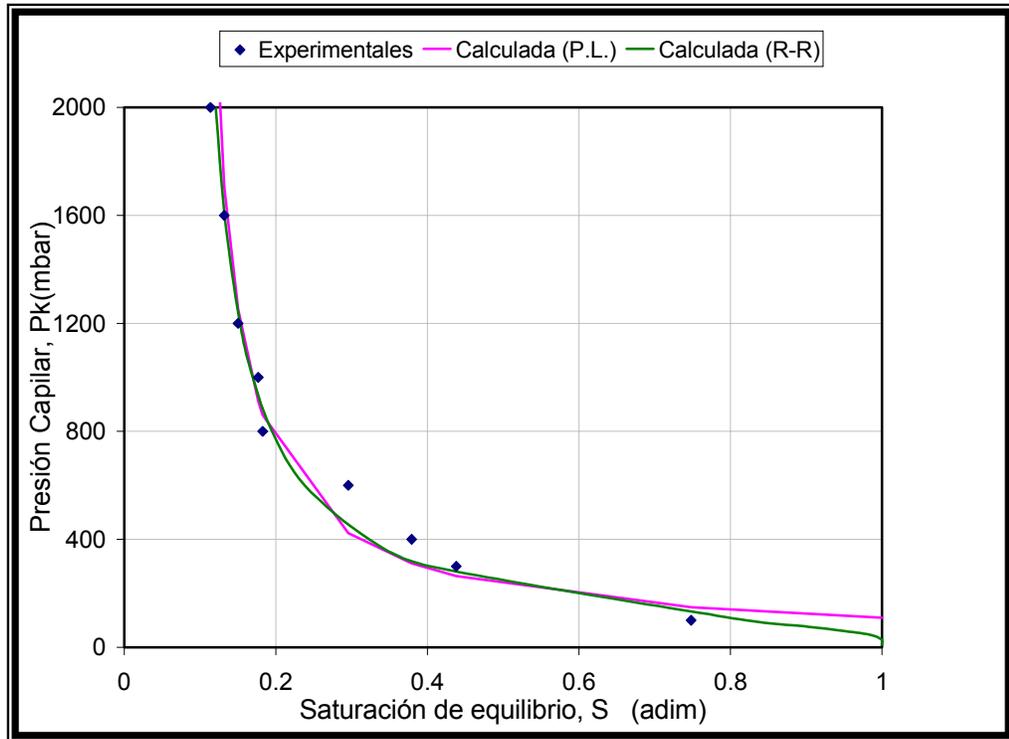
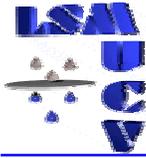
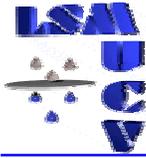


Figura N° 66. Curva de presión capilar ajustada por Parámetros Libres y Rosin-Rammler para la Mezcla.

En la figura N° 66, se observa que el valor de saturación remanente estimado experimentalmente, no ha sido lo suficientemente bueno, por lo que se obtienen pequeñas diferencias en los ajustes reportados por ambos modelos sobre todo para valores de S_{∞} cercanos a 1. Se observa que la presión capilar de entrada difiere del valor obtenido por el modelo potencial, el cual es similar al obtenido experimentalmente. Debido a esto es preferible considerar el Modelo Potencial como el de mejor ajuste.



9.2.6 Curva de Distribución de Tamaño de Poro

9.2.6.1 Distribución acumulada en volumen de poros drenados

Este modelo de distribución de tamaño de poro esta asociado al modelo potencial de la curva de presión capilar por lo tanto se usaron los valores de P_{ke} , S_r y ξ de este modelo.

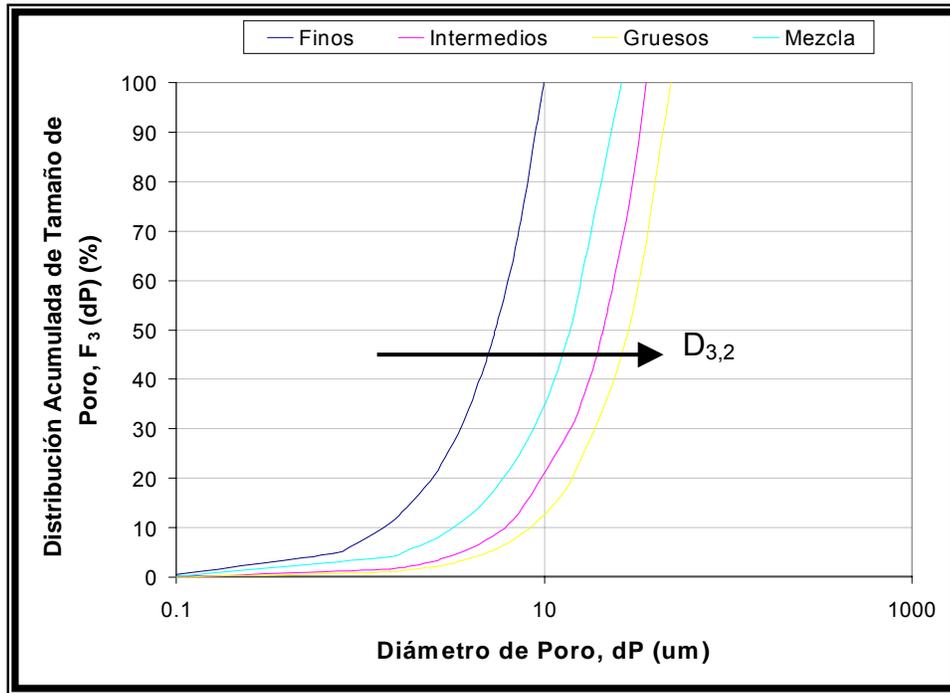
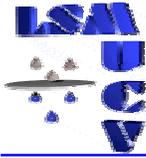


Figura N° 67. Curva de distribución Acumulada de Tamaño de Poro para todas las granulometrías utilizadas

En la figura N° 67 se observa que la distribución acumulada de tamaño de poro tiene una relación con la distribución de tamaño de partícula. Se puede notar que al aumentar el tamaño de partícula aumenta también el tamaño de poro. También se puede notar que la amplitud de la distribución de tamaño de poro viene determinada por el valor del factor de distribución de tamaño de poro; si el valor del factor de distribución de tamaño de poro



Discusión de Resultados

aumenta, la amplitud de la distribución de tamaño de poro también aumenta. Esto indica que el factor de distribución de tamaño de poro aumenta al aumentar la desviación estándar geométrica.

9.2.6.2. Distribución acumulada en número de poros drenados (Modelo de Nicolaou)

Este modelo permite obtener la cantidad (gen número) de poros con tamaño cercano al tamaño de poro mínimo o al tamaño de poro máximo presentes en un medio poroso. Este comportamiento está relacionado con el valor del factor de distribución de tamaño de poro (ξ). En la figura N° 68 se observa la distribución en número de tamaño de poro para todas las granulometrías utilizadas.

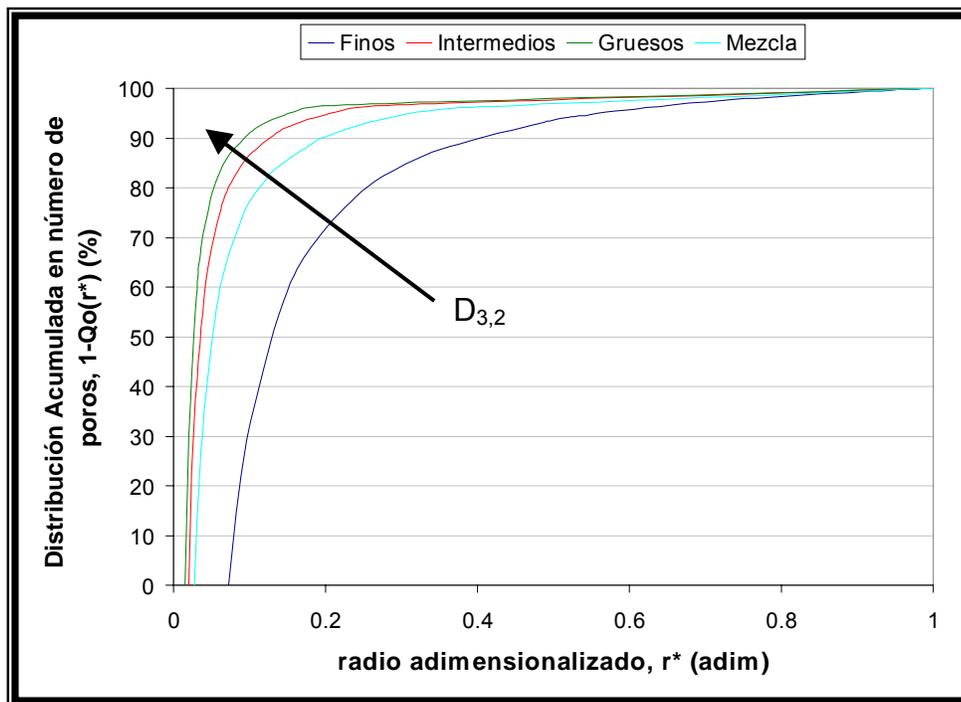


Figura N° 68. Curva de Distribución Acumulada en número de Poro para todas las granulometrías utilizadas.



Discusión de Resultados

En la figura N° 68 se observa que r_{\min}^* aumenta cuando disminuye el tamaño de partícula. También se observa que la fracción de gruesos tiene un mayor número de poros con tamaño cercano al tamaño de poro mínimo, lo que indica que su distribución de tamaño de poro es estrecha.

9.2.7. Comparación entre la distribución de tamaño de poro del disco y las tortas de filtración.

En las figuras N° 69 y N° 70 se compara la distribución de tamaño de poro para las tortas de filtración y el disco poroso de 10 μm , para observar el efecto del factor de distribución de tamaño de poro en la amplitud de la misma.

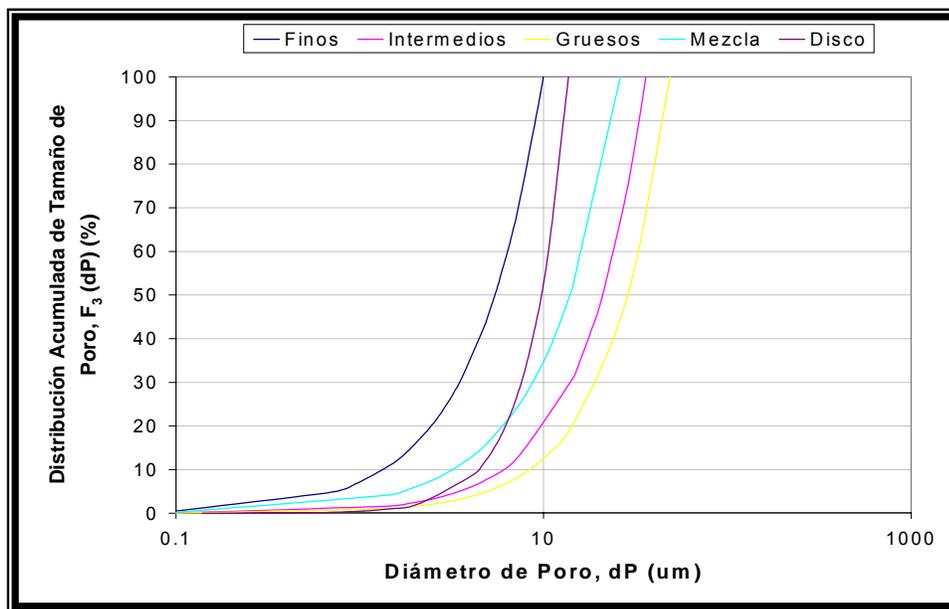


Figura N° 69. Curva de Distribución Acumulada de Tamaño de Poro para todas las granulometrías utilizadas y el disco

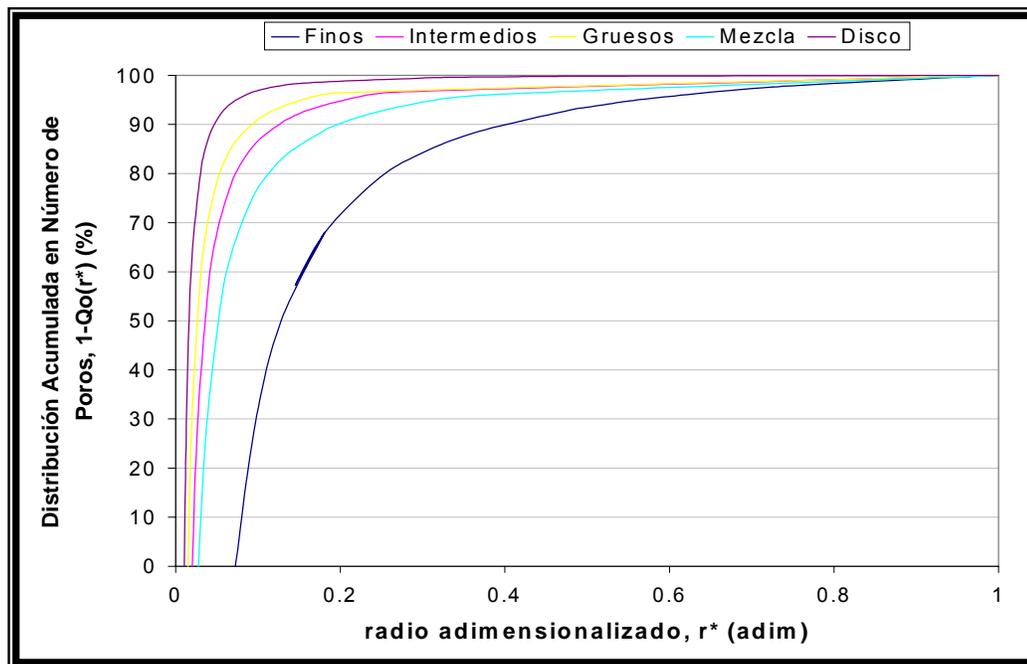
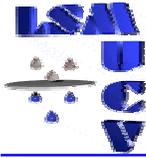


Figura N° 70. Curva de distribución Acumulada en Número de Poro para todas las granulometrías utilizadas y el disco.

En la figura N° 69 se observa que el tamaño promedio de poro para el disco es de aproximadamente de $10 \mu\text{m}$ y que al aumentar el $D_{3,2}$ de las tortas de filtración el valor de X_{50} de poro aumenta. Mientras que en la figura N° 70 se observa que el disco poroso presenta una distribución de tamaño de poro más estrecha y para las tortas al disminuir el $D_{3,2}$ la distribución es más amplia.

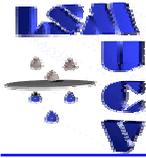


10. CONCLUSIONES

De acuerdo con los datos experimentales y los resultados obtenidos se pueden establecer las siguientes conclusiones que constituyen los alcances y limitaciones de este trabajo especial de grado:

MEDIOS POROSOS CONSOLIDADOS

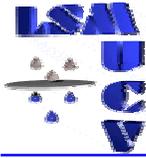
- Los valores de porosidad del disco, difieren en menos de 4% de los valores obtenidos por Ramírez. El valor de porosidad obtenido por el método de intrusión de líquido presenta una diferencia de menos de 1 % del valor obtenido por el método de densidad. Por lo tanto la porosidad del disco puede ser determinada por cualquiera de los métodos.
- El valor de permeabilidad del disco obtenido difiere en 27% del valor obtenido por Ramírez, que hasta ahora es la única referencia de la permeabilidad.
- A medida que aumenta la diferencia de presión aplicada, disminuye la saturación de equilibrio (S_{∞}) y aumenta la velocidad inicial de drenaje.
- Tanto el modelo potencial como el modelo de Rosin-Rammler adaptado proporcionan un buen ajuste para la curva de presión capilar del disco.
- La distribución de tamaño de poro del disco es estrecha, esto se debe a que el disco está diseñado para que todos sus poros tengan el mismo tamaño. El X_{50} de poro es aproximadamente $10 \mu\text{m}$, el cual coincide con el valor nominal de diámetro de poro del disco.



-

MEDIOS POROSOS NO CONSOLIDADOS

- La porosidad de las tortas no varía con la presión, esto indica que las tortas son incompresibles para el rango de diferencias de presión estudiadas.
- Las fracciones estrechas presentan mayor porosidad que la mezcla. Esto se debe a que las partículas más pequeñas incluidas en la mezcla ocupan los espacios vacíos, reduciendo de esta forma la porosidad.
- Al aumentar la desviación estándar geométrica, disminuye el valor de porosidad promedio de las tortas. Mientras que al aumentar el $D_{3,2}$ el valor de porosidad promedio de las tortas también aumenta.
- El método de densidad utilizado para calcular la porosidad de las tortas es muy sensible a la altura de las mismas, por lo tanto no ofrece valores confiables de porosidad.
- Al aumentar el $D_{3,2}$ disminuye la permeabilidad promedio de las tortas. Mientras que al aumentar la desviación estándar geométrica el valor de permeabilidad promedio de las tortas disminuye.
- Al aumentar el $D_{3,2}$ aumenta la velocidad inicial de drenaje y disminuye el valor de saturación de equilibrio (S_{∞}).
- A medida que aumenta el tamaño de partícula ($D_{3,2}$) disminuye la presión capilar de entrada (P_{ke}) y el valor del parámetro Pk' utilizado en el modelo de Rosin-Rammler.



- A medida que aumenta el tamaño de partícula ($D_{3,2}$) disminuye el valor de la saturación remanente (S_r).
- Al aumentar la desviación estándar geométrica aumenta el valor del factor de distribución de tamaño de poro (ξ). Esto implica que la distribución de tamaños de poro es amplia.
- A medida que aumenta el tamaño de partícula ($D_{3,2}$) aumenta también el tamaño promedio de los poros (dP_{50}).

PARA MEDIOS POROSOS CONSOLIDADOS Y NO CONSOLIDADOS

- El modelo de Nicolaou proporciona un buen ajuste para los datos de cinética de drenaje capilar, este modelo puede ser utilizado para minimizar los posibles errores cometidos en los valores experimentales.
- El modelo de Rosin Rammler para ajustar la curva de presión capilar proporciona un mejor ajuste que el modelo potencial cuando se tiene un buen estimado experimental del valor de saturación remanente.



11. RECOMENDACIONES

Para mejorar los futuros trabajos de caracterización de estructuras porosas se recomienda:

- Desarrollar modelos para la distribución de tamaño de poro basados en la ecuación del modelo adaptado de Rosin-Rammler para el ajuste de la curva de presión capilar.
- Verificar que el disco utilizado esté limpio para garantizar la confiabilidad de los valores obtenidos.
- Desarrollar un método más efectivo para calcular la porosidad del disco poroso, debido a que el método de intrusión de líquido utilizado no es muy confiable.
- Trabajar con mezclas amplias para evaluar el comportamiento de los modelos utilizados para ajustar la curva de presión capilar.
- Garantizar que el valor obtenido experimentalmente para la saturación remanente sea el apropiado para lograr una mejor representación de la curva de presión capilar mediante el modelo de Rosin-Rammler.
- Verificar que el micrómetro esté bien calibrado antes de realizar las pruebas. En caso de que haya sido utilizado por otra persona se debe volver a calibrar ya que esto puede afectar los valores obtenidos de altura de la torta.
- Al momento de añadir la suspensión en la celda de filtración debe asegurarse que esté bien agitada y además hacerlo rápidamente para evitar que el sólido se quede en el recipiente.
- Después de cada prueba, limpiar la celda de filtración para evitar que se contamine la muestra cuando se haga la siguiente experiencia.



12. BIBLIOGRAFÍA

1. ANLAUF, H.; Nicolaou, I. y Sorrentino, J. "Cake Filtration Technology for the Process Industry"
Material del curso. Caracas, 1999.
2. ARIAS, T. y Ugas, D. "Influencia de la distribución de tamaño de partícula en el equilibrio de deslicorización"
Trabajo Especial de Grado. Escuela de Ingeniería Química. U.C.V., 1998.
3. BADGER & BANCHERO "Introducción a la Ingeniería Química"
Editorial McGraw-Hill. México, 1970.
4. BAROID "Manual of Drilling Fluids Technology" Tomo I
Editorial McGraw Hill, 1974.
5. BIRD, Byron "Fenómenos de Transporte"
Editorial Reverté, S.A. New York, 1982.
6. BROOK, R y COREY, A. "Hidraulic properties of porous media"
Hydrology Paper. Colorado State University, 1964.
7. BUSTAMANTE, Yarianni "Desarrollo de un método integral para determinar la presión capilar en medios porosos"
Trabajo Especial de Grado. Escuela de Ingeniería Química. U.C.V., 1998.
8. CARMAN, P. "Capillary rise and capillary movement of mixture in fine sands"
Soil Science. Volume N° 52, 1941.
9. CAYAMA, Noelia "Influencia del tamaño de partícula y de la desviación estándar sobre la curva de presión capilar"
Trabajo Especial de Grado. Escuela de Ingeniería Química. U.C.V., 1999.
10. GARCÍA, J.; Gimón, R. "Efecto del contenido de partículas finas en las características del revoque"
Trabajo Especial de Grado. Escuela de Ingeniería Química. U.C.V. Febrero, 1998.
11. GRAY, George "Composition and properties of drilling and completion fluids"
Gulf Publishing Company. Houston, 1998.

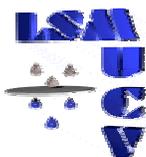


12. GUADA, F.; Trocóniz, J. "Efecto de la distribución de tamaño de partícula en la curva de presión capilar"
Trabajo Especial de Grado. Escuela de Ingeniería Química. U.C.V., 1996.
13. KOENDERS, M. A.; Wakeman, R. J. "The inicial stages of compact formation from suspensions by filtration"
Chemical Engineering Science. Volume 51. N° 16. February, 1996. Pp 3897-3908.
14. MAGUAL, A.; Torres, J. "Formación de revoques con esferas lisas de material sintético"
Trabajo Especial de Grado. Escuela de Ingeniería Química. U.C.V., 1998.
15. MALVERN INSTRUMENTS "Getting Started"
England, 1995.
16. NICOLAOU, I. "Fest Flussung Trennung Fortschritte in Theorie und Praxis der Kuchenbildung und Entfeuchtung durch Gasdruckdifferenz"
Tesis de habilitación. Universidad de Karlsruhe, 1996.
17. PERRY, R.; Green, D. "Perry's Chemical Engineers Handbook"
Editorial McGraw-Hill. 6ª edición. México, 1992.
18. POMBO, Marina "Organización del Manual de Operación del equipo Filtratest-UCV". Caracas, 1997.
19. RIVAS, Ernesto "Estadística general". Imprenta U.C.V., Caracas, 1985.
20. PURCHAS, Derek "Handbook of Filter Media"
Editorial Elsevier advanced Technology. 1ª edición. Oxford, 1996.
21. RAMÍREZ, Ada "Caracterización en la penetración de sólidos a una matriz porosa"
Trabajo Especial de Grado. Escuela de Ingeniería Química. U.C.V. 2002
22. ROCCARO, Vicenta "Trabajo de ascenso a profesor titular"
Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química. U.C.V., 1997.
23. SALAZAR, Y; Valero, A. "Formación de revoques sobre discos porosos utilizando intecarb (grados 20-25 y 40-45) con adición de finos y gruesos"
Trabajo Especial de Grado. Escuela de Ingeniería Química. U.C.V. 2002



Bibliografía

24. Serie Schaum Spiegel, Murray "Estadística". Editorial McGraw Hill. México, 1991.
25. SCHEIDEGER, "The physics of fluids through porous media". The Macmillan Company. New York, 1970.
26. SCHRAMM, Gebhard "A Practical Approach to Rheology and Rheometry" HAAKE. Germany, 1994.
27. SORRENTINO, José "Estudio de la formación de revoques de fluidos de perforación en sólidos de distintas granulometrías" Laboratorio de Separaciones Mecánicas. Universidad Central de Venezuela. Caracas, 1998.
28. SORRENTINO, J.; Lezama, L. y Guzmán, N. "Caracterización de Sistemas de Partículas" Serie: Monografías del LSM-UCV. Caracas, 1998.
29. SORRENTINO, J. A., "Advances in correlating filtercake properties with particle collective characteristics". Doctoral Dissertation University of Karlsruhe, Germany, 2002.
30. SVAROVSKY "Solid-liquid separations" Butterworths. 2^a edición. Londres, 1988.
31. TÚNEZ, D.; Márquez, I. "Efecto del tamaño promedio y de la amplitud de la distribución de tamaño de partículas en la cinética de deslicorización" Trabajo Especial de Grado. Escuela de Ingeniería Química. U.C.V., 1998.
32. VALENTINO, Salvatore "Modelos para predecir la humedad de las tortas de filtración" Trabajo Especial de Grado. Escuela de Ingeniería Química. U.C.V., 1997.
33. WAKEMAN, R. "Filter cake dewatering" Butterworths. 2^a edición. Londres, 1988.



13. APENDICES

Apéndice A: Análisis granulométrico.

Apéndice A-1: Datos obtenidos en el equipo de difracción láser Mastersizer 2000 para las fracciones seleccionadas.

Tabla N° 9. Distribución de tamaño de partícula para las fracciones estrechas mayores de 38 μm .

Distribución acumulada, F(x) (%)	Fracción 38-45 Tamaños X (um)	Fracción 45-53 Tamaños X (um)	Fracción 53-63 Tamaños X (um)	Fracción 63-75 Tamaños X (um)	Fracción 75-90 Tamaños X (um)	Fracción 90-106 Tamaños X (um)	Fracción 106-125 Tamaños X (um)	Fracción > 125 Tamaño X (um)
10	36.95	43.94	50.13	61.98	73.84	87.82	103.92	139.51
20	41.76	49.03	56.26	68.85	83.79	97.29	117.55	159.27
30	45.77	53.61	61.41	75.20	90.28	105.96	127.03	176.77
40	49.38	57.90	66.43	80.91	96.82	113.75	136.31	193.25
50	53.20	62.20	71.34	86.61	103.36	121.21	145.59	209.72
60	57.18	66.43	76.71	92.31	110.51	130.48	155.57	229.33
70	61.78	71.85	82.08	99.53	119.42	139.76	168.38	250.61
80	67.73	78.75	90.28	108.86	128.33	149.04	181.19	276.71
90	76.47	88.63	101.06	118.19	143.67	166.02	202.52	319.09
100	133.89	150.23	168.56	212.20	238.09	267.15	336.32	598.07
Mediana X₅₀ (um)	49,93	58,55	67,10	81,42	97,42	114,53	137,21	197,70
Tamaño promedio D_{3,2}	48,13	56,42	64,66	78,75	94,39	110,96	132,87	188,59
Desviación estándar geométrica DS_g (adim)	1,3122	1,3076	1,3081	1,2936	1,2875	1,2866	1,2888	1,3709

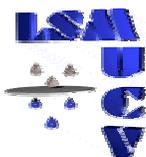


Tabla N° 10. Distribución de tamaño de partícula para las fracciones estrechas menores de 38 μm y para la mezcla amplia.

Distribución acumulada, F(x) (%)	Fracción gruesos a 3000 rpm Tamaños X (μm)	Fracción gruesos a 4000 rpm Tamaños X (μm)	Fracción gruesos a 5000 rpm Tamaños X (μm)	Mezcla Tamaños X (μm)
10	26.40	16.08	12.31	22.20
20	33.74	19.14	14.79	29.99
30	40.25	21.70	16.95	37.65
40	46.98	24.29	19.17	44.89
50	53.98	26.82	21.38	51.90
60	62.51	30.03	24.12	59.24
70	72.65	33.23	26.91	66.83
80	85.08	37.46	31.19	76.81
90	105.49	45.05	36.86	92.17
100	238.09	94.79	67.104	238.09
Mediana X50 (μm)	50,97	25,35	20,20	48,91
Tamaño promedio D_{3,2}	39,67	23,49	23,47	37,73
Desviación estándar geométrica DS_g (adim)	1,7904	1,4764	1,5186	1,7545



Apéndice B: Valores experimentales de las pruebas de drenaje capilar.

Tabla N° 11. Datos experimentales de las tortas de filtración para la fracción de finos.

Presión, P (mbar)	Tiempo, t (seg)	Altura de la torta, h_c (mm)					Masa de torta húmeda, MTH (gr)	Masa de torta seca, MTS (gr)
300	10	31.53	31.51	31.01	31.45	30.88	118.472	88.812
	50	30.37	31.16	31.32	31.51	29.50	117.707	89.150
	100	30.79	31.84	30.86	30.55	30.95	116.782	87.626
	200	32.11	31.86	32.12	31.95	31.55	121.188	89.626
	300	32.32	32.21	32.35	32.37	32.10	122.388	90.263
400	10	32.93	33.11	33.05	32.75	32.47	118.043	90.455
	50	32.01	31.72	31.47	31.73	32.70	114.472	90.184
	100	31.57	31.14	31.81	32.06	32.21	112.933	90.268
	200	31.49	32.10	32.40	31.76	31.90	109.391	90.634
	300	32.11	32.41	32.76	32.55	32.14	106.425	90.177
500	10	32.86	32.35	32.65	32.42	32.81	116.088	90.874
	50	32.78	33.06	32.85	32.5	33.05	112.673	90.854
	100	32.89	32.61	32.46	32.43	32.55	111.073	91.134
	200	32.70	32.54	32.25	32.23	32.41	105.620	90.659
	300	32.11	32.41	32.76	32.55	32.14	104.293	90.419
600	10	32.07	32.10	32.37	32.38	32.35	113.111	90.232
	50	32.38	32.18	32.23	32.33	32.90	109.856	90.785
	100	31.98	31.89	32.39	32.61	31.71	106.235	89.706
	200	31.73	31.76	31.52	31.05	31.23	103.402	89.627
	300	31.83	31.04	31.86	31.56	31.78	102.846	89.914
800	10	32.84	32.13	32.47	32.64	32.14	114.794	90.891
	50	32.66	32.73	32.15	32.23	32.87	108.571	90.802
	100	32.78	32.10	32.30	32.05	32.92	106.568	90.761
	200	32.04	31.64	31.02	32.15	32.30	103.564	90.855
	300	32.66	31.06	32.15	32.76	32.91	101.203	90.828



Apéndices

Tabla N° 11. Datos experimentales de las tortas de filtración para la fracción de finos (...Continuación).

Presión, P (mbar)	Tiempo, t (seg)	Altura de la torta, hc (mm)					Masa de torta húmeda, MTH (gr)	Masa de torta seca, MTS (gr)
1000	10	31.28	31.44	31.64	32.32	32.59	112.216	90.389
	50	31.29	31.85	31.35	31.75	31.68	106.313	90.414
	100	31.22	31.18	31.31	30.99	31.71	103.405	90.334
	200	31.64	31.87	32.65	32.61	31.91	101.347	90.501
	300	31.22	31.11	31.89	32.34	31.79	99.554	90.219
1200	10	32.25	32.21	32.30	33.66	33.90	109.666	90.490
	50	31.37	31.87	31.38	31.67	31.99	104.196	90.909
	100	31.06	31.51	31.78	31.68	31.84	101.297	90.297
	200	31.70	31.92	31.85	31.71	32.20	99.836	90.297
	300	31.16	31.73	31.47	31.6	31.11	98.491	90.488
1600	10	31.01	31.14	31.79	31.79	31.73	107.580	90.545
	50	31.14	31.17	31.66	31.65	32.19	102.046	90.291
	100	31.21	31.41	30.94	30.34	31.96	99.883	90.751
	200	31.10	31.92	31.12	32.02	32.21	98.294	90.727
	300	31.86	31.08	31.12	31.88	31.19	96.879	90.364
2000	10	31.16	31.73	31.16	32.35	32.07	105.829	90.643
	50	31.44	31.5	31.77	32.54	31.02	100.796	90.716
	100	31.65	31.95	31.55	31.87	32.41	98.815	90.421
	200	31.45	31.44	31.82	32.19	31.91	97.095	90.724
	300	31.02	31.17	31.27	32.11	31.07	95.751	90.137
3000	10	32.19	32.23	32.11	32.65	32.37	104.761	92.512
	50	32.79	32.7	32.8	33.04	32.73	98.789	91.385
	100	32.86	32.87	32.92	32.89	32.72	97.243	92.148
	200	32.73	32.78	32.94	32.87	32.66	96.268	90.908
	300	32.39	32.54	32.6	32.7	32.46	95.428	90.773
4000	10	32.47	32.39	32.65	32.76	32.54	102.01	91.334
	50	32.47	32.41	32.62	32.61	32.4	98.425	91.273
	100	32.21	32.24	32.57	32.48	32.23	96.460	90.589
	200	32.28	32.51	32.55	32.55	32.36	95.789	90.776
	300	32.38	32.42	32.54	32.36	32.32	94.549	90.547



Apéndices

Tabla N° 12. Datos experimentales de las tortas de filtración para la fracción de intermedios.

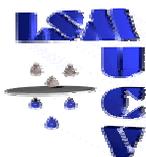
Presión, P (mbar)	Tiempo, t (seg)	Altura de la torta, h_c (mm)					Masa de torta húmeda, MTH (gr)	Masa de torta seca, MTS (gr)
100	10	31.65	30.78	30.32	29.45	30.37	118.661	99.414
	50	31.78	32.54	32.48	32.20	31.61	118.529	98.240
	100	32.75	32.61	32.69	33.27	32.70	115.546	97.974
	200	32.85	32.65	32.82	33.40	32.94	112.458	94.476
	300	32.78	32.84	32.74	32.99	32.95	109.162	89.653
200	10	33.12	33.27	33.20	33.40	33.38	114.104	97.494
	50	33.19	33.12	32.89	33.12	32.87	107.946	92.081
	100	32.95	33.05	32.87	32.92	32.89	104.167	91.540
	200	32.45	32.05	32.72	33.25	32.46	101.346	91.466
	300	32.58	32.60	32.38	32.42	32.57	100.202	89.652
400	10	32.38	32.34	32.53	32.69	32.47	103.953	92.654
	50	32.44	32.45	32.65	32.86	32.74	98.259	91.225
	100	30.98	31.15	31.24	31.25	31.98	97.181	90.686
	200	32.87	32.03	32.99	33.12	32.29	96.859	90.567
	300	32.62	32.47	32.79	32.90	32.20	95.677	89.267
600	10	32.56	32.57	32.41	32.24	32.55	101.640	91.134
	50	32.30	31.73	32.28	33.21	32.44	98.160	90.883
	100	32.75	32.94	32.72	32.24	32.79	96.473	90.529
	200	32.32	32.36	32.27	32.85	32.70	95.883	90.361
	300	32.54	32.13	32.53	32.91	32.78	94.480	89.147
800	10	32.58	32.64	32.69	32.35	32.58	100.593	91.762
	50	32.46	32.05	33.04	33.21	32.21	96.746	90.436
	100	32.36	32.20	32.50	32.69	32.83	95.840	90.422
	200	32.28	32.54	32.87	32.25	31.86	94.325	90.385
	300	32.38	32.69	32.69	31.92	32.28	94.291	89.143



Apéndices

Tabla N° 12. Datos experimentales de las tortas de filtración para la fracción de intermedios (...Continuación).

Presión, P (mbar)	Tiempo, t (seg)	Altura de la torta, h_c (mm)					Masa de torta húmeda, MTH (gr)	Masa de torta seca, MTS (gr)
1000	10	32.39	32.25	32.33	32.98	32.74	99.622	90.410
	50	32.52	32.59	32.69	32.77	32.45	96.235	90.354
	100	32.48	32.35	32.25	32.70	32.39	95.234	90.244
	200	32.52	32.62	32.62	32.49	32.59	94.291	90.207
	300	32.44	32.62	32.48	32.62	32.22	94.192	89.168
1200	10	32.89	32.06	33.19	33.10	33.28	99.507	91.398
	50	32.23	32.21	32.57	32.44	32.22	94.877	89.972
	100	32.05	32.08	32.25	32.47	32.31	94.388	89.931
	200	32.05	32.49	32.23	32.57	32.10	93.265	89.769
	300	33.30	32.28	32.43	32.29	32.98	92.346	87.723
1600	10	32.63	32.87	32.69	32.62	32.55	97.772	90.523
	50	32.39	32.54	32.80	32.63	32.15	95.035	90.078
	100	32.27	32.36	32.19	32.69	32.30	93.675	89.718
	200	33.03	32.07	32.72	32.88	32.30	91.773	89.225
	300	32.44	32.50	31.79	31.70	31.65	90.984	87.136
2000	10	31.90	31.89	32.11	32.27	32.10	96.818	89.858
	50	32.54	32.20	32.50	32.46	31.96	94.714	89.630
	100	32.54	31.67	31.98	32.31	32.12	93.706	89.567
	200	31.97	31.62	32.10	31.78	31.58	92.110	89.871
	300	32.26	31.78	31.86	32.21	32.38	91.717	88.188



Apéndices

Tabla N° 13. Datos experimentales de las tortas de filtración para la fracción de gruesos.

Presión, P (mbar)	Tiempo, t (seg)	Altura de la torta, h_c (mm)					Masa de torta húmeda, MTH (gr)	Masa de torta seca, MTS (gr)
50	10	28.64	28.32	28.05	28.43	28.45	114.603	95.010
	50	30.80	30.39	30.77	31.53	30.79	117.723	96.423
	100	31.42	31.53	32.12	32.43	31.21	114.915	93.970
	200	30.60	30.48	31.54	31.70	31.71	115.728	95.480
	300	31.72	31.45	32.15	32.81	31.55	116.462	95.112
100	10	29.99	34.05	34.86	34.18	34.98	119.011	97.803
	50	34.62	34.15	33.39	34.38	33.48	109.985	91.755
	100	34.82	33.75	34.12	34.45	34.44	105.122	90.502
	200	32.52	32.50	32.25	33.28	32.83	101.348	90.256
	300	32.52	32.31	32.69	32.21	32.82	101.198	90.175
200	10	31.62	30.49	30.97	32.40	32.05	103.802	91.005
	50	31.45	31.47	32.15	32.18	31.63	97.246	90.411
	100	31.79	31.46	32.35	32.62	31.75	99.190	90.364
	200	31.46	30.89	32.38	32.12	31.95	97.848	90.915
	300	31.47	31.69	31.32	32.07	31.74	96.598	88.012
300	10	31.72	31.76	31.85	32.34	31.89	103.361	91.376
	50	31.73	31.79	31.80	32.45	32.20	99.902	89.648
	100	31.05	31.88	32.13	32.51	31.97	96.849	89.628
	200	32.06	31.68	31.94	32.61	32.25	96.055	90.608
	300	32.09	32.11	32.52	32.65	32.04	95.226	90.115
400	10	29.99	34.05	34.86	34.18	34.98	100.225	89.907
	50	34.62	34.15	33.39	34.38	33.48	97.789	88.297
	100	34.82	33.75	34.12	34.45	34.44	96.662	90.126
	200	32.52	32.50	32.25	33.28	32.83	95.038	91.098
	300	32.52	32.31	32.69	32.21	32.82	93.371	87.021



Apéndices

Tabla N° 13. Datos experimentales de las tortas de filtración para la fracción de gruesos (...Continuación).

Presión, P (mbar)	Tiempo, t (seg)	Altura de la torta, h_c (mm)					Masa de torta húmeda, M _{TH} (gr)	Masa de torta seca, M _{TS} (gr)
500	10	32.19	31.80	31.55	32.77	32.55	100.543	88.091
	50	32.53	32.21	31.94	32.43	32.75	94.754	87.986
	100	32.25	31.96	32.03	32.87	32.71	94.828	88.047
	200	32.47	32.84	32.16	32.34	31.73	93.860	88.859
	300	32.16	32.01	32.38	31.94	32.72	92.720	87.697
600	10	30.43	30.59	30.40	31.44	30.98	98.906	88.438
	50	31.14	30.82	30.21	31.64	31.80	95.702	88.642
	100	31.49	31.31	31.43	31.75	31.99	94.506	88.834
	200	30.84	30.79	30.88	30.79	31.43	93.398	87.772
	300	30.84	30.30	31.25	31.99	31.20	93.201	88.864
800	10	30.87	30.42	30.86	31.03	31.06	94.756	85.104
	50	31.22	31.31	31.51	31.38	30.96	91.974	84.615
	100	31.55	31.37	31.65	32.05	31.55	95.342	89.702
	200	31.73	31.53	31.98	32.31	31.52	95.021	90.042
	300	30.83	31.36	31.65	32.31	31.66	93.924	89.892
1000	10	31.62	31.21	32.10	32.91	31.92	99.338	90.844
	50	31.45	31.40	32.15	32.92	31.98	95.797	89.870
	100	31.96	31.87	31.59	32.44	32.86	95.820	90.597
	200	31.63	31.18	31.83	32.57	32.01	94.639	90.248
	300	30.94	31.01	31.63	32.63	31.42	94.358	90.388
1600	10	31.96	31.74	32.10	32.43	31.91	98.889	90.474
	50	31.70	31.63	32.04	32.53	32.24	95.377	89.840
	100	31.46	31.62	31.61	32.27	31.69	94.434	89.838
	200	31.49	31.46	31.53	32.12	32.28	94.028	89.834
	300	31.24	31.70	31.54	31.53	32.28	91.355	88.602
2000	10	31.85	31.70	32.30	32.75	32.04	98.796	89.655
	50	32.20	32.05	32.81	33.12	32.20	95.761	90.059
	100	31.10	30.97	31.98	32.62	31.20	93.699	88.015
	200	31.97	31.45	31.24	32.25	31.55	93.349	90.599
	300	31.37	31.89	31.09	31.80	32.18	92.606	90.340



Apéndices

Tabla N° 14. Datos experimentales de las tortas de filtración para la mezcla amplia.

Presión, P (mbar)	Tiempo, t (seg)	Altura de la torta, h_c (mm)					Masa de torta húmeda, MTH (gr)	Masa de torta seca, MTS (gr)
0	10	30.40	30.41	30.52	30.63	30.18	115.361	92.975
	50	30.35	30.15	30.72	30.05	30.17	115.857	92.490
	100	30.55	30.20	30.75	30.80	30.43	114.333	92.280
	200	30.65	30.95	30.05	30.56	30.32	115.091	91.974
	300	30.23	30.95	31.40	30.23	30.74	115.781	91.939
100	10	29.51	29.70	29.87	30.93	30.86	115.802	94.712
	50	30.11	30.15	29.37	30.45	30.36	115.446	92.449
	100	30.03	29.96	30.02	30.43	31.14	113.621	91.496
	200	30.82	31.10	30.78	31.40	31.12	113.571	90.625
	300	30.69	30.69	30.37	31.21	30.90	111.374	90.427
300	10	30.76	30.74	30.99	31.36	30.96	114.246	96.693
	50	30.62	30.54	30.56	31.20	30.81	110.812	93.251
	100	30.43	30.23	30.21	31.13	30.55	107.503	94.610
	200	30.36	30.22	30.45	31.03	30.58	104.874	92.204
	300	30.27	30.29	30.22	30.83	30.52	103.038	91.191
400	10	30.76	30.63	30.48	31.29	31.14	109.295	91.416
	50	30.52	30.41	30.45	30.82	30.61	105.356	91.307
	100	30.26	30.28	30.42	30.87	30.41	103.586	90.830
	200	30.49	30.36	30.39	31.09	30.74	102.822	91.315
	300	30.52	30.52	30.36	30.90	30.73	101.710	91.347
600	10	30.48	30.67	31.24	31.59	30.86	104.976	92.947
	50	30.55	30.46	30.66	30.78	30.67	102.348	91.361
	100	30.23	30.12	30.25	30.72	30.58	100.731	91.327
	200	30.66	30.48	30.69	31.25	30.61	99.792	91.242
	300	30.61	30.30	30.76	31.36	30.55	98.979	90.839



Apéndices

Tabla N° 14. Datos experimentales de las tortas de filtración para la mezcla amplia (...Continuación).

Presión, P (mbar)	Tiempo, t (seg)	Altura de la torta, h_c (mm)					Masa de torta húmeda, MTH (gr)	Masa de torta seca, MTS (gr)
800	10	30.82	30.62	30.86	31.41	30.97	102.901	92.690
	50	30.30	30.16	30.46	30.86	30.45	100.074	91.898
	100	30.41	30.29	30.44	30.80	30.54	97.888	91.576
	200	30.51	30.28	30.42	31.15	30.70	97.502	91.396
	300	30.40	30.29	30.56	30.72	30.37	96.729	91.274
1000	10	31.76	31.69	31.88	31.89	31.69	102.304	91.287
	50	30.55	30.61	30.55	31.14	31.01	99.633	91.234
	100	30.53	30.61	30.84	31.14	30.84	98.038	91.178
	200	30.45	30.44	30.85	31.18	30.40	96.784	91.237
	300	30.28	30.11	30.61	31.07	30.51	95.890	91.076
1200	10	30.03	29.88	30.15	30.79	30.11	100.392	91.422
	50	30.23	29.98	30.42	30.95	30.53	98.147	91.139
	100	30.11	30.02	30.36	30.70	30.38	96.471	90.590
	200	30.17	29.94	30.12	30.72	30.48	95.594	90.834
	300	29.95	29.97	29.95	30.74	30.12	94.774	90.745
1600	10	30.15	30.04	30.49	30.88	30.18	99.721	90.712
	50	30.03	30.03	30.18	30.67	30.38	96.877	90.556
	100	29.95	29.99	30.17	30.40	30.45	95.397	90.316
	200	29.79	29.95	30.04	30.61	30.43	94.565	90.504
	300	30.12	30.19	30.74	30.15	30.29	94.193	91.066
2000	10	30.80	30.81	30.92	31.14	30.87	99.354	91.171
	50	30.40	30.37	30.65	30.74	30.53	96.760	91.232
	100	30.37	29.93	30.40	30.75	30.07	95.112	90.502
	200	30.11	30.27	30.14	30.36	30.19	94.203	90.408
	300	29.97	30.17	29.97	30.40	30.19	93.252	90.321



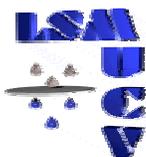
Tabla N° 15. Datos experimentales del disco poroso de 10 μm .

Presión, P (Psig)	Tiempo, t (seg)	Altura del Disco (cm)	Masa del Disco Húmedo, (gr)	Masa del Disco seco, (gr)
0	10	0.6141	48.000	41.498
	20		48.000	
	50		48.000	
	100		48.000	
	150		48.000	
	250		48.000	
	300		48.000	
	350		48.000	
	400		48.000	
1	10	0.6141	47.528	41.498
	20		47.178	
	50		46.689	
	100		46.431	
	150		46.122	
	250		45.711	
	300		45.452	
	350		45.205	
	400		45.001	
2	10	0.6141	47.396	41.498
	20		46.856	
	50		46.504	
	100		45.867	
	150		45.245	
	250		44.521	
	300		44.239	
	350		44.044	
	400		43.878	
3	10	0.6141	46.796	41.498
	20		46.088	
	50		45.478	
	100		44.803	
	150		44.310	
	250		43.802	
	300		43.669	
	350		43.558	
	400		43.451	



**Tabla N° 15. Datos experimentales del disco poroso de 10 μm .
(... Continuación)**

Presión, P (Psig)	Tiempo, t (seg)	Altura del Disco (cm)	Masa del Disco Húmedo, (gr)	Masa del Disco seco, (gr)
4	10	0.6141	47.375	41.498
	20		46.528	
	50		45.530	
	100		44.706	
	150		44.206	
	250		43.790	
	300		43.636	
	350		43.531	
	400		43.396	
20	10	0.6141	45.967	41.498
	20		45.437	
	50		45.034	
	100		44.190	
	150		43.878	
	250		43.527	
	300		43.428	
	350		43.352	
	400		43.271	
25	10	0.6141	45.803	41.498
	20		45.461	
	50		44.929	
	100		44.204	
	150		43.879	
	250		43.474	
	300		43.409	
	350		43.340	
	400		43.258	
30	10	0.6141	45.605	41.498
	20		45.242	
	50		44.492	
	100		43.956	
	150		43.682	
	250		43.357	
	300		43.326	
	350		43.319	
	400		43.304	



**Tabla N° 15. Datos experimentales del disco poroso de 10 μm .
(... Continuación)**

Presión, P (Psig)	Tiempo, t (seg)	Altura del Disco (cm)	Masa del Disco Húmedo, (gr)	Masa del Disco seco, (gr)
50	10	0.6141	45.468	41.498
	20		45.053	
	50		44.341	
	100		43.889	
	150		43.629	
	250		43.348	
	300		43.325	
	350		43.317	
	400		43.277	
100	10	0.6141	45.142	41.498
	20		44.672	
	50		44.151	
	100		43.745	
	150		43.506	
	250		43.214	
	300		43.170	
	350		43.088	
	400		42.992	
150	10	0.6141	45.042	41.498
	20		44.677	
	50		44.146	
	100		43.741	
	150		43.496	
	250		43.202	
	300		43.178	
	350		43.098	
	400		43.018	
200	10	0.6141	44.949	41.498
	20		44.53	
	50		44.106	
	100		43.728	
	150		43.489	
	250		43.198	
	300		43.105	
	350		43.032	
	400		42.985	

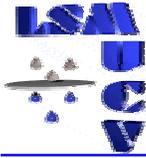


Tabla N° 15. Datos experimentales del disco poroso de 10 μm .
(... Continuación)

Presión, P (Psig)	Tiempo, t (seg)	Altura del Disco (cm)	Masa del Disco Húmedo, (gr)	Masa del Disco seco, (gr)
300	10	0.6141	44.842	41.498
	20		44.562	
	50		44.059	
	100		43.699	
	150		43.481	
	250		43.193	
	300		43.129	
	350		43.061	
	400		42.988	

APENDICE C. Curvas de cinética de drenaje capilar y cálculos tipo

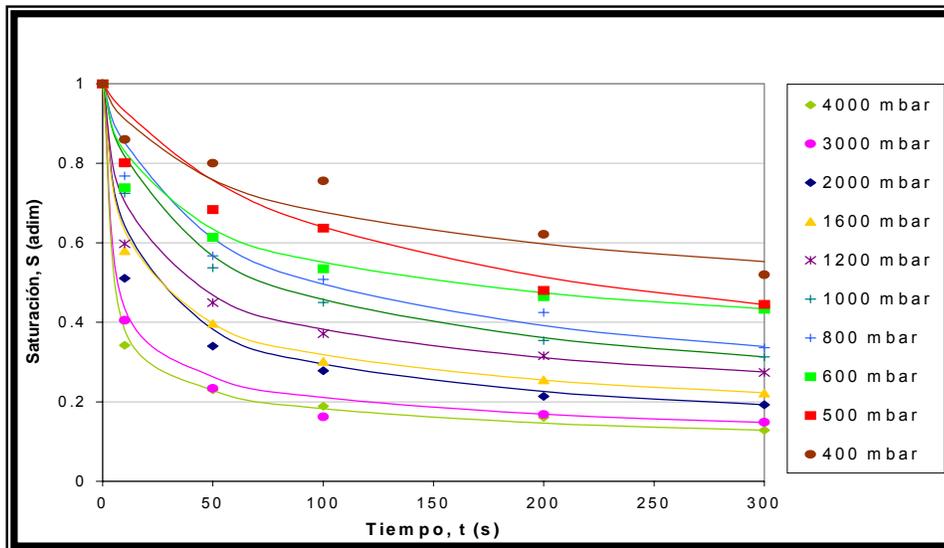


Figura N° 71. Cinética de drenaje capilar para la fracción de Finos

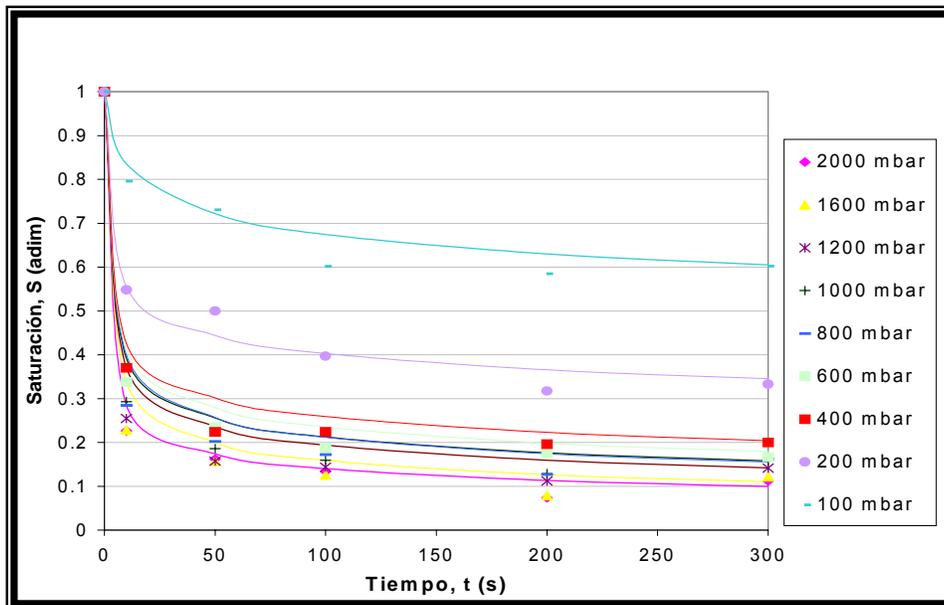


Figura N° 72. Cinética de drenaje capilar para la fracción de Intermedios

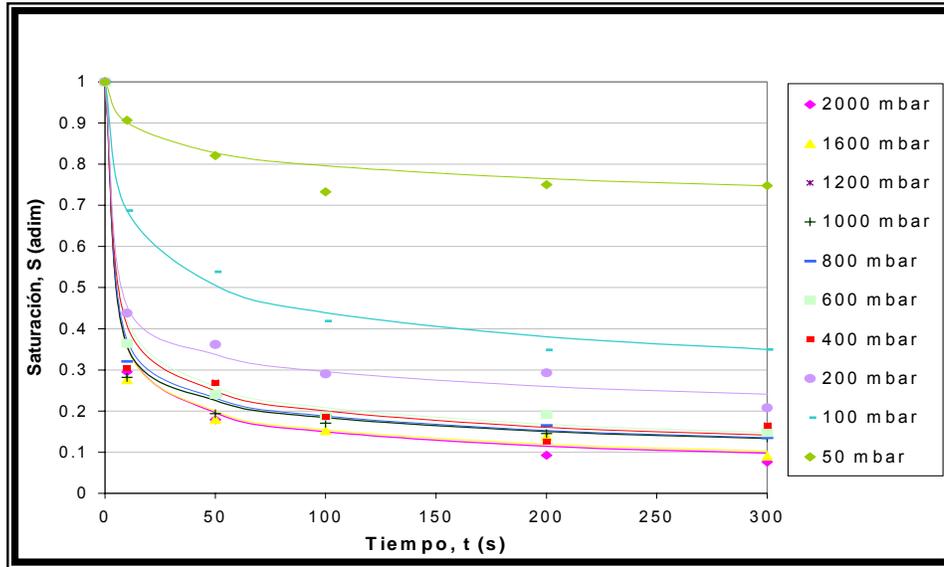
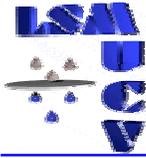


Figura N° 73. Cinética de drenaje capilar para la fracción de Gruesos



Apéndice C – 2. Cálculo tipo para determinar las curvas de cinética de drenaje capilar.

A continuación se describen los cálculos para obtener los valores de saturación experimental y saturación calculada necesarios para construir las curvas de cinética de drenaje.

1. Cálculo de la saturación para Fracción de Finos a una presión de 2000 mbar y un tiempo de deslicorización de 300 seg.

1.1. Cálculo de la humedad final (H).

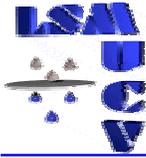
$$H = 0,0603$$

1.2. Cálculo de altura promedio (hc).

$$h_c = 31.328 \text{ mm}$$

1.3. Cálculo de la porosidad (ε).

$$\varepsilon = 0,4747$$



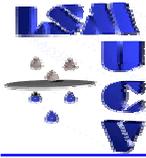
1.4. Cálculo de la saturación (S).

$$S = 0,1923$$

2. Cálculo de la saturación de ajuste para la Fracción de Finos a una presión de 2000 mbar y un tiempo de deslicorización de 300 seg.

Esta saturación para cada uno de los cinco tiempos de drenaje capilar se calculó mediante un ajuste del modelo de Nicolaou, donde con la ayuda de la herramienta solver de Excel, se ajustaron los valores de a y b de la siguiente ecuación:

$$S_{\text{CALC}} = 0,1927$$



Apéndice D. Porosidad de las estructuras porosas No Consolidadas formadas a partir de las granulometrías utilizadas.

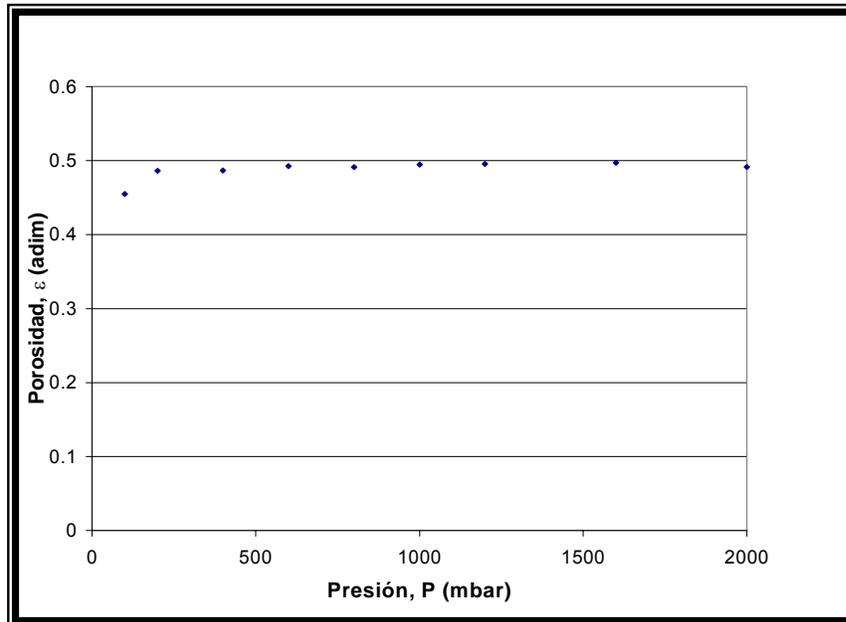


Figura N° 74. Porosidad de la Fracción de Intermedios.

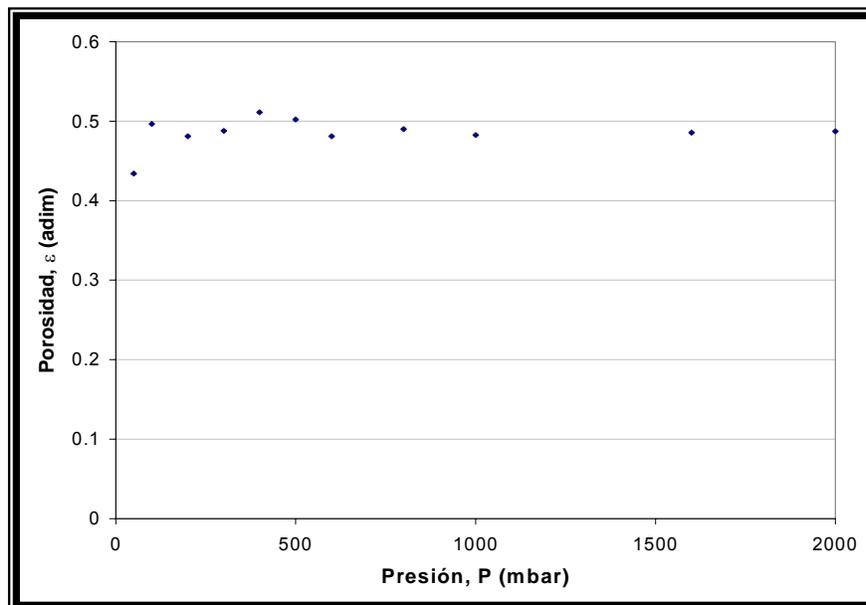


Figura N° 75. Porosidad de la Fracción de Gruesos

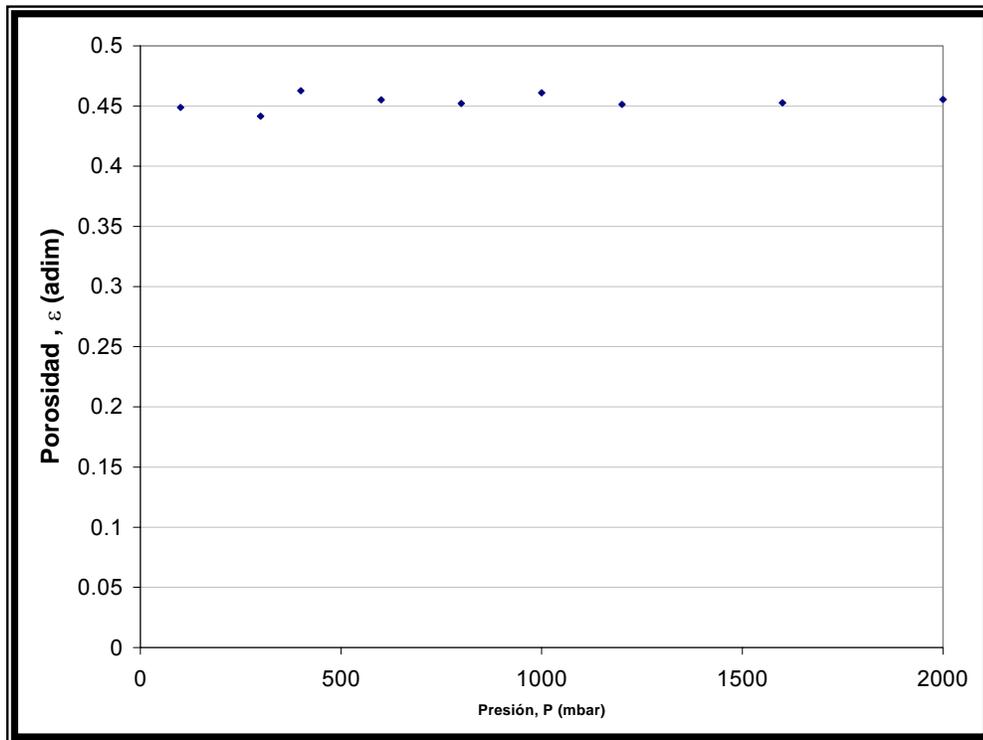
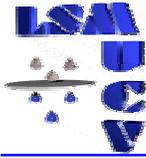
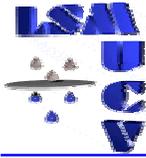


Figura N° 76. Porosidad de la Mezcla.



Apéndice E. Permeabilidad de las estructuras porosas No Consolidadas formadas a partir de las granulometrías utilizadas.

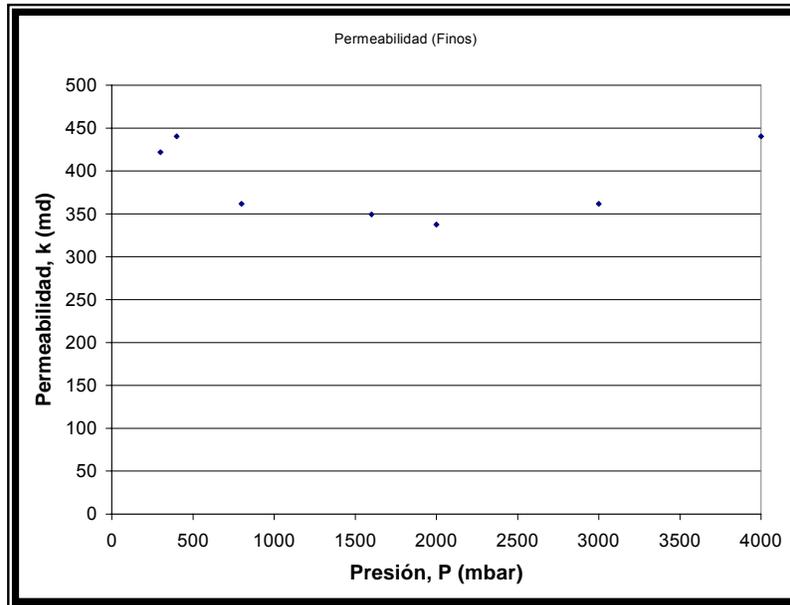


Figura N° 77. Permeabilidad de la Fracción de Finos.

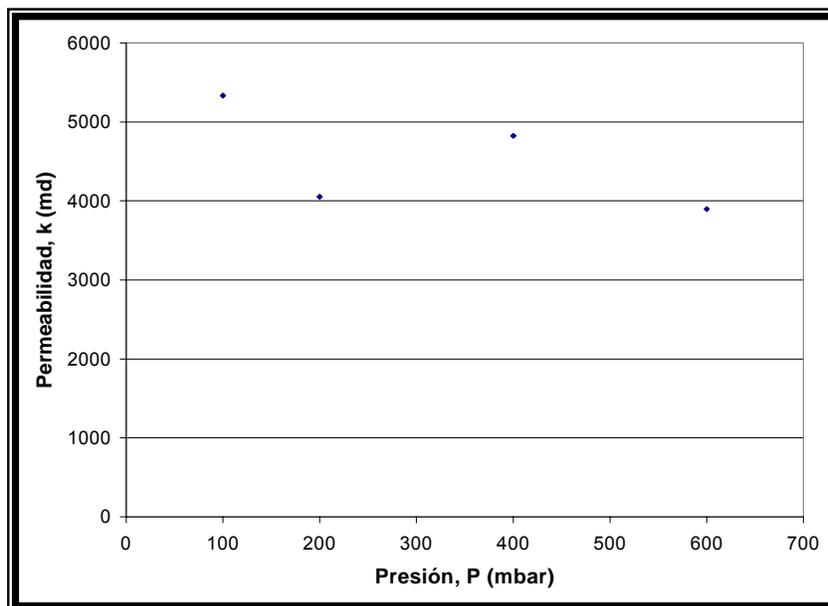


Figura N° 78. Permeabilidad de la fracción de Intermedios.

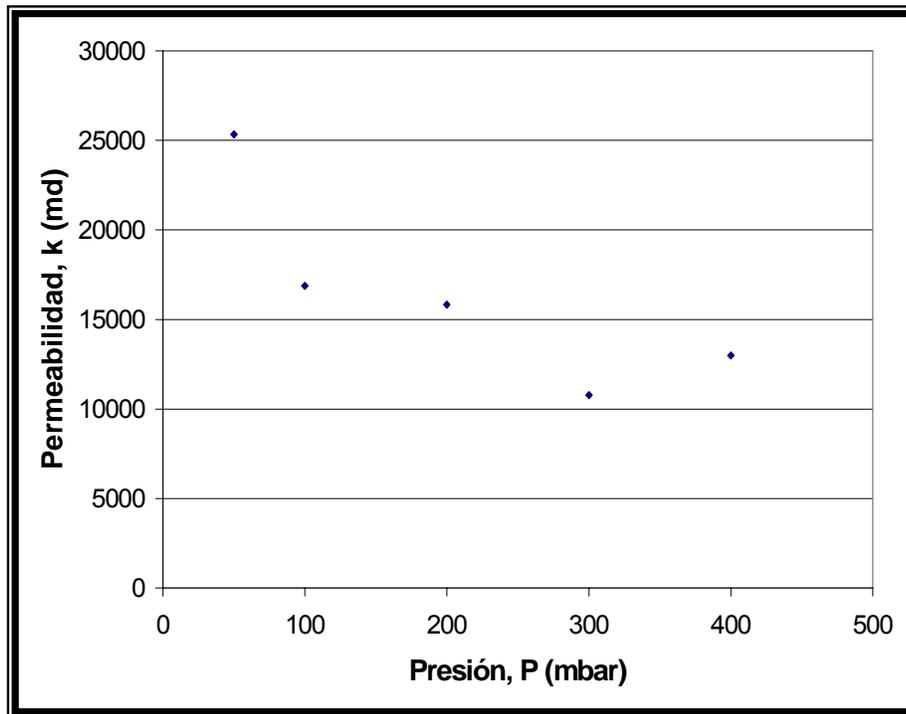
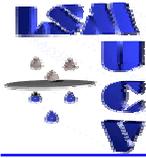


Figura N° 79. Permeabilidad de la fracción de Guesos.

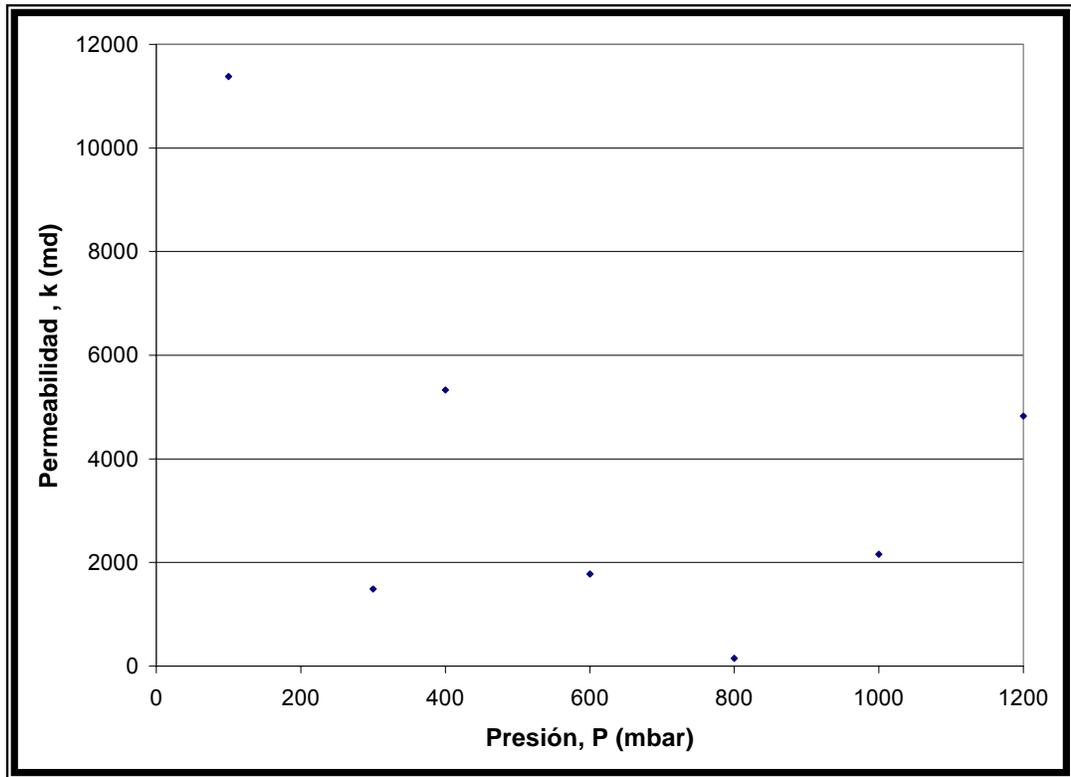
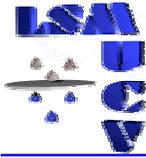
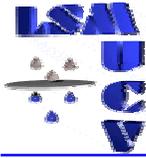


Figura N° 80. Permeabilidad de la Mezcla.



Apéndice F. Distribución de Tamaños de Poro de las estructuras porosas no consolidadas formadas a partir de las granulometrías utilizadas.

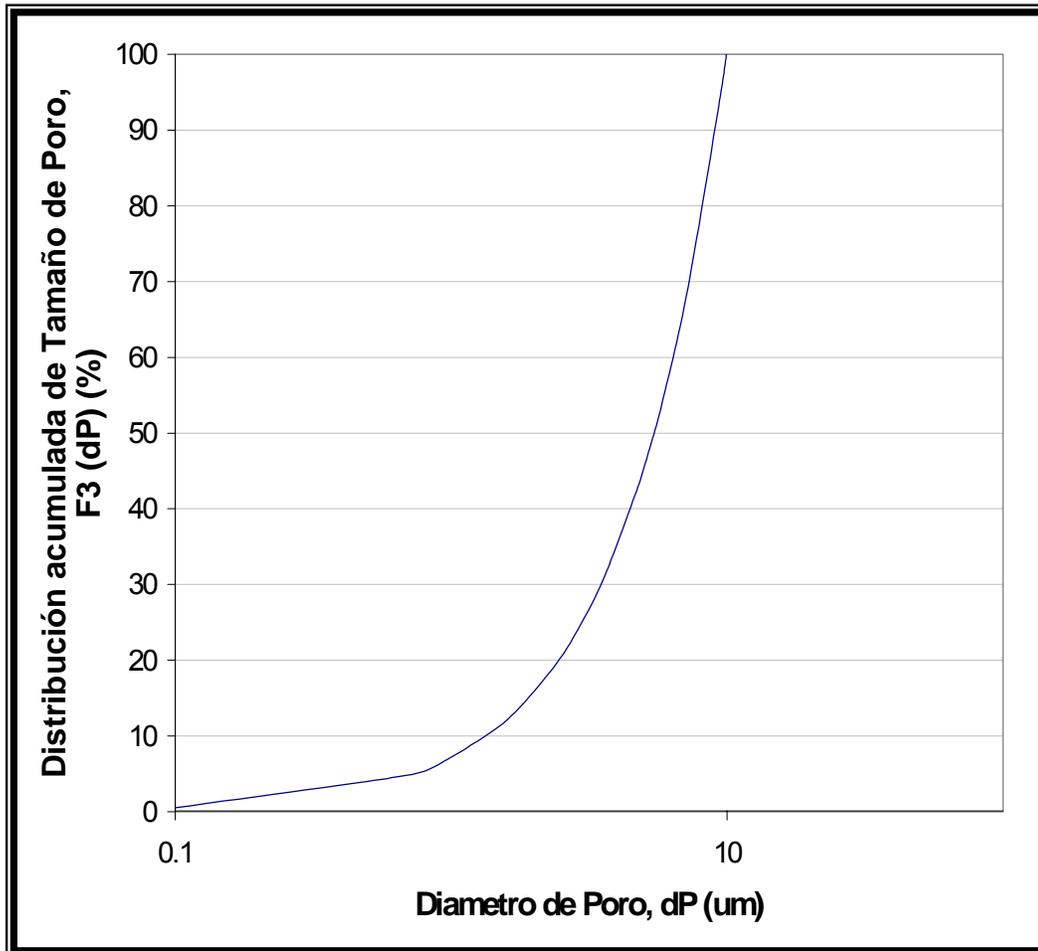


Figura N° 81. Distribución de Tamaño de poro para la Fracción de Finos.

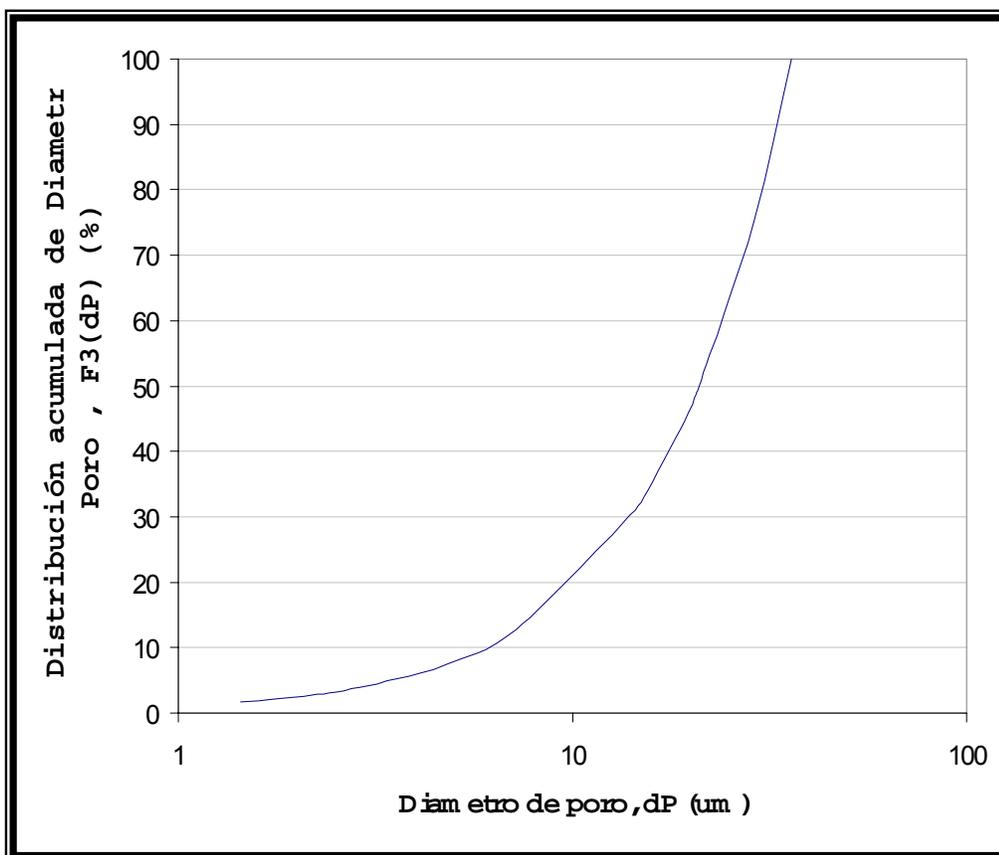


Figura N° 82. Distribución de Tamaño de poro para la Fracción de Intermedios.

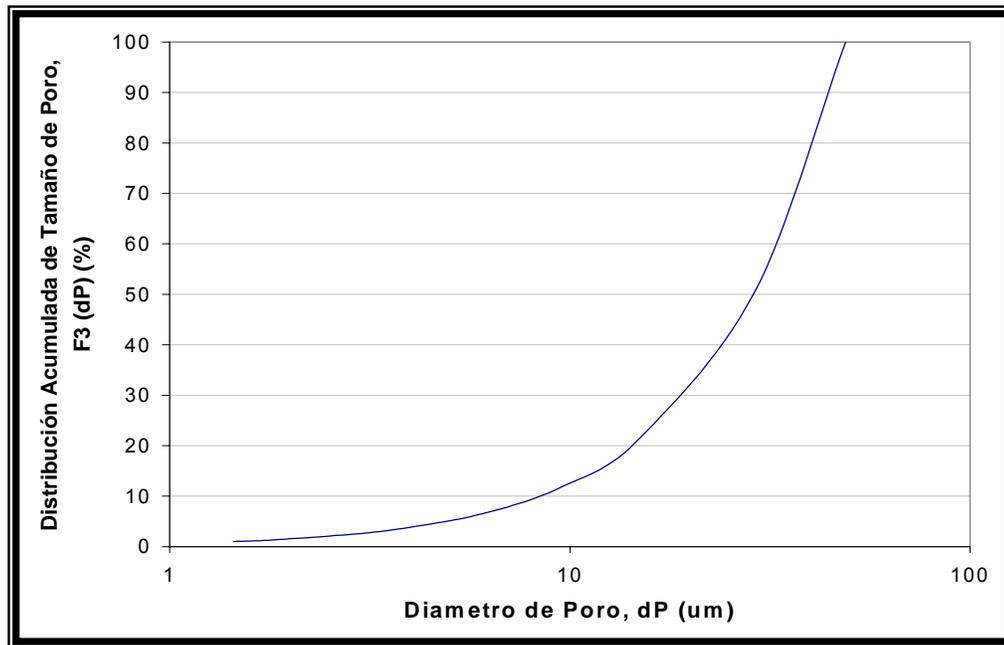
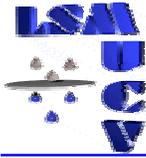


Figura N° 83. Distribución de Tamaño de poro para la Fracción de Gruesos.

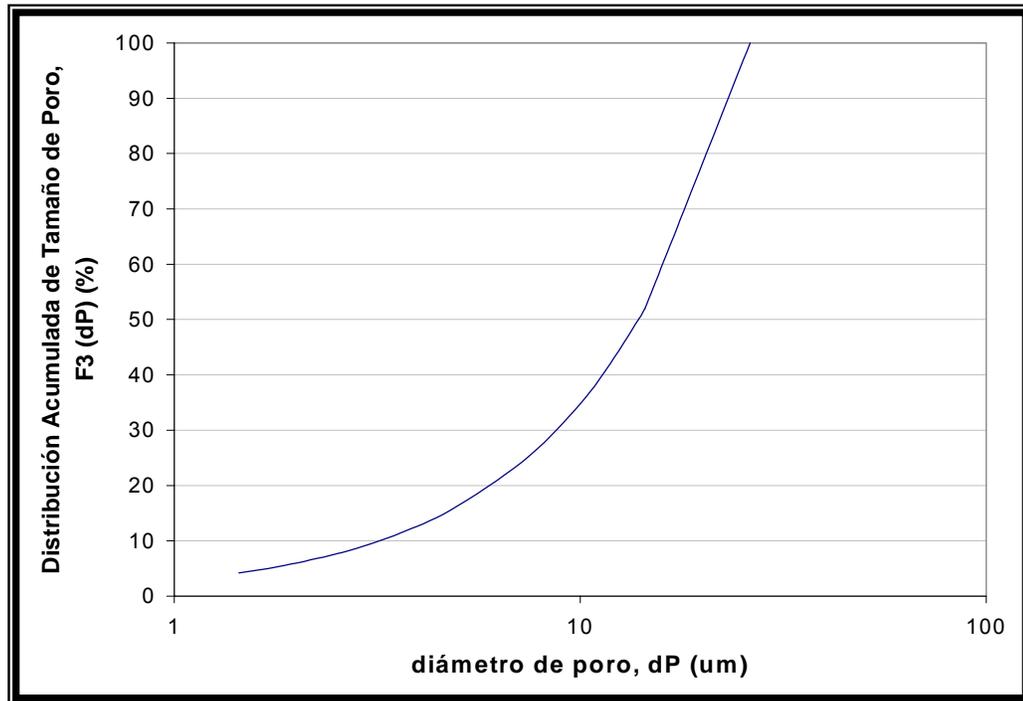
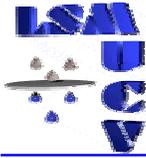
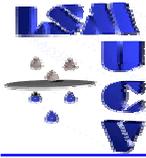


Figura N°84. Distribución de Tamaño de poro para la Mezcla.



Apéndice G. Consumo de Gas de las estructuras porosas No Consolidadas formadas a partir de las granulometrías utilizadas.

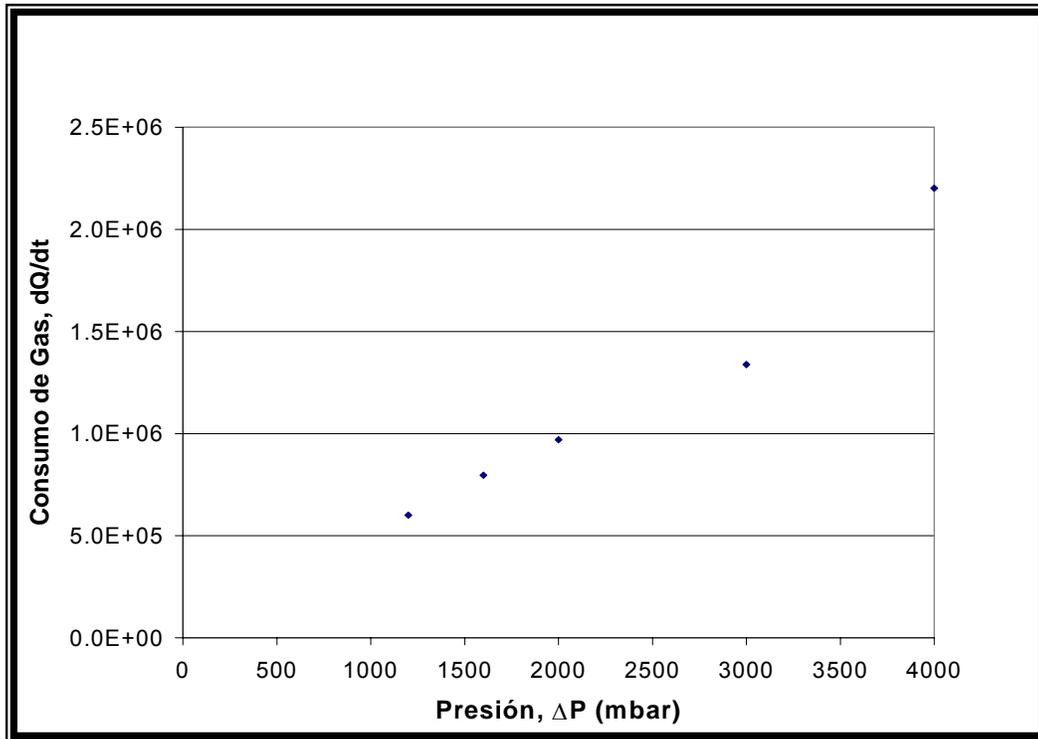


Figura N° 85. Consumo de gas para la Fracción de Finos.

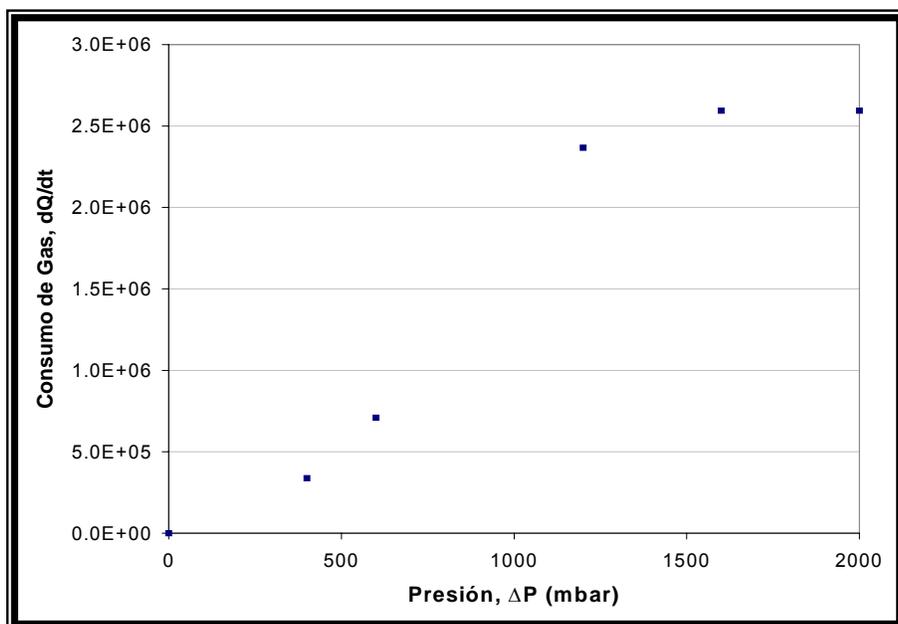


Figura N° 86. Consumo de gas para la Fracción de Intermedios.

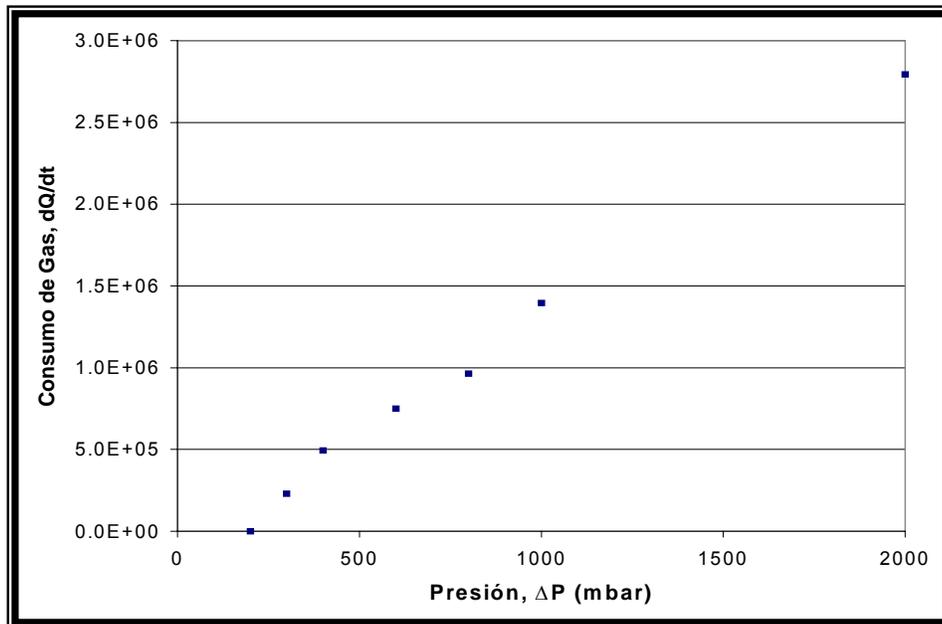
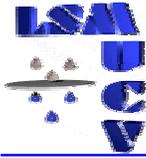


Figura N° 87. Consumo de gas para la Fracción de Gruesos.

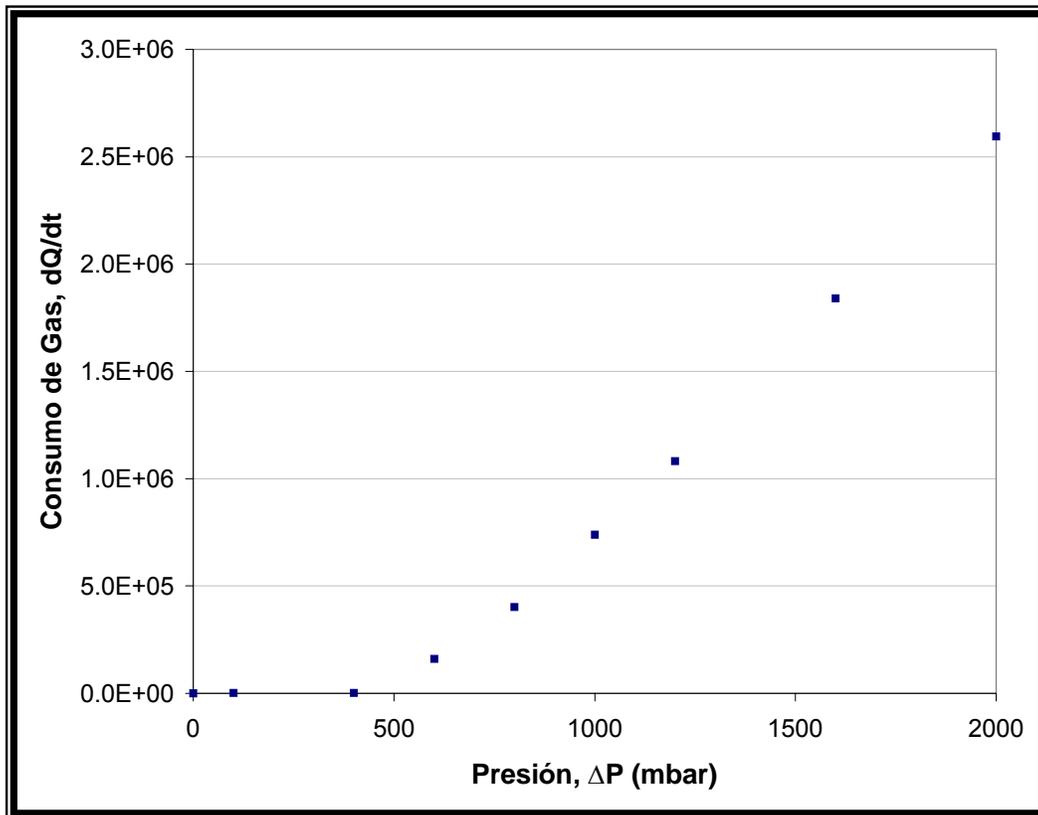
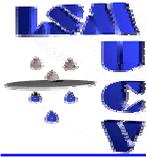
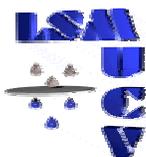


Figura N° 88. Consumo de gas para la Mezcla.



Apéndice H. Parametros de la curva de presión capilar para los dos modelos de ajuste.

Tabla N° 16. Parámetros de la curva de presión capilar para el disco poroso de 10 μm

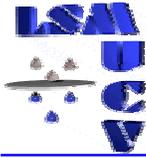
Modelo de los Parámetros Libres			Modelo de Rosin-Rammler		
Pke (psi)	ξ (adim)	Sr (adim)	Pk' (psi)	Sr (adim)	ξ (adim)
3.064	0.4900	0.2813	3.073	0.2766	0.8496

Tabla N° 17. Parámetros de la curva de presión capilar para el Modelo Potencial de todas las granulometrías utilizadas.

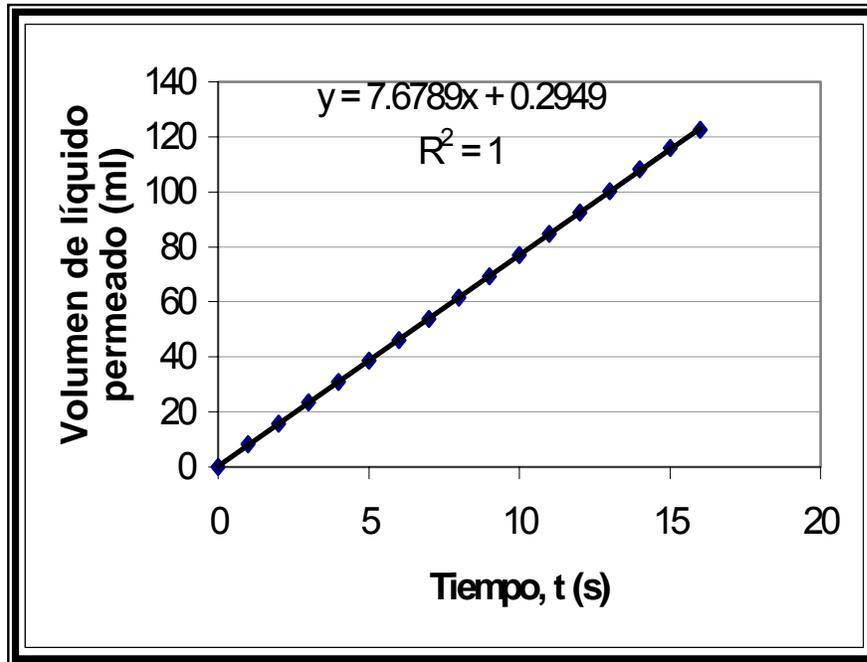
	X_{50}	$D_{3,2}$	DSg	Pke (mbar)	ξ	Sr
Finos	20.20	23.472	1.5186	290	0.8702	0.0977
Intermedios	49.93	48.143	1.3122	80	0.7808	0.0926
Gruesos	67.10	64.658	1.3081	59	0.7666	0.0895
Mezcla	48.90	38.369	1.7544	110	0.9140	0.0964

Tabla N° 18. Parámetros de la curva de presión capilar para el Modelo de Rosin-Rammler Adaptado para todas las granulometrías utilizadas.

	X_{50}	$D_{3,2}$	DSg	Pk' (mbar)	ξ	Sr
Finos	20.20	23.472	1.5186	400	0.7508	0.1044
Intermedios	49.93	48.143	1.3122	99	0.7302	0.1011
Gruesos	67.10	64.658	1.3081	70	0.7148	0.0938
Mezcla	48.90	38.369	1.7544	150	0.8256	0.1016



Apéndice I. Datos necesarios para calcular la porosidad y la permeabilidad del disco



$$dV_L/dt = 7,6789 \text{ cm}^3/\text{s}$$

a partir de la ecuación N° 5 del marco teórico y despejando k se obtiene que

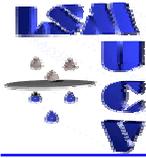


Tabla N° 19. Datos necesarios para calcular la porosidad del disco de 10 μm .

Masa del disco húmedo (g)	47,9182
Masa del disco seco (g)	41,498
Altura o espesor del disco (cm)	0,6141
Diámetro del disco (cm)	6,175
Densidad del sólido (g/cm^3)	3,315