

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**PREDICCIÓN DE LA CINÉTICA DE DESLICORIZACIÓN DE  
TORTAS DE FILTRACIÓN A PARTIR DE LA CURVA DE PRESIÓN  
CAPILAR**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. José A. Sorrentino

Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de  
Venezuela para optar al título  
De Ingeniero Químico  
Por las Brs. Fermín G, María G.,  
Fradique R, Vannesa A

Caracas, Junio 2002

Fermín G, María G.

Fradique R, Vannesa A.

## **PREDICCIÓN DE LA CINÉTICA DE DESLICORIZACIÓN DE TORTAS DE FILTRACIÓN A PARTIR DE LA CURVA DE PRESIÓN CAPILAR**

**Tutor:** Prof. José A. Sorrentino. Tesis. Caracas, U.C.V.

Facultad de

Ingeniería Escuela de Ingeniería Química. Año 2002, 157p.

**Palabras Claves:** Presión Capilar, Saturación, Cinética de deslicorización, Distribución de tamaño de Poro, Porosidad, Permeabilidad, Segregación, Homogeneidad.

**RESUMEN.** Este trabajo especial de grado, tiene por objeto predecir la cinética de deslicorización de tortas de filtración a partir de parámetros básicos estimados, lo cual representa un importante aporte a los estudios que se han desarrollado en el Laboratorio de Separaciones mecánicas de la Universidad Central de Venezuela (LSM-UCV).

En este estudio, se elaboraron pruebas de deslicorización con carbonato de calcio en el equipo filtratest, para obtener de manera experimental las cinéticas de deslicorización de la sustancia en estudio, para ello se prepararon tortas de filtrado por dos mecanismos, por capas y segregadas, y estas se realizaron a tres mezclas que presentaron diferentes tamaños promedios de partículas, y desviación estándar similar, para cada presión seleccionada se construyó una curva de cinética de deslicorización en intervalos de tiempo desde 10 s hasta 300s.

Una vez conocidas las cinéticas de deslicorización, se construyeron las curvas de presión capilar, correspondiente a cada mezcla y forma de preparar la torta. Estas se elaboraron a partir de la saturación infinita en un tiempo de 300 s (calculada por el método de Nicolaou), cada una de ellas relacionada a una presión de deslicorización, que en general fue desde 100 mbar hasta 4000 mbar,

estas curvas de presión capilar se ajustaron a través del modelo potencial y el modelo de Rosín Rammler, resultando este último como el mejor ajuste a los datos experimentales.

Para la predicción de la cinética de deslicorización se estudiaron y/o programaron los modelos de Schubert modificado (con solución por series, y solución por Runge-Kutta (R-K)), el de Wakeman y el de perfil de saturaciones de Nicolaou; de acuerdo a los resultados obtenidos, se enfocó el estudio a través del modelo de Schubert modificado con solución por R-K, ya que este presentaba mayor similitud con las curvas de cinética de deslicorización obtenidas experimentalmente. Estos modelos pueden ser usados contando con información experimental de la curva de presión capilar de la sustancia en estudio.

Otra fase muy importante de este estudio, consistió en obtener información básica estimada de la curva de presión capilar, estos datos pueden ser obtenidos con información de la distribución de tamaño de partícula (DTP) de las mezclas de carbonato de calcio seleccionadas, con esta información disponible, usando los diagramas propuestos por Sorrentino (2002), el modelo de Yu Standish, y los diagramas propuestos por Rojas (2002), se obtiene la información necesaria para hacer uso de los modelos de predicción de cinética de deslicorización.

Luego de obtener las cinéticas de deslicorización, se elaboró un análisis comparativo entre las predicciones a partir de parámetros experimentales y los parámetros estimados, obteniendo una similitud significativa entre ambos resultados, con excepción de la saturación reducida ( $S_r$ ), que fue el parámetro que presentó mayor desviación con respecto al valor real.

Con este trabajo se determinó, que la estimación de los parámetros de la curva de presión capilar, es una herramienta de utilidad para describir el comportamiento de la cinética de deslicorización.

Índice General

1 Planteamiento del problema.....	1
2 Objetivos.....	3
2.1 General.....	3
2.2 Específicos.....	3
3 Marco Teórico.....	5
3.1 Caracterización de Sistemas particulados.....	5
3.1.1 Tamaño de Partícula.....	5
3.1.2 Análisis del tamaño de partícula.....	6
3.1.3 Cantidad de Partículas.....	7
3.1.4 Representación de la distribución de tamaño de partículas.....	8
3.1.4.1 Curva de distribución de frecuencia acumulada.....	8
3.1.4.2 Curva de densidad de distribución.....	9
3.1.5 Tipos de distribución de tamaño de partículas.....	10
3.1.6 Medidas de tendencia central.....	11
3.1.6.1 Media.....	12
3.1.6.2 Mediana.....	13
3.1.6.3 Moda.....	13
3.1.6.4 Desviación estándar y Varianza.....	13
3.2 Filtración.....	14
3.2.1 Clasificación de filtración.....	15
3.2.2 Formación de la torta.....	16
3.2.3 Deslicorización.....	17
3.2.3.1 Humedad y Saturación.....	19
3.2.3.2 Permeabilidad relativa de medios porosos.....	22
3.2.4 Porosidad.....	23
3.2.4.1 Modelo de empaquetamiento lineal de Yu.....	23
3.3 Presión Capilar.....	29
3.3.1 Curva de Presión Capilar.....	30
3.3.2 Modelo de la curva de presión capilar.....	33
3.4 Cinética de Deslicorización.....	38

3.4.1 Modelos de cinética de deslicorización.....	43
3.4.1.1 Modelo de Schubert.....	43
3.4.1.2 Modelo de deslicorización con perfil de saturaciones.....	44
3.4.1.3 Modelo de Wakeman.....	51
4 Antecedentes.....	53
5 Descripción de equipos.....	58
5.1 Tamizador oscilatorio.....	58
5.2 Clasificador centrífugo zigzag.....	59
5.3 Filtratest-UCV.....	60
5.4 Mastersizer.....	62
5.5 Micrómetro.....	63
5.6 Balanza con secador infrarrojo.....	64
5.7 Divisor de Muestras PT 1000.....	65
6 Metodología.....	66
7 Plan de experiencias.....	70
8 Análisis de Datos.....	73
8.1 Análisis Granulométrico.....	73
8.1.1 Distribución de tamaño de partículas para fracciones puras.....	73
8.1.2 Distribución de tamaño de partículas para las mezclas.....	74
8.1.2.1 Distribución de tamaño de partículas para mezclas diseñadas.....	75
8.2 Obtención de datos para curvas de cinética de deslicorización y presión capilar.....	75
8.3 Obtención de los parámetros requeridos por los modelos de cinética de deslicorización.....	78
8.4 Modelos de cinética de deslicorización.....	79
9 Discusión de resultados.....	80
9.1 Cinética de deslicorización.....	80
9.2 Curva de presión capilar.....	82
9.2.1 Estimación de los parámetros de la curva de presión capilar....	82
9.2.1.1 Modelo A: Potencial.....	82

9.2.1.2 Modelo B: Rosin-Rammler.....	86
9.2.2 Predicción de los parámetros de la curva de presión capilar.....	89
9.3 Modelos de Cinética de deslicorización.....	94
9.3.1 Mezcla de 15.....	94
9.3.2 Mezcla de 30.....	95
9.3.3 Mezcla de 80.....	97
9.4 Modelo Schubert.....	98
9.5 Modelo de Nicolaou o Perfil de Saturaciones.....	99
9.6 Modelo de Wakeman.....	99
9.7 Modelo de Schubert a partir de información básica estimada.....	100
10 Conclusiones.....	104
11 Recomendaciones.....	106
12 Bibliografía.....	107
13 Apéndices.....	109
Apéndice A. Análisis Granulométrico.....	109
Apéndice A-1 Datos obtenidos en el equipo de difracción láser para las fracciones seleccionadas.....	109
Apéndice A-2 Datos obtenidos en el equipo de difracción láser para las mezclas diseñadas.....	111
Apéndice A-3 Procedimiento experimental para la realización de tortas de filtración por capas y por sedimentación.....	112
Apéndice B. Valores experimentales de las pruebas de cinética de deslicorización y presión capilar.....	114
Apéndice C. Curvas de cinética de deslicorización y cálculos tipo.....	131
Apéndice C-1 Curvas de cinética de deslicorización para las mezclas diseñadas.....	131
Apéndice C-2 Cálculos tipo para determinar las curvas de cinética de deslicorización.....	133
Apéndice D. Curvas de presión capilar y cálculos tipo.....	135
Apéndice D-1 Curvas de presión capilar para las mezclas diseñadas empleando el modelo A.....	135

Apéndice D-2 Curvas de presión capilar para las mezclas diseñadas empleando el modelo B.....	137
Apéndice D-3 Curvas de presión capilar usando parámetros básicos estimados por el método de Sorrentino.....	139
Apéndice D-4 Cálculos tipo para determinar las curvas de presión capilar.....	141
Apéndice E. Resultados y cálculos tipo de porosidad por el método de Yu Standish.....	144
Apéndice F. Resultados de permeabilidad.....	150
Apéndice G. Modelos de cinética de deslicorización a partir de información básica experimental.....	152

## Índice de Figuras

Figura N° 1 Distribución acumulada.....	9
Figura N° 2 Densidad de distribución.....	9
Figura N° 3 Forma de las diferentes distribuciones.....	11
Figura N° 4 Medidas de tendencia central.....	11
Figura N° 5 Proceso de filtración.....	16
Figura N° 6 Deslicorización de tortas por inyección a gas.....	18
Figura N° 7 Formas de retención de líquido en una torta.....	19
Figura N° 8 Porosidad inicial Vs. tamaño de partícula para alúmina.....	26
Figura N° 9 Empaquetamiento de mezcla binaria para el par 8-11.....	27
Figura N° 10 Relación entre $r_{ij}$ y $R_{ij}$ para las dos formas de empaquetamiento.....	28
Figura N° 11 Modelo estructural sencillo de tubos capilares de diferentes tamaños.....	31
Figura N° 12 Curva típica de presión capilar.....	33
Figura N° 13 Determinación de los parámetros de la curva de presión capilar según Nicolaou.....	34
Figura N° 14 Correlación de datos de presión capilar usando el grupo de Carman.....	36
Figura N° 15 Influencia de la desviación estándar geométrica en el parámetro de distribución de tamaño de poro.....	37
Figura N° 16 Saturación reducida como función del tamaño de partícula	
Figura N° 17 Cinética de deslicorización.....	38
Figura N° 18 Relación entre las curvas que representan el proceso de deslicorización.....	39
Figura N° 19 Dependencia de la permeabilidad relativa con la cantidad de líquido.....	40
Figura N° 20 Cinética de deslicorización en la torta modelo.....	41
Figura N° 21 Esquematización de una matriz del nivel de líquido ficticio.....	46
Figura N° 22 Tamizador Oscilatorio.....	49
Figura N° 23 Clasificador zigzag.....	58

---

Figura N° 24 Filtratest-UCV.....	61
Figura N° 25 Sistema de piezas del Filtratest-UCV.....	61
Figura N° 26 Mastersizer 2000.....	63
Figura N° 27 Micrómetro.....	63
Figura N° 28 Balanza con desecador infrarrojo.....	64
Figura N° 29 Divisor de muestras.....	65
Figura N° 30 Metodología.....	69
Figura N° 31 Distribución de frecuencia acumulada de las fracciones.....	74
Figura N° 32 Curva de frecuencia acumulada de las mezclas diseñadas.....	75
Figura N° 33 Curvas de cinética de deslicorización para la mezcla amplia de 30 homogénea .....	81
Figura N° 34 Curve de cinética de deslicorización para la mezcla amplia de 30 segregada .....	81
Figura N° 35 Curvas de presión capilar para mezcla de 30 homogénea empleando el modelo A con parámetros básicos experimentales.....	83
Figura N° 36 Curvas de presión capilar para la mezcla amplia de 30 segregada empleando el modelo A con parámetros básicos experimentales...	84
Figura N° 37 Curvas de presión capilar para la mezcla amplia de 30 homogénea empleando el modelo B con parámetros básicos experimentales.	87
Figura N° 38 Curvas de presión capilar para la mezcla amplia de 30 Segregada empleando el modelo B con parámetros básicos experimentales...	87
Figura N° 39 Curvas de presión capilar para la mezcla amplia de 30 homogénea empleando el modelo B con parámetros básicos estimados.....	91
Figura N° 40 Curvas de presión capilar para la mezcla amplia de 30 segregada empleando el modelo B con parámetros básicos estimados.....	92
Figura N° 41 Modelo de cinética de deslicorización para la mezcla de 15 sedimentada a 800 mbar de presión.....	94
Figura N° 42 Modelo de cinética de deslicorización para la mezcla de 15 sedimentada a 600 mbar de presión.....	95
Figura N° 43 Modelo de cinética de deslicorización para la mezcla amplia de 30 sedimentada para el ajuste potencial a 600 mbar.....	96

Figura N° 44 Modelo de cinética de deslicorización para la mezcla amplia de 80 sedimentada para el ajuste potencial a 800 mbar.....	97
Figura N° 45 Modelo de Schubert, mismas características de torta a diferentes presiones.....	98
Figura N° 46 Modelo de Schubert con parámetros estimados y diferentes presiones.....	100
Figura N° 47 Cinética de deslicorización a partir de parámetros estimados y parámetros estimados con $S_r$ exp para la mezcla 30-sed a 2000 mbar.....	101
Figura N° 48 Cinética de deslicorización a partir de parámetros estimados y parámetros estimados con $S_r$ exp para la mezcla 30-sed a 2000 mbar.....	102
Figura N° 49 Curvas de Pk a partir de parámetros estimados y estimados con $S_r$ experimental empleando el modelo B para la mezcla de 30-sed.....	103
Figura N° 50 Curvas de Pk a partir de parámetros estimados y estimados con $S_r$ experimental empleando el modelo B para la mezcla de 30-sed.....	103

## Índice de Tablas

Tabla N° 1 Método de análisis de tamaño de partícula.....	7
Tabla N° 2 Tipo de distribución de tamaño.....	10
Tabla N° 3 Tipo de medias.....	12
Tabla N° 4 Parámetros de la ecuación (30) para las dos formas de empaquetamiento.....	27
Tabla N° 5 Parámetro de la ecuación (28) para ambos sistemas de empaquetamiento.....	28
Tabla N° 6 Parámetros de la curva de presión capilar para tortas de filtración homogéneas por el ajuste potencial.....	84
Tabla N° 7 Parámetros de la curva de presión capilar para tortas de filtración segregadas por el ajuste potencial.....	85
Tabla N° 8 Parámetros de la curva de presión capilar para tortas de filtración homogéneas por el ajuste Rosin-Rammler.....	88
Tabla N° 9 Parámetros de la curva de presión capilar para tortas de filtración segregadas por el ajuste Rosin-Rammler.....	88
Tabla N° 10 Parámetros estimado por correlación del ajuste por Rosin-Rammler con el ajuste potencial según Sorrentino para tortas homogéneas....	90
Tabla N° 11 Parámetros estimado por correlación del ajuste por Rosin-Rammler con el ajuste potencial según Sorrentino para tortas segregadas.....	90
Tabla N° 12 Parámetros básicos estimados por Sorrentino a partir de información granulométrica en tortas homogéneas.....	92
Tabla N° 13 Parámetros básicos estimados por Sorrentino a partir de información granulométrica en tortas segregadas.....	93
Tabla N° 14 Porosidad de las mezclas estudiadas.....	93

**SÍMBOLOS LATINOS**

$a$	: Constante del modelo de Yu-Standish (adim)
$b$	: Constante del modelo de Yu-Standish (adim)
$C$	: Constante de la ecuación de Carman-Kozeny (adim)
$f(r_{i,j})$	: Función de iteración del modelo de Yu-Standish (adim)
$f(x)$	: Función de densidad de distribución (%)
$f_0$	: Función de densidad de distribución por número de partículas (%)
$f_1$	: Función de densidad de distribución por longitud de partículas (%)
$f_2$	: Función de densidad de distribución por área o superficie de partículas (%)
$f_3$	: Función de densidad de distribución por volumen o masa de partículas (%)
$F_{Vi}$	: Fracción volumétrica de cada pseudo componente dentro de la mezcla (adim)
$F(x)$	: Función de distribución acumulada de partículas (%)
$F_0$	: Función de distribución acumulada por número de partículas (%)
$F_1$	: Función de distribución acumulada por longitud de partículas (%)
$F_2$	: Función de distribución acumulada por área o superficie de partículas (%)
$F_3$	: Función de distribución acumulada por masa o volumen de partículas (%)
$g_k(x)$	: Función para determinar la media de tamaño de partícula ( $\mu\text{m}$ )
$g(r_{i,j})$	: Función de iteración del modelo de Yu-Standish (adim)
$h_c$	: Altura de la torta (m)
$i, j$	: Sub-índices de los pseudo componentes de una mezcla (adim)
$K$	: Permeabilidad ( $\mu\text{m}^2$ )
$m_s$	: Masa de torta seca (gr)
$m_{SP}$	: Masa de la torta seca y masa del plato juntas (gr)
$m_P$	: Masa del plato (gr)

$P$	: Exponente constante del modelo de Yu-Standish (adim)
$r_H$	: Radio hidráulico (m)
$r_{i,j}$	: Razón de tamaño de empaque equivalente (adim)
$Re$	: Número de Reynolds
$R_{i,j}$	: Razón de tamaño volumétrico (adim)
$t$	: Tiempo de filtración (s)
$V_i^T$	: Volumen específico de empaque individual cada pseudo componente ( $m^3/m^3$ )
$V_i$	: Volumen específico individual de cada pseudo componente ( $m^3/m^3$ )
$V_P$	: Volumen vacío de la torta o volumen de poros ( $m^3$ )
$V_S$	: Volumen de sólidos ( $m^3$ )
$V_T$	: Volumen total de la torta ( $m^3$ )
$x$	: Tamaño de partícula ( $\mu m$ )
$x_{SV}$	: Diámetro de Sauter o diámetro superficie-volumen ( $\mu m$ )
$x_{50}$	: Mediana de una distribución de tamaño de partículas ( $\mu m$ )

### SÍMBOLOS GRIEGOS

$\Delta P$	: Diferencia de presión total (Pa)
$\varepsilon$	: Porosidad (adim)
$\varepsilon_i$	: Porosidad individual de cada pseudo componente (adim)
$\varepsilon_0$	: Constante del modelo de Yu-Standish (adim)
$\varphi(\varepsilon)$	: Función de la porosidad (adim)
$\mu_L$	: Viscosidad dinámica del filtrado (Pa.s)
$\rho_S$	: Densidad del sólido ( $Kg/m^3$ )
$\sigma$	: Desviación estándar (adim)
$\psi_{i,j}$	: Factor de forma entre dos diámetros equivalentes (adim)

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los procesos de separación mecánica Líquido- sólido, en especial filtración y sedimentación, son mecanismos de gran utilidad en el campo industrial, es por ello el gran interés del LSM en estudiar dichos procesos, con la finalidad de reducir la cantidad de datos, que permita acumular información.

En los últimos años se han desarrollado en el Laboratorio de Separaciones Mecánicas de la Universidad Central de Venezuela, diversos trabajos que han permitido desarrollar un grupo de herramientas útiles, para la estimación de las propiedades de las tortas de filtración, tales como porosidad, permeabilidad y curva de presión capilar.

Los recientes trabajos realizados bajo la dirección de Sorrentino (2002) en el LSM, han permitido avanzar en la estimación de las propiedades anteriormente mencionadas, fundamentadas en las características del colectivo de partículas que la constituyen, lo cual permite que variables medibles antes de formar la torta puedan ser usadas para predecir el comportamiento de la misma. Se ha introducido el uso del gráfico de permeabilidad- porosidad para reducir la información experimental y aislar el efecto de la distribución de tamaño de partículas (Sorrentino y Anlauf,2000), así como una estrategia de reducción de información para correlacionar la información sobre la cinética de deslicorización (Sorrentino y Anlauf, 2001). El uso de la función de distribución de Rosín-Rammler para describir la curva de presión capilar ha sido introducido por Sorrentino (2002), en lugar de la función potencial, que venía siendo usada en los trabajos anteriores relacionados con el tema, lo que pretende simplificar y mejorar el uso de estos resultados; esta función permite analizar la información de la curva de presión capilar y correlacionar el parámetro de distribución de tamaño de poro con la desviación estándar de la distribución de tamaño de partícula.

El principal propósito de este trabajo, es entonces, determinar experimentalmente la cinética de deslicorización y la curva de presión capilar de tortas, formadas por filtración de suspensiones de carbonato de calcio de diferentes tamaños de partículas, empleando mezclas de partículas en el rango de 5 a 125  $\mu\text{m}$ ,

a fin de establecer comparaciones con las predicciones realizadas mediante el uso de diversos modelos cinéticos existentes, si los parámetros requeridos por dichos modelos son estimados usando la estrategia de reducción de información propuesta por Sorrentino (2002).

## 2. OBJETIVOS

### GENERAL

Comparar la cinética de deslicorización de tortas de filtración obtenida experimentalmente con las predicciones hechas con los modelos existentes para simular el fenómeno cuando las características de la torta requeridas (permeabilidad, porosidad y capilaridad) se estiman usando la técnica propuesta por Sorrentino para reducir la información.

### ESPECÍFICOS

- Preparar las mezclas de partículas con diferentes características granulométricas que permitan someter a prueba los modelos de reducción de datos desarrollados en el LSM para correlacionar resultados de curva de presión capilar y de cinética de deslicorización.
- Manejar la hoja de cálculo Excel ® “Diseño de Mezclas” del LSM-UCV, que contiene la programación para la preparación de mezclas.
- Manipular adecuadamente los equipos en los cuales se llevarán a cabo las experiencias tales como el Filtratest –UCV, Micrómetro, Balanza con secador infrarrojo, clasificador centrífugo, tamizador, Mastersizer 2000 y el difusor de muestras PT 1000.
- Determinar experimentalmente la porosidad, la permeabilidad, la curva de presión capilar y la cinética de deslicorización de las tortas formadas con las mezclas de partículas seleccionadas.
- Determinar los parámetros de la curva de presión capilar usando tanto el modelo potencial de ajuste de datos como la ecuación de Rosin-Rammler.
- Preparar la programación de modelos existentes para describir o simular la cinética de deslicorización de torta de filtración, tanto para datos experimentales como para datos predichos a través de la estrategia de reducción de información propuesta por Sorrentino.

- Comparar los resultados experimentales de reducción de humedad en función del tiempo con las estimaciones hechas a partir de la predicción de la permeabilidad, la porosidad y de la curva de presión capilar.

### 3 MARCO TEÓRICO

#### 3.1 CARACTERIZACIÓN DE SISTEMAS PARTICULADOS.

##### 3.1.1 Tamaño de partícula.

Las partículas pueden variar desde muy finas o material coloidal hasta gránulos sólidos. Algunas veces todos los sólidos pueden ser del mismo material, por ejemplo una composición homogénea o, como en el caso de las suspensiones de efluentes, las partículas individuales pueden ser de composiciones diferentes. En general el tamaño de partículas afecta el comportamiento de la suspensión, en la separación sólido-líquido. [Wakeman, 1999]

En la separación sólido-líquido existen cuatro razones para la medición del tamaño de partículas:

- Para medir y especificar la calidad del líquido el cual es el producto valorable del proceso de filtración. En este caso las partículas remanentes en suspensión están diluidas en concentración, y son difíciles de filtrar. Frecuentemente solo el total de la concentración de sólidos es requerida, como por ejemplo en procesos de tratamientos de agua. Así como, en operaciones tales como la filtración de fluidos hidráulicos, el tamaño y ocasionalmente la forma del sólido remanente es crítica. A veces se requiere el conteo de partículas como parámetro de calidad.
- Una extensión de este requerimiento, es para especificar el desempeño del medio filtrante en términos de su habilidad de retener partículas de diferentes tamaños. Este tipo de evaluación es usualmente asociado con fluidos de operaciones de pulimento y la especificación del tamaño nominal del poro para el medio de pulimento, o con la evaluación del desempeño de equipos de separación como centrífugas de sedimentación.
- En muchas operaciones el sólido es el producto valorable. Este es raramente recuperado en estado completamente seco, y es frecuentemente procesado posteriormente. La evaluación de este producto es requerida para el control de

calidad y no es solamente con el proceso de separación. En este caso el método de evaluación es frecuentemente determinado por el consumidor o por los estándares aceptados por la industria particular.

- Ocasionalmente, como el caso en estudio, el requerimiento es para evaluar el sólido a fin de predecir su probable comportamiento en procesos de separación. Esto puede ser para permitir una decisión inicial entre diferentes métodos de separación para seleccionar o probar un proceso de pre-tratamiento apropiado o un medio filtrante, para mejorar la eficiencia de una máquina existente o para estimar el tamaño de una nueva. En alguno de estos casos el objetivo es predictivo, y la técnica de medición debe ser seleccionada más cuidadosamente.

### **3.1.2 Análisis del tamaño de partícula.**

Diversos métodos están disponibles para la medición del tamaño de partículas, como por ejemplo inspección microscópica, tamizado, sedimentación y difracción láser. Generalmente el resultado obtenido dependerá del método de medición, a partir de diferentes dimensiones que están envueltas en distintos métodos. Para partículas de forma irregular es común usar el tamaño de partículas equivalentes las cuales poseen la misma propiedad que la partícula de interés, por ejemplo el uso de diámetro proyectado (microscopio) o área, en estudio de pigmentos o pinturas; los diámetros basados en determinación de áreas de superficie pueden tener relevancia en reacciones químicas involucrando sólidos, tales como catálisis y adsorción. [Wakeman, 1999]

Algunos de los métodos más comunes están expuestos en la Tabla 1 y se clasifican en directos o indirectos. Los primeros son métodos donde cada partícula es puesta en un calibrador y los siguientes son métodos donde la comparación está basada en propiedades de la partícula.

Tabla N°1: Método de análisis de tamaño de partícula

	Técnica	Rango de tamaño aprox. $\mu\text{m}$	Diámetro medido
<b>Directos</b>			
Revisión de área	Microscopio	1-100	Largo, área proyectada, diámetros estadísticos
	Microscopio electrónico	0.001-5	
	Scanning electron microscope	0.1-5	
	Tamices	45-1000 <sup>+</sup>	Tamaño de malla
<b>Indirectos</b>			
Sedimentación	Sedigrafía / Pipeta Andreasen	2-60	Diámetro de Stokes
	Centrifuga fotosedimentadora	0.5-5	
Revisión de flujo	Electro Sensing (Coulter)®	0.5-1200	Volumen
	Light obscuration (Hiac)®	2-150	Área proyectada
	Light Scattering	0.3-10	Área proyectada
	Difracción de Láser	0.1-2000	Volumen o área proyectada
Área de superficie	Adsorción de gas Permeabilidad		Volumen-superficie o diámetro principal Sauter

### 3.1.3 Cantidad de partículas.

Existen básicamente cuatro maneras de contabilizar la cantidad de partículas de cada tamaño presentes en una mezcla, cada una de las cuales está relacionada con una dimensión diferente e identificada con el subíndice  $r$  ( $L_r$ ).

- Fracción del número total de las partículas  $f_0(x)$ : determina qué fracción del número total de partículas corresponde a las partículas de cada clase o tamaño. Tiene como dimensión asociada el número,  $L_0$ .

- Fracción de la longitud total de las partículas  $f_1(x)$ : determina la fracción de la longitud total de las partículas que corresponde a las partículas de cada clase o tamaño. La dimensión asociada en este caso es longitud,  $L_1$ .
- Fracción del área o superficie total de las partículas  $f_2(x)$ : determina la fracción del área o superficie total que está ocupada por las partículas de cada clase o tamaño. Tiene como dimensión asociada el área,  $L_2$ .
- Fracción del volumen o masa total de las partículas  $f_3(x)$ : determina la fracción del volumen o masa total que está ocupada por las partículas de cada clase o tamaño. La dimensión asociada es el volumen,  $L_3$ .

### 3.1.4 Representación de la distribución de tamaño de partículas.

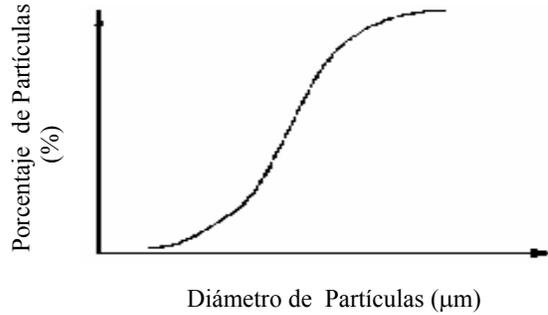
Para realizar una representación del tamaño de las partículas estudiadas se utiliza una curva de distribución, en la cual el intervalo del diámetro de las partículas (o su equivalente) se divide en un número adecuado de intervalos de clase de cierta amplitud seleccionada, y se expresa una medida de partículas (que puede ser número, longitud, superficie o volumen) que se encuentran en cada intervalo de clase, preferiblemente como porcentaje del total. Las curvas de distribución más utilizadas son la curva de distribución acumulada y la curva de densidad de distribución.

#### 3.1.4.1 Curva de distribución de frecuencia acumulada ( $F_r(x)$ ).

La distribución acumulada de tamaños de partículas ( $x$  o  $f(x)$ ), se define como la fracción o porcentaje de las partículas que poseen un tamaño menor o mayor a un valor  $x$ . La relación entre la densidad de distribución y la distribución de frecuencia acumulada viene dada por la siguiente ecuación:

$$F_r(x) = \int_{x_1}^{x_2} f_r(x) \cdot dx \quad (1)$$

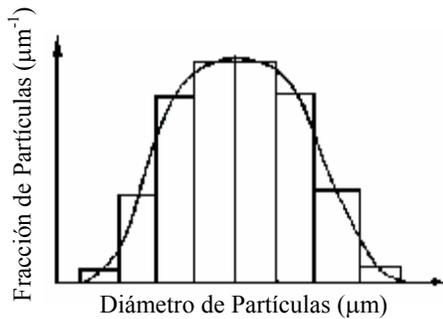
En la Figura N°1, se presenta una gráfica típica de la distribución de frecuencia acumulada.



**Figura N° 1 Distribución Acumulada**

**3.1.4.2 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 ( $\Delta x$ ). Esta distribución representa la relación de la frecuencia de clase por el rango del intervalo de partículas de un tamaño  $x_0$ , es decir, su frecuencia entre la frecuencia total de la muestra, y es expresada generalmente en forma de porcentaje. Se calcula dividiendo la frecuencia de clase entre el tamaño del intervalo y representa la fracción de partículas por unidad de tamaño, tiene unidades de  $L^{-1}$  y se denomina densidad de distribución  $f(x)$ . El producto  $f_r(x) \cdot \Delta x$  representa la cantidad de partículas presente en el intervalo  $\Delta x$ . En la figura N°2, se presenta un gráfico típico de distribución de densidad.



## Figura N° 2 Densidad de Distribución

### 3.1.5 Tipos de distribución de tamaño de partículas.

Dependiendo del método usado para cuantificar la cantidad de partículas, existen cuatro tipos de densidades de distribución de partículas y cuatro distribuciones acumuladas, en función de parámetros tales como el número; longitud, superficie, volumen o masa de las partículas. Cada una de estas distribuciones será aplicada en función de los requerimientos del análisis; se representan con una notación de 0,1,2,3. En la tabla N°2 se presenta cada una de ellas. La figura N°3, es un gráfico típico que representa cada una de estas distribuciones.

**Tabla N°2: Tipos de distribución de tamaño**

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

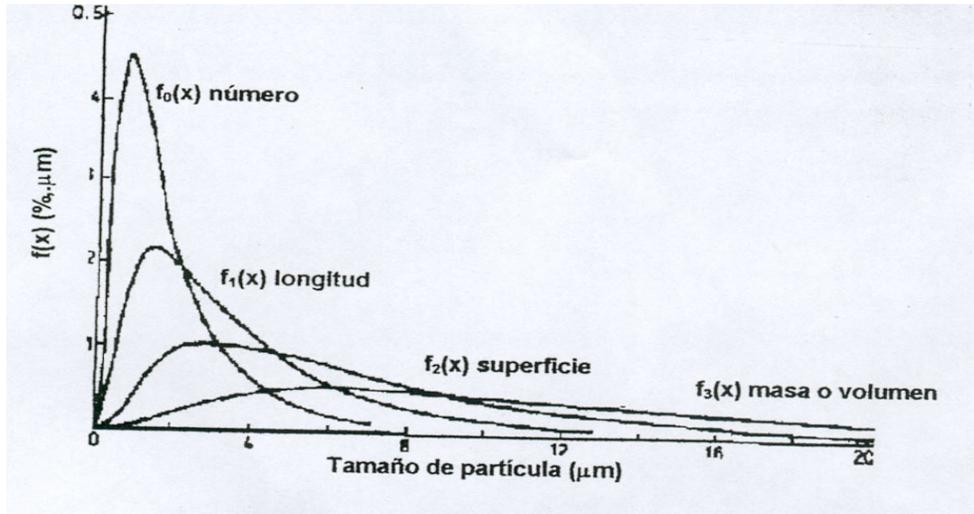
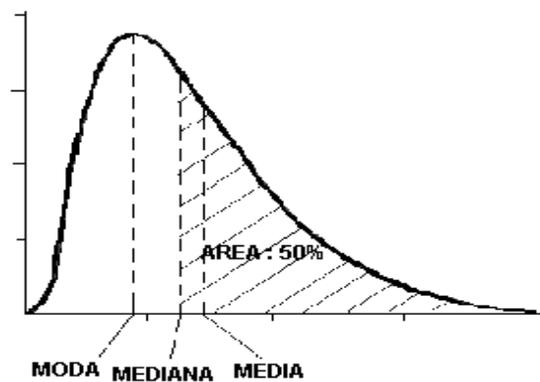


Figura N° 3 Forma de las diferentes distribuciones.

### 3.1.6 Medidas de tendencia central.

A fin de facilitar el análisis de un conjunto de datos, se busca definir un valor representativo de los mismos a través de la definición de promedios o valores centrales, en torno a los cuales la muestra es presentada de manera global y aproximada. En la figura N° 4, se ilustra cada una de las medidas de tendencia central definidas: media, mediana y moda.



**Figura N° 4 Medidas de Tendencia Central de una Distribución**

**3.1.6.1 Media**

Representa un valor promedio basado en la frecuencia que ejerce cada valor o clase dentro de la muestra. Para el estudio de la distribución de tamaño de partícula se define a través de la función de tamaño  $g_k(x)$  y la densidad de distribución  $f(x)$  o la distribución de frecuencia  $F(x)$  de manera integral:

$$g_k(\bar{x}_{k,r}) = \int_0^{\infty} g_k(x) \cdot f_r \cdot dx = \int_0^1 g_k(x) \cdot dF_r \quad (2)$$

La función de tamaño  $g_k(x)$  permite definir diferentes tipos de medias las cuales se presentan en la tabla n° 3.

**Tabla N°3: Tipos de Medias**

$g_k(x)$	Nombre de la media	Símbolo
x	Aritmética	$x_a$
$x^2$	Cuadrática	$x_q$
$x^3$	Cúbica	$x_c$
$x^{-1}$	Armónica	$x_h$
ln x	Geométrica	$x_g$

Una media de particular interés es la que se obtiene manipulando la distribución en volumen,  $F_3(x)$ , cuando la función  $g_k(x)$  es  $1/x$ :

$$\frac{1}{x_{h,3}} = \int_0^{\infty} \frac{1}{x} f_3(x) dx = \int_0^1 \frac{1}{x} dF_3 \quad (3)$$

Sorrentino (2002) ha mostrado que esta media es un estimador del tamaño promedio superficie-volumen,  $x_{sv}$ , que se denomina  $D_{3,2}$

$$D_{3,2} = \frac{1}{\int_0^{\infty} \frac{1}{X} f_3(x) dx} = \frac{1}{\int_0^{\infty} \frac{1}{X} dF_3} \quad (4)$$

Adicionalmente, Sorrentino introdujo un factor de forma,  $\psi_{sv}$ , que permite obtener  $x_{sv}$  y por tanto estimar la superficie específica de la mezcla de partículas

$$\psi_{sv} = \frac{x_{sv}}{D_{3,2}} \quad (5)$$

$$Sv = \frac{6}{x_{sv}} = \left( \frac{6}{\psi_{sv}} \right) \cdot \left( \frac{1}{D_{3,2}} \right) \quad (6)$$

### 3.1.6.2 Mediana

Es una medida descriptiva del centro o localización de una distribución de partículas, que corresponde al valor de tamaño con una frecuencia igual a 50% y divide la curva de densidad de distribución  $f(x)$  en dos sectores de igual por lo que se denomina  $x_{50}$ .

### 3.1.6.3 Moda

Es aquel valor dentro de un conjunto de datos que se presenta con la mayor frecuencia. Para una DTP representa el diámetro para el cual  $f(x)$  es máxima.

### 3.1.6.4 Desviación Estándar y Varianza

La desviación estándar y la varianza se basan en la sumatoria de la desviación de cada punto de la distribución con respecto a la media, evitando la compensación de los errores por medio de una función cuadrática. Para una distribución continua la

desviación estándar se puede definir de manera general para cualquier función  $g_k$  definida en la tabla nº 3 a partir de la siguiente ecuación.

$$\sigma_{k,r} = g_k^{-1} \left( \sqrt{\int_0^{\infty} [g_k(x) - g_k(\bar{x}_{k,r})]^2 \cdot f_r \cdot dx} \right) = g_k^{-1} \left( \sqrt{\int_0^1 [g_k(x) - g_k(\bar{x}_{k,r})]^2 \cdot dF_r} \right) \quad (7)$$

Lo cual permite definir una desviación estándar aritmética ( $\sigma_a$ ) así como una desviación estándar geométrica ( $\sigma_g$ ). Por su parte, la varianza ( $\sigma_k^2$ ) se define como el cuadrado de la desviación estándar.

Particularmente durante el desarrollo de este trabajo, fue empleada la desviación geométrica ( $\sigma_g$ ) como parámetro de evaluación de la amplitud, definiendo la misma como:

$$\ln(\sigma_{g,r}) = \sqrt{\int_0^{\infty} \left[ \ln\left(\frac{x}{x_{g,r}}\right) \right]^2 \cdot f_r \cdot dx} \quad (8)$$

### 3.2 FILTRACIÓN.

La filtración pertenece al tipo de separación mecánica, y se puede definir como la separación de una mezcla de sólidos y líquidos que consiste en el paso de la mayor parte del fluido a través de un medio poroso (mediante la acción de una fuerza impulsora), donde se retiene la mayor parte de las partículas sólidas contenidas en la mezcla.[Pérez / Salazar, 1994]

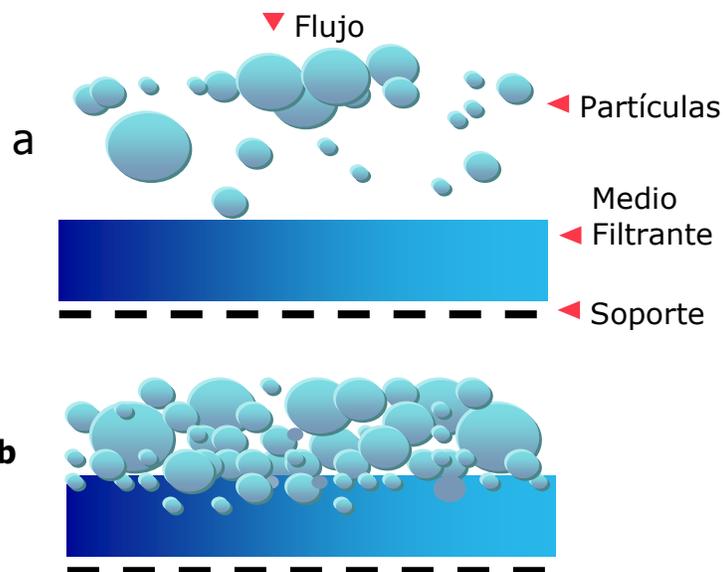
La selección del medio filtrante ideal para la separación es un factor determinante en el proceso; ya que la eficiencia de un proceso de filtración depende de la correcta elección del medio filtrante el cual debe cumplir con las siguientes características:

- Alta retención de filtrado, sin que la deposición de sólidos cierre el paso del fluido
- Debe poseer resistencia química frente a los productos a filtrar
- Resistencia mecánica para soportar la presión de trabajo
- Poseer superficie lisa para poder separar la torta o precipitado sin pérdida apreciable del mismo

### 3.1.2 Clasificación de filtración

El proceso de filtración se puede clasificar según los siguientes parámetros: [Pérez / Salazar, 1994]

- **Por la fuerza impulsora:** en toda filtración debe someterse a la suspensión a una diferencia de presión con el fin de obligar al fluido a atravesar el medio filtrante [Anlauf / Nicolaou / Sorrentino, 1994]; dicha diferencia de presión puede obtenerse aplicando algunas de las siguientes fuerzas impulsoras: gravedad, presión diferencial de gas, presión de líquido, presión mecánica, presión centrífuga o presión capilar
- **Por el ciclo operacional:** los filtros pueden ser continuos o discontinuos. Los filtros continuos son de mayor utilidad a nivel industrial. Los filtros discontinuos pueden ser operados con una fuerza impulsora a presión constante, a velocidad constante o a presión y velocidad variable.
- **Por el mecanismo de filtración:** [Brown, 1965] existen dos tipos de filtración, la llamada filtración por formación de torta, en la que los sólidos se depositan en el medio filtrante para formar una torta de espesor creciente, y la llamada filtración de lecho profundo, en la que la deposición de las partículas tiene lugar en el interior del medio filtrante. En un filtro de lecho profundo las partículas retenidas son generalmente de menor tamaño que los poros del lecho (figura nº 5-b); en este tipo de filtración el sólido no es el producto deseado. En la filtración por formación de torta las partículas se acumulan sobre el medio filtrante formando una torta que se transforma en el medio que retiene a las partículas que siguen llegando (fig N°5-a) .



**Figura N° 5 Proceso de Filtración. [Wakeman, 1975]**

- **Por el objetivo:** el objetivo del proceso de filtración puede ser obtener sólidos secos en cuyo caso la torta es el producto de interés o, si se desea clarificar líquidos, cuando el filtrado es el producto de valor o, en algunos casos ambos, el líquido y el sólido quieren recuperarse.
- **Por la naturaleza de los sólidos a filtrar:** la filtración por formación de torta puede tener asociada una acumulación de sólidos compresibles o sustancialmente incompresibles, lo que dará a las tortas formadas estas mismas características.

En el caso de estudio el proceso es llevado a cabo en un equipo que consiste en una celda de filtración de tipo discontinua a escala de laboratorio, en la cual se filtran sólidos por el mecanismo de filtración por formación de torta usando presión diferencial de gas.

### 3.2.2 Formación de la torta.

La formación de la torta es una de las etapas presentes durante el proceso de filtración, que consiste en el paso de la suspensión a través de un medio poroso y permeable al fluido donde se retienen los sólidos, cuyo objetivo es separar el sólido del líquido donde este se encuentra suspendido.

En la etapa de formación de la torta es importante obtener una relación que permita predecir el comportamiento del filtro en cuanto a la cantidad de sólido o de filtrado producido por unidad de tiempo, como función de las condiciones de operación del filtro y de las características de la suspensión que va a procesarse. Los parámetros que influyen en este proceso son:

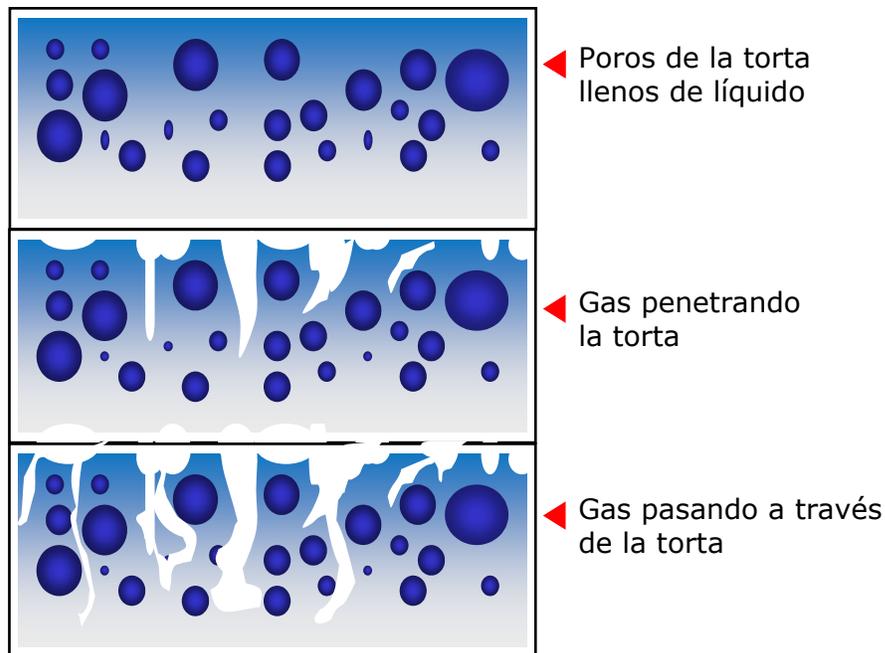
- **Caída de presión ( $\Delta P$ ):** puede ser constante (la velocidad de filtrado disminuye a medida que transcurre el tiempo) o variar según la fuerza aplicada.
- **Área de filtrado ( $A_f$ ):** por lo general es constante, a excepción de, por ejemplo, la formación de tortas en filtros tubulares y/o tambor rotatorio.
- **Viscosidad de fluido ( $\mu_L$ ):** es proporcional al inverso de la temperatura. Si la temperatura se mantiene constante durante el proceso y el líquido se comporta como un fluido Newtoniano la viscosidad no varía.
- **Resistencia específica de la torta ( $r_c$ ):** permanece constante si las tortas son incompresibles, y depende de la presión aplicada, del grado de consistencia de la torta y del contenido de sólido en la suspensión.
- **Resistencia del medio filtrante ( $R_m$ ):** por lo general es constante aunque puede variar con el tiempo debido a la penetración de partículas sólidas en los poros del medio filtrante o debido a la presión aplicada, que puede causar la compresión del material fibroso que constituye el medio. Se ha comprobado que la resistencia del medio filtrante aumenta linealmente con el aumento de la presión [Wakeman, 1975].

### 3.2.3 Deslicorización.

La deslicorización corresponde a un proceso de post-tratamiento donde el filtrado atrapado dentro de los poros de la torta es desplazado mediante la aplicación de fuerzas que eliminan el contenido de humedad [Wakeman, 1975]

La remoción de líquido por medio de gas es probablemente el método más común de deslicorización. Durante el proceso de deslicorización por presión de gas ocurre que los poros de la torta se van vaciando, la torta mantiene su altura original, la saturación inicial va disminuyendo, la humedad va disminuyendo y el proceso está limitado por fuerzas capilares

Al principio sólo sale filtrado, pero a medida que transcurre el tiempo y se vacían los poros, el gas empleado fluye a través de la torta (ver figura nº 6).

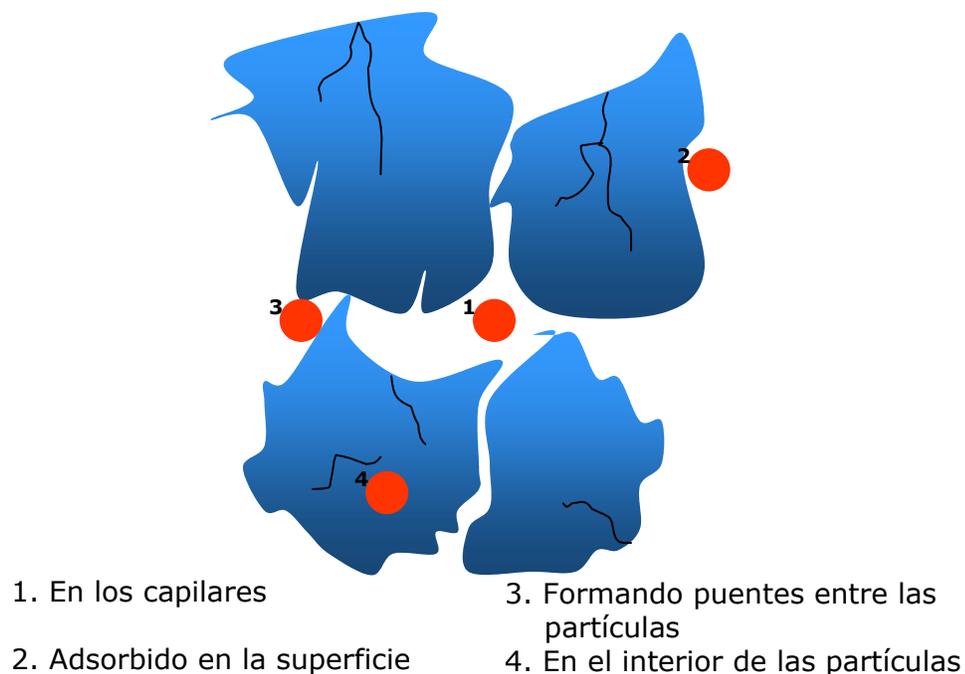


**Figura N° 6**

**Deslicorización de tortas por inyección de gas. [Wakeman, 1975]**

El líquido puede ser retenido en una torta de diversas formas, las cuales se encuentran descritas en la figura nº 7. Cada una de estas formas de retención

requieren procedimientos de remoción diferentes; solamente el líquido que se encuentra retenido en los capilares puede ser retirado a través de la deslicorización por presión de gas.



**Figura N° 7 Formas de retención de líquido en una torta. [Roccaro, 1997]**

Para comprender los procesos de deslicorización es importante definir los conceptos utilizados para expresar el contenido de líquido de una torta húmeda.

### **3.2.3.1 Humedad y Saturación.**

Es un término importante que cuantifica la cantidad de líquido que se ha retirado de las tortas de filtración y por ende la cantidad que aun queda por remover. La humedad es una medida del contenido del líquido de la torta húmeda. La

obtención de la misma requiere la determinación del peso de la torta húmeda y de la torta seca. Se determina de la siguiente manera:

$$H = \frac{M_{LT}}{M_{LT} + M_S} \quad (9)$$

- **Humedad de equilibrio ( $H_\infty$ ):** Es el valor del contenido de humedad cuando el tiempo de deslicorización tiende a infinito.

La saturación es una medida del contenido de líquido de las tortas húmedas y es función de la porosidad de la torta, por lo tanto, todos los materiales que posean porosidad similar son comparables entre si, es decir, se refiere al volumen del líquido contenido en la torta como una fracción del volumen total de espacios vacíos en la misma y se calcula por la siguiente relación:

$$S \equiv \frac{\text{volumen de líquido}}{\text{volumen vacío en la torta}} = \frac{V_L}{V_T - V_S} \quad (10)$$

La medición de la saturación no puede hacerse de manera directa; para ello es necesario conocer el volumen de poros vacíos de la torta ( $V_{VT}$ ), éste a su vez se estima luego de haber calculado el volumen total de la torta ( $V_T$ ) y el volumen ocupado por el sólido ( $V_S$ ) con las siguientes ecuaciones :

$$V_T = A \cdot h_C \quad (11)$$

$$V_S = \frac{M_S}{\rho_S} \quad (12)$$

En términos de la porosidad y la humedad, se puede calcular la saturación como:

$$S = \frac{\rho_S}{\rho_L} \cdot \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \cdot \frac{H}{1 - H} \quad (13)$$

Si todo el volumen de la torta no ocupado por el sólido está ocupado por el líquido, se dice que la torta está saturada y la saturación alcanza su máximo valor ( $S=1$ ).

Se pueden definir los siguientes tipos de saturación en un proceso de deslicorización:

- **Saturación de equilibrio ( $S_\infty$ ):** es aquella saturación que se alcanza a una presión dada, cuando el tiempo tiende a infinito.
- **Saturación irreducible o residual ( $S_r$ ):** es la fracción de líquido que no puede ser extraída de la torta por medios mecánicos, aún cuando la diferencia de presión aplicada sea muy grande.
- **Saturación relativa ( $\hat{S}$ ):** es la cantidad de líquido no removido con respecto al removible a una determinada presión.

$$\hat{S} = \frac{S - S_\infty}{1 - S_\infty} \quad (14)$$

- **Saturación reducida ( $S^*$ ):** es la fracción de líquido que aún puede ser removido de la torta respecto al líquido total removible en la misma por medios mecánicos.

$$S^* = \frac{S - S_r}{1 - S_r} \quad (15)$$

### 3.2.3.2 Permeabilidad relativa de medios porosos (K).

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 del medio poroso.

Para el cálculo de la permeabilidad, es común utilizar la ecuación de Carman-Kozeny:

$$K = \frac{1}{5} \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} \frac{1}{S_v^2} \quad (16)$$

La ecuación de Carman-Kozeny supone que la superficie de las partículas actúa como la superficie de los poros. Entonces, para partículas esféricas,  $S_v = 6/X_{sv}$ , sustituyendo en la ecuación anterior:

$$K = \frac{1}{180} \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} X_{sv}^2 \quad (17)$$

Sorrentino (2002) basado en la ecuación de Carman-Kozeny formuló la siguiente ecuación que incluye la información sobre la forma de la partícula en una relación de permeabilidad – porosidad:

$$K C_2 \varphi(\varepsilon) = (\psi_{sv})^2 (D_{3,2})^2 \quad (18)$$

### 3.2.4 Porosidad ( $\varepsilon$ ).

La porosidad es la relación existente entre el volumen de espacios vacíos de la torta y el volumen total ( $V_T$ ) de la misma:

$$\varepsilon = \frac{V_T - V_S}{V_T} \quad (19)$$

Experimentalmente el valor de la porosidad puede calcularse midiendo la masa de torta seca ( $M_s$ ), la densidad del sólido ( $\rho_s$ ) y el volumen que ocupa la torta ( $V_T$ ) (ecuac. 11).

Resultando la expresión de porosidad queda como sigue:

$$\varepsilon = 1 - \frac{M_s}{\rho_s \cdot A \cdot h_c} \quad (20)$$

La porosidad se considera constante para tortas incompresibles de cualquier altura, aunque cambie la presión de operación del filtro.

#### 3.2.4.1 Modelo de empaquetamiento lineal de Yu.

La porosidad se conoce por ser el parámetro más simple para caracterizar el empaquetamiento de partículas. Desde hace mucho tiempo se sabe que las partículas finas forman aglomerados o agregados debido a fuerzas débiles, tales como las de Van Der Waals y las fuerzas electrostáticas por lo que no se comportan como partículas individuales; esto afecta fuertemente el empaquetamiento de partículas. Sin embargo, este comportamiento nunca había sido tratado propiamente en modelos que relacionaran la porosidad y la distribución de tamaño de partículas. Por lo tanto se consideraba útil desarrollar un método para predecir la porosidad y las propiedades de mezclas relacionadas con el empaquetamiento de partículas.

Yu et al. establecieron un modelo en 1997 asumiendo un sistema de  $n$  componentes, con densidad de partícula constante caracterizado por su porosidad inicial ( $\epsilon_i$ ) y su diámetro de empaquetamiento equivalente ( $d_{pi}$ ) con  $i = 1, 2, \dots, n$ , estableciendo que la porosidad ( $\epsilon$ ) es función de la porosidad del lecho de partículas de un mismo tamaño ( $\epsilon_i$ ), la razón de tamaño de empaque equivalente ( $r_{i,j}$ ) que representa una interacción binaria entre tamaños (esta relación de empaquetamiento equivalente se agrupa de mayor a menor) y la fracción volumétrica del componente  $i$  que depende de la distribución de tamaños de partícula ( $x_i$ ). Tal como se muestra en la siguiente expresión:

$$\epsilon = f(\epsilon_1, \dots, \epsilon_n, r_{i,j}, x_1, \dots, x_n) \quad (21)$$

Anteriormente los modelos matemáticos propuestos para la porosidad empleaban el diámetro de empaquetamiento para una esfera. El modelo lineal propuesto por Yu establece que las partículas no son necesariamente esféricas y define el volumen específico total de una mezcla ( $V$ ) como el recíproco de la solidosidad y se determina de la siguiente manera:

$$V = \frac{1}{1 - \epsilon} \quad (22)$$

De la ecuación (22) la porosidad puede calcularse como:

$$\epsilon = 1 - \frac{1}{V} \quad (23)$$

A su vez el volumen específico total ( $V$ ) de una mezcla se define como el máximo volumen de todos los volúmenes específicos ( $V_i$ ) calculados a partir de cada componente, es decir:

$$V = \text{máx}(V_1^T; V_2^T, \dots, V_n^T) \quad (24)$$

Donde el volumen específico calculado en base al componente  $i$ , ( $V_i^T$ ) es igual a:

$$V_i^T = \sum_{j=1}^{i-1} [V_j - (V_j - 1)g(r_{i,j})]X_{i,j} + V_i X_i + \sum_{j=i+1}^n V_j [1 - f(r_{i,j})]X_j \quad (25)$$

Los  $V_i$  representan los volúmenes específicos iniciales;  $f(r_{i,j})$  y  $g(r_{i,j})$  son las funciones de interacción y sólo dependen del  $r_{i,j}$ , que es la relación de los diámetros de empaquetamiento equivalente entre los componentes  $i$  y  $j$ . Las ecuaciones que definen las funciones de interacción son:

Para valores menores que el componente  $j$ :

$$g(r_{i,j}) = (1 - r_{i,j})^{1,97} + 0,36r_{i,j}(1 - r_{i,j})^{3,67} \quad (26)$$

Para valores mayores que el componente  $j$ :

$$f(r_{i,j}) = (1 - r_{i,j})^{3,33} + 2,81r_{i,j}(1 - r_{i,j})^{2,77} \quad (27)$$

La razón de tamaño de empaque equivalente ( $r_{i,j}$ ) está representada por la siguiente ecuación potencial:

$$r_{i,j} = R_{i,j}^P \quad (28)$$

Donde  $P$  es un valor constante y  $R_{i,j}$  es la razón de tamaño volumétrico que depende de la distribución de tamaños de partículas, tal como se expresa a continuación:

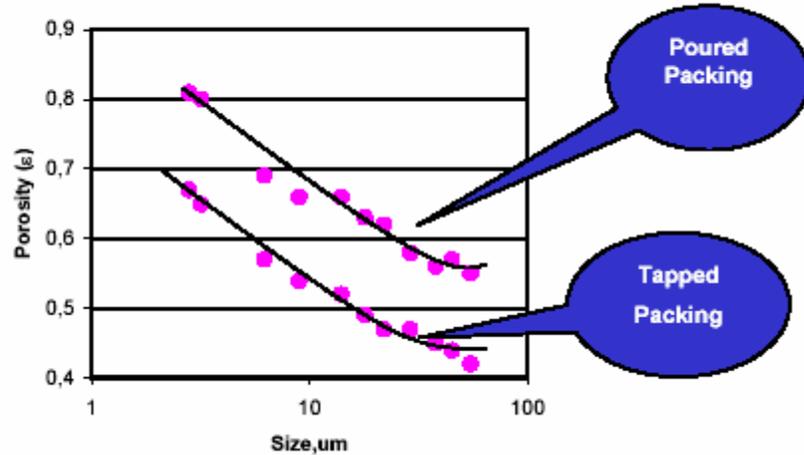
$$R_{i,j} = \frac{X_i}{X_j} \quad (29)$$

Yu para llevar a cabo la parte experimental empleó once (11) fracciones estrechas de alúmina y dividió su trabajo en tres etapas, estas son: porosidad de

lechos individuales, porosidad de mezclas binarias y porosidad de mezclas multicomponentes; en nuestro caso sólo se estudiarán las dos primeras etapas.

- **Porosidad de lechos individuales:**

A.B. Yu determinó la porosidad del lecho individual para establecer la relación entre la porosidad y el tamaño de la partícula. La experiencia fue llevada a cabo de dos formas diferentes, una segregando o sedimentando el sistema disperso de partículas y otra compactando el mismo; los cuales denominó **poured packing** y **tapped packing**, respectivamente. Tal como puede observarse en la figura N°8.



**Figura N° 8. Porosidad inicial Vs. Tamaño de partícula para alúmina. [Yu, 1997].**

Los resultados experimentales de porosidad individual se ajustaron a la siguiente ecuación:

$$\varepsilon d = \varepsilon_0 + (1 - \varepsilon_0) \exp(-ad^b) \tag{30}$$

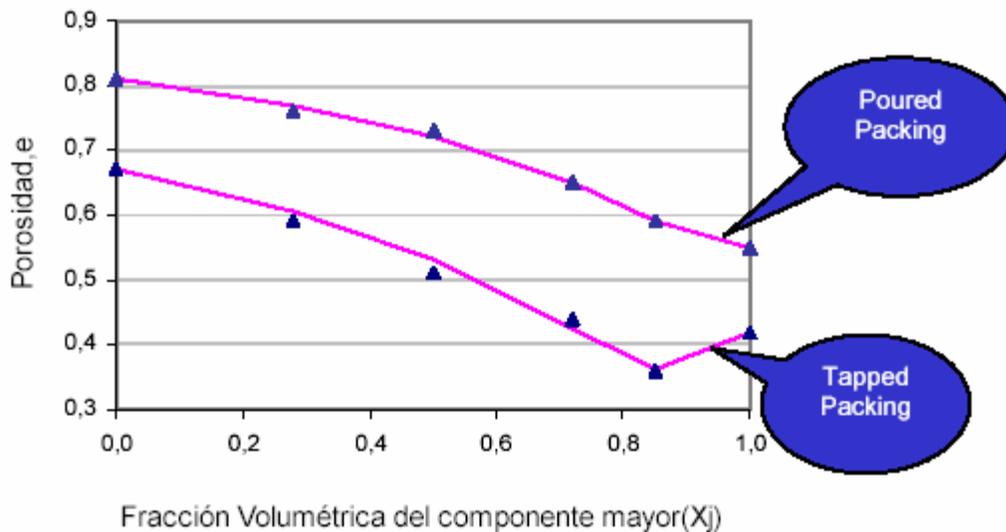
Donde  $d$  es el tamaño promedio de las partículas y  $\epsilon_0$ ,  $a$  y  $b$  son valores que se obtienen a través del ajuste matemático de mínimos cuadrados. En la tabla N°4 se muestran los valores encontrados por Yu et al.

**Tabla N°4: Parámetros de la ecuación (30) para las dos formas de empaquetamiento. [Yu, 1997].**

Parámetros	$\epsilon_0$	a	b
Poured Packing	0.5092	1.3199	0.3487
Tapped Packing	0.4117	1.0864	0.2999

- **Porosidad de Mezcla binarias:**

Esta etapa se empleó para determinar la relación entre la razón de tamaño volumétrico ( $R_{i,j}$ ) y la razón de tamaño de empaque ( $r_{i,j}$ ). Para ello realizó mezclas binarias a partir de las once fracciones estrechas, combinándolas en distintas proporciones abarcando un rango desde 0% de la fracción de mayor tamaño hasta 100% de la misma, determinando la porosidad experimentalmente para cada par, obteniendo representaciones como la que se muestra en la figura N°9.



**Figura N° 9. Empaquetamiento de mezclas binarias para el par 8-11. [Yu, 1997].**

A partir de las ecuaciones (24) – (27) se determinaron los valores de la razón de tamaño de empaquetamiento,  $r_{i,j}$ , para cada sistema binario tanto para tapped packing como para poured packing, empleando un mismo valor de  $R_{i,j}$  proveniente de la distribución de tamaño de partículas (DTP). Con los valores obtenidos de  $r_{i,j}$ , Yu realizó la representación gráfica que se presenta en la figura N°10, en la cual se utilizó un ajuste potencial para obtener los valores del parámetro P de la ecuación (28), estos se muestran en la tabla N°5.

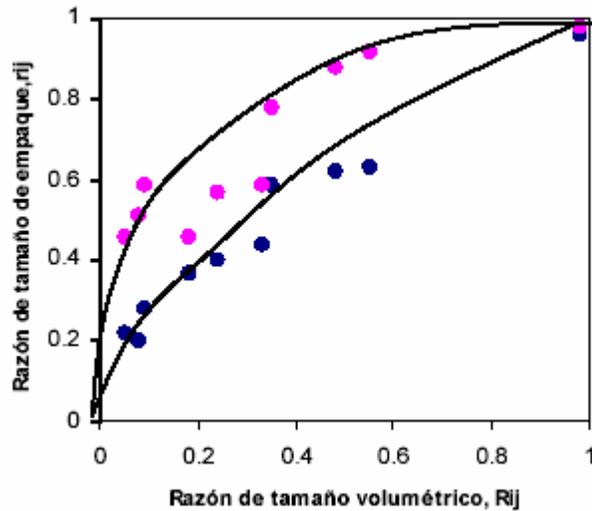


Figura N° 10 Relación entre  $r_{i,j}$  y  $R_{i,j}$  para las dos formas de empaquetamiento. (Yu, 1997).

Tabla N°5: Parámetro de la ecuación (28) para ambos sistemas de empaquetamiento.[Yu, 1997]

Parámetro	P
Poured Packing	0.52
Tapped Packing	0.78

### 3.3 PRESIÓN CAPILAR

La presión capilar es una medida de la presión que se tiene que vencer para que el gas desplace al líquido retenido en la torta, y sirve para estudiar el comportamiento de un medio poroso con dos o más fases fluidas inmiscibles.

Si la superficie que separa las dos fases es curva, la presión en cada una de las fases debe ser diferente y esta relación o diferencia es lo que se llama presión capilar y es expresada como:

$$P_k = P_a - P_b \quad (31)$$

La presión capilar es dependiente de la saturación de la torta de filtración y del rango de tamaño de poro que existe en ella. La relación más útil es obtenida por medición de la curva de presión capilar para el medio poroso o torta de filtración, y entonces se gráfica la presión capilar contra saturación. Anteriormente se definió la saturación reducida,  $S^*$ , (ecuación 15), que permite describir la curva de presión capilar:

$$S_{\infty}^* = \left( \frac{P_{ke}}{P_k} \right)^{\lambda} \quad \text{para } P_k \geq P_{ke} \quad (32)$$

donde  $\lambda$  es el índice de la distribución de tamaño de poro el cual caracteriza el rango de tamaño de poro en una torta de filtración o medio poroso, y  $P_{ke}$  es la mínima presión que se necesita para iniciar el desplazamiento del líquido. Cuando  $S \leq S_{\infty}$  el líquido puede ser observado como inmóvil y más adelante removido de la torta usualmente solo por evaporación o técnicas de secado. [Wakeman & Tarleton, 1999]

La presión de entrada se incrementa a medida que disminuye el tamaño de partículas en la torta y a medida que aumenta el rango de tamaño, el valor de  $\lambda$  no sigue ningún patrón con el tamaño de partículas, probablemente porque también depende del rango de tamaño de la distribución de partículas, y presenta sólo una pequeña variación en relación a la permeabilidad. [Wakeman & Tarleton, 1999]

La forma que tome la interfase será aquella que tienda a minimizar el contenido de energía, lo cual se logra disminuyendo el tamaño de la interfase, por lo cual esta generalmente es curva. Realizando un balance de fuerzas para el caso particular de un gas y de un líquido contenido en un capilar cilíndrico, se deduce la ecuación de Laplace, la cual permite calcular la presión capilar ( $P_k$ ) y viene dada por:

$$P_k = \frac{2 \cdot \gamma_L \cdot \cos(\delta)}{r} \quad (33)$$

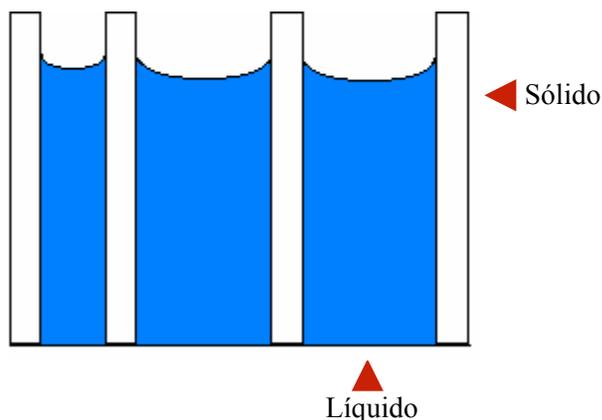
Normalmente se supone un mojado perfecto, con lo que  $\delta$  toma un valor igual a cero, quedando entonces:

$$P_k = \frac{2 \cdot \gamma_L}{r} \quad (34)$$

La ecuación anterior representa la presión capilar en un solo poro. La necesidad de determinar la curva de presión capilar es debido a la gran cantidad de poros de diferentes tamaños que constituyen la torta.

### 3.3.1 Curva de presión capilar.

La torta de filtración está conformada por una gran cantidad de poros de diferentes tamaños, como se muestra en la figura nº 11, debido a la existencia de una distribución de tamaño de partículas en la suspensión y, adicionalmente, a que la orientación de las partículas en la torta es aleatoria; esto hace que la torta no posea un valor único de presión capilar. Debido a que existe una distribución de la presión capilar a lo largo de ella, entonces, la capilaridad de la torta se representa por medio de la curva de presión capilar.



**Figura N° 11**

**Modelo estructural sencillo de tubos capilares de diferentes tamaños. [Arias / Ugas, 1998]**

La curva de presión capilar corresponde a un estado de equilibrio alcanzado entre las fuerzas de remoción y las fuerzas de retención (capilares), cuando ha transcurrido un tiempo suficiente de deslicorización. Esta curva es función de las características de la torta y cada punto de ella corresponde a una saturación de equilibrio. Sometiendo la torta a una diferencia de presión durante un tiempo suficiente tal que se equilibren la fuerza aplicada y las fuerzas capilares, se obtiene el valor de la saturación. Es en este momento que cesa el flujo de líquido, se alcanza la saturación de equilibrio  $S_{\infty}$  y la diferencia de presión entre el líquido y el gas, se iguala a la presión capilar  $p_K$ .

De lo anterior se deduce que la presión capilar es función de la saturación, y debe determinarse experimentalmente. En toda curva de presión capilar se destacan tres parámetros muy importantes, estos son:

- La presión capilar de entrada ( $P_{Ke}$ )
- La saturación remanente ( $S_r$ )

- Parámetro de distribución de tamaños de poros ( $\xi$ )

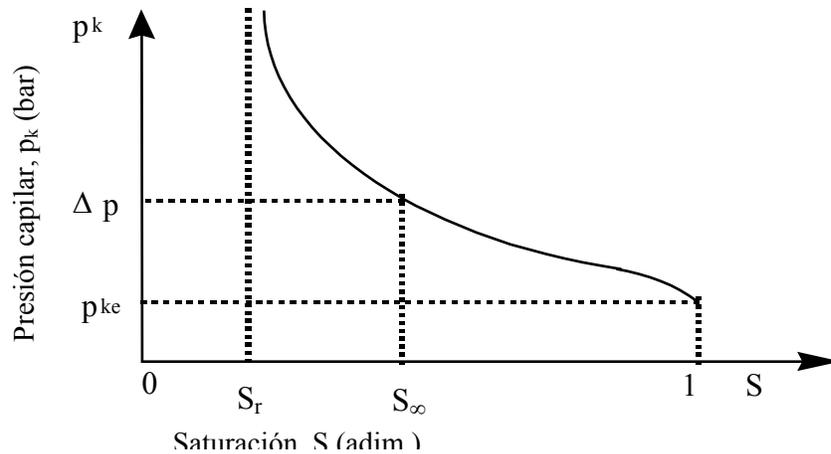
La presión capilar de entrada ( $P_{ke}$ ) es la mínima diferencia de presión necesaria para empezar a deslicorizar una torta de filtración y corresponde a la presión necesaria para drenar el líquido que se encuentra alojado en los poros más grandes de la torta.

Wakeman, [Purchas, / Wakeman, 1986] presenta una correlación para hallar la presión capilar de entrada en función de la porosidad de la torta ( $\varepsilon$ ), la tensión superficial del líquido ( $\gamma$ ) y el tamaño de las partículas ( $x$ ) de la misma:

$$p_{ke} = \frac{4,6 \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \gamma}{\varepsilon \cdot x} \quad (35)$$

La saturación remanente ( $S_r$ ) es la menor saturación que puede conseguirse cuando se deslicoriza una torta, es decir, cuando el conjunto de tubos capilares de tamaño de poro más pequeño de la torta se ha vaciado, ya que la presión capilar que se tiene en ellos es mayor que la diferencia de presión aplicada.

Como se muestra en la curva de presión capilar de la figura nº 12, aumentos progresivos en la diferencia de presión reducen la saturación hasta un valor mínimo a partir del cual no es posible obtener saturaciones menores por medios mecánicos. De igual forma, a medida que aumenta la diferencia de presión aplicada, la saturación de equilibrio disminuye.



**Figura N° 12**

**Curva típica de Presión Capilar. [Álvarez / Ramírez, 1998]**

### 3.3.2 Modelo de la curva de presión capilar.

Nicolaou (1999) utiliza un modelo para la curva de presión capilar, esta relación es aplicable en la zona donde la diferencia de presión es mayor a la presión capilar de entrada, generalmente para valores de  $S^*$  comprendidos entre 0.3 y 1.

$$p_K = p_{Ke} \cdot S^{*-\xi} \quad (36)$$

En esta expresión  $\xi$  es un parámetro que representa la medida de la distribución de tamaños de poros contenidos en la torta de filtración, y se puede determinar mediante el cálculo de la pendiente de la curva de presión capilar cuando se representa gráficamente en escala logarítmica, la relación de presión capilar de entrada y la presión capilar en función de la saturación, esto se puede observar en la figura n° 13.

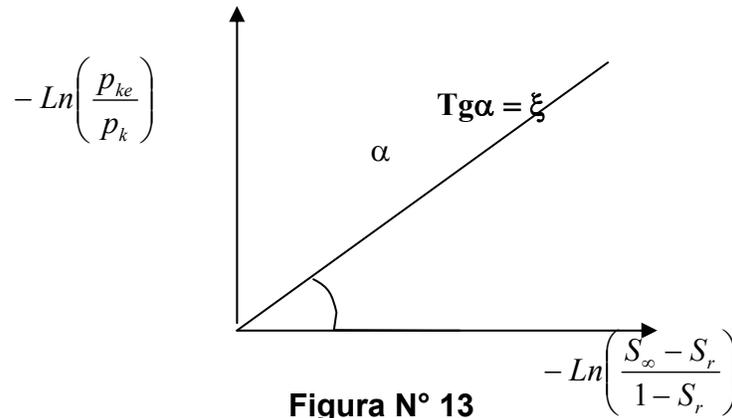


Figura N° 13

**Determinación de los parámetros de la curva de Presión Capilar según Nicolaou (1999)**

- **Método de distribución de Rosin-Rammler:** Sorrentino (2002) ha introducido el uso de la función de distribución Rosin-Rammler (RRSB) para interpretar datos de la curva de presión capilar. La función de distribución de Rosin-Rammler es una ecuación ampliamente usada en mediciones de tamaño de partículas. Es una función de dos parámetros, usualmente relacionada con la frecuencia acumulada de la siguiente forma:

$$F_3(r_H) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{r_H}{r'_H}\right)^\xi\right] \quad (37)$$

Según Sorrentino (2002) la saturación reducida de equilibrio,  $S_\infty^*$ , a una presión dada indica el porcentaje de poros cuyas gargantas son menores a  $r_H = \gamma \cos \delta / P_k$ , que equivale al radio hidráulico del poro. De este modo  $r_H$  se refiere al radio hidráulico de la garganta de poro. Rearreglando la ecuación (37) nos queda entonces:

$$\left( \frac{S_{\infty} - S_r}{1 - S_r} \right) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{P_k'}{P_k} \right)^{\xi} \right] \quad (38)$$

Para la obtención de los parámetros se usa la transformación:

$$\log \left( \text{Ln} \frac{1}{F(r_H)} \right) = \xi \log P_k' - \xi \log P_k \quad (39)$$

la cual resulta una línea recta si se grafica el  $\log(\text{Ln}1/F(r_H))$  vs.  $\text{Ln} P_k$ . Al obtener el valor de  $P_k'$ ,  $S_r$  y  $\xi$  se puede predecir el comportamiento de la curva de presión capilar.

- **Método de estimación de Parámetros según Rosín-Rammler con modificaciones por Sorrentino**

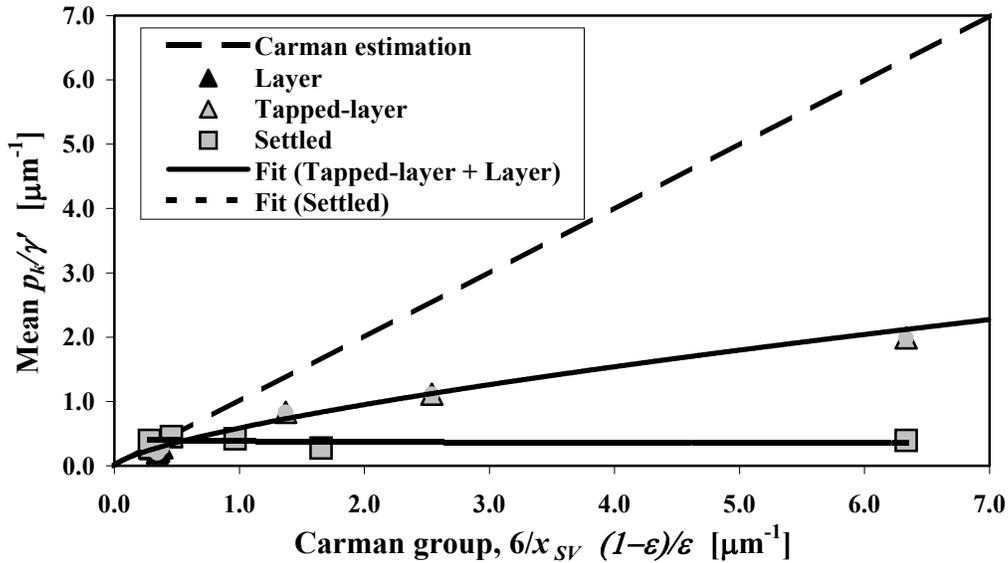
Sorrentino (2002) ha sugerido que, si la curva de presión capilar es ajustada mediante el modelo de Rosín-Rammler, sus parámetros ( $P_k'$ ,  $\xi$  y  $S_r$ ) pueden ser correlacionados satisfactoriamente con propiedades del conglomerado de partículas y con el modo de formar la torta.

El valor de  $P_k'$  no representa la presión capilar de entrada, sino la diferencia de presión a la cual el 63% del líquido removible de los poros está todavía dentro de la torta. En la interpretación usada en el modelo potencial (Nicolaou) descrito anteriormente, dos tortas tienen la misma  $P_k$  comienzan a deslicorizar a la misma diferencia de presión, mientras que en esta nueva interpretación, dos tortas con la misma  $P_k'$  han deslicorizado la misma cantidad relativa, lo cual no significa que las dos tortas tienen la misma saturación absoluta pero si la misma saturación reducida.

Para realizar la estimación de este parámetro se utiliza la siguiente ecuación:

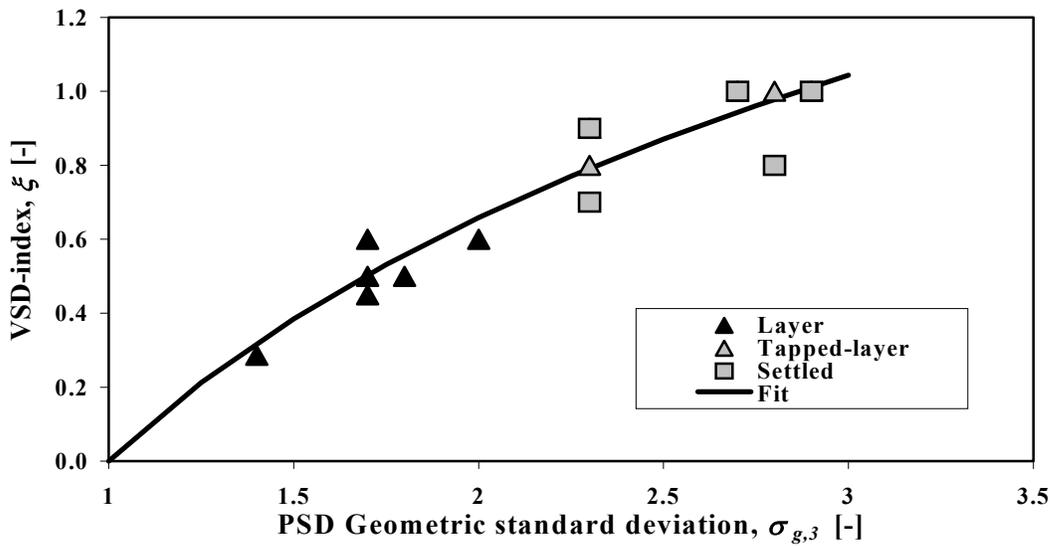
$$\frac{\bar{p}_k}{\gamma'} = \frac{1}{\bar{r}_H} = \frac{p_k'}{\gamma'} \cdot h(\xi) = \frac{p_k'}{\gamma'} \cdot (1 - 0.5 \cdot \xi + 0.5 \cdot \xi^2) \quad (40)$$

Donde se obtiene el valor de presión capilar promedio de la figura N° 14 tomada de Sorrentino (2002)



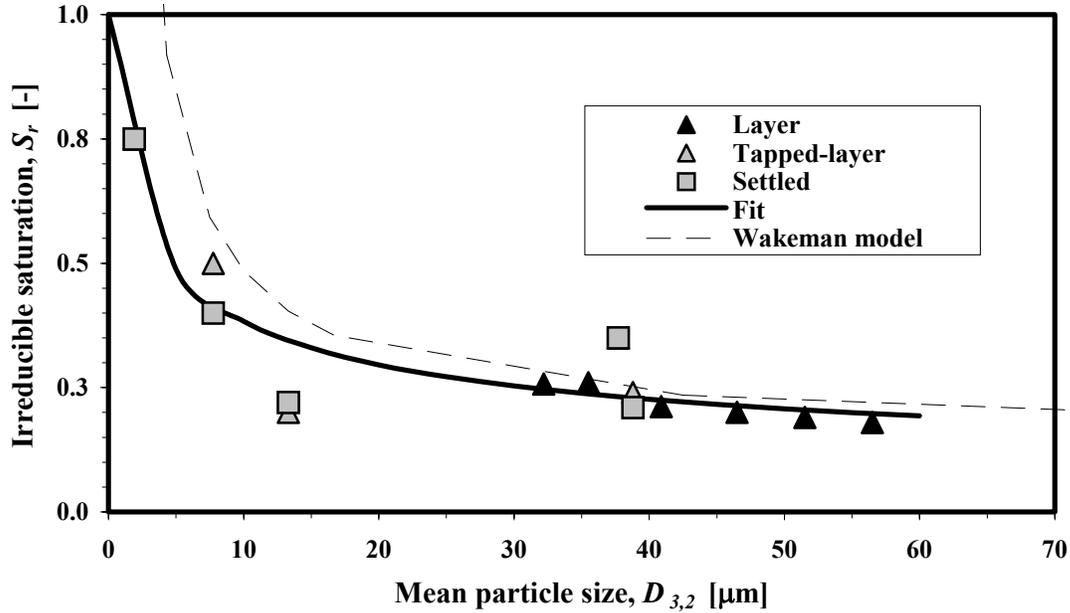
**Figura N° 14 Correlación de los datos de presión capilar usando el grupo de Carman (Sorrentino, 2002)**

Luego, es necesario obtener también el valor de  $\xi$ , el cual está directamente relacionado con la desviación estándar de cada mezcla en particular a través de la figura N° 15 tomada también de Sorrentino (2002):



**Figura N° 15 Influencia de la desviación estándar geométrica en el parámetro de distribución de poro (Sorrentino, 2002)**

Para la saturación irreducible, el líquido es asociado con el área externa y la porosidad interna de las partículas y los puntos de contacto entre las partículas, por lo tanto se hace necesario la relación con el diámetro de las mismas,  $D_{3,2}$ . Esto se hace a partir de la figura N°16:



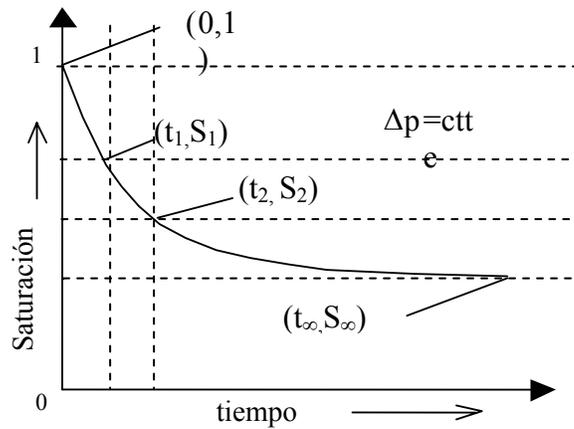
**Figura N° 16 Saturación irreducible como función del tamaño de partícula (Sorrentino, 2002)**

De esta forma se estiman los parámetros necesarios para la construcción de la curva de presión capilar, sin necesidad de obtener datos experimentales.

### 3.4 CINÉTICA DE DESLICORIZACIÓN.

Desde el punto de vista físico, la cinética de deslicorización constituye el desplazamiento del filtrado por el gas a una diferencia de presión aplicada; esto se reduce a un problema de flujo simultáneo de gas y líquido en los poros de la torta de filtración. En general, el líquido fluye sobre la superficie interna de los poros del sólido formando una película sobre las partículas que modifica la forma de los canales; el gas fluye a través de los espacios vacíos remanentes de los canales. Por la presencia de la película de líquido no se producen cambios bruscos en las direcciones de flujo de gas, tales como habrían si la torta estuviese seca. [Svarovsky, 1977]

Si una torta se somete a una diferencia de presión constante mayor que la presión capilar de entrada, ella comenzará a disminuir su saturación a medida que transcurre el tiempo hasta alcanzar un valor de saturación de equilibrio que corresponde a un punto de la curva de presión capilar. En la figura N° 17 se muestra el comportamiento del proceso de deslicorización. [Roccaro, 1997]

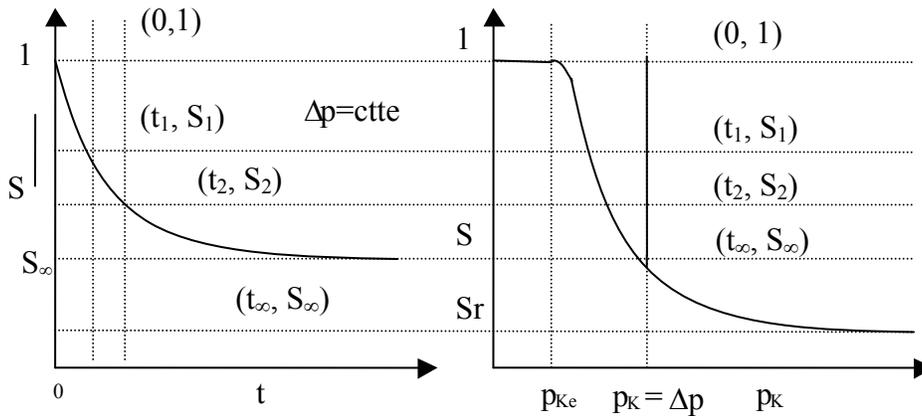


**Figura N° 17**  
**Cinética de deslicorización. [Arias, / Ugas, 1998]**

En ella se observa que los mayores cambios de saturación se obtienen en los primeros instantes de tiempo, ya que se vacían los poros más grandes presentes en la torta, luego le siguen los poros más pequeños contribuyendo a la disminución de cambios en la saturación a medida que transcurre el tiempo.

Tal como se muestra en la figura N° 18, el estudio de la cinética de deslicorización puede realizarse comparando la variación de la saturación de la torta de filtración en función del tiempo y la curva de saturación de la torta con respecto a

la presión capilar. Se concluye que la velocidad de deslicorización disminuye a medida que transcurre el tiempo, para una determinada diferencia de presión, mientras que para cada punto de la curva de presión capilar, éste corresponde a la saturación de equilibrio, si la torta se somete a una diferencia de presión igual a la presión capilar correspondiente a un tamaño de poros específico (que se va a vaciar).



**Figura N° 18 Relación entre las curvas que representan el proceso de deslicorización.**

Las curvas de la cinética de deslicorización de tortas de filtración pueden obtenerse en base a la Ley de Darcy, para el flujo simultáneo de dos fases, y en base al concepto de permeabilidad relativa, haciendo las siguientes suposiciones:

- Los flujos de líquido y gas son independientes
- La deslicorización es consecuencia de la relación entre la presión aplicada y la presión capilar
- Se extrae la misma cantidad de líquido en cada punto de la torta.

A partir de la Ley de Darcy se puede obtener un modelo para la cinética de

deslicorización, pero antes de aplicarla es necesario conocer un concepto importante como la permeabilidad específica (K), la cual representa la capacidad que tiene la torta para dejarse atravesar por cualquier fluido, ya sea gas o líquido. La permeabilidad efectiva de la torta al líquido ( $K_l$ ), además de depender de la estructura de la torta, depende del grado de saturación de la misma y suele expresarse como una fracción de la permeabilidad específica de la torta. Esta fracción se denomina permeabilidad relativa de la torta al líquido ( $K_{rel,l}$ ) y depende solo del grado de saturación. Con respecto a la permeabilidad específica de la torta al gas puede afirmarse lo mismo. En la figura N° 16 se muestra el comportamiento de la permeabilidad relativa a lo largo del proceso de deslicorización. Se observa que las permeabilidades relativas son muy sensibles a la cantidad de fluido presente en la torta.

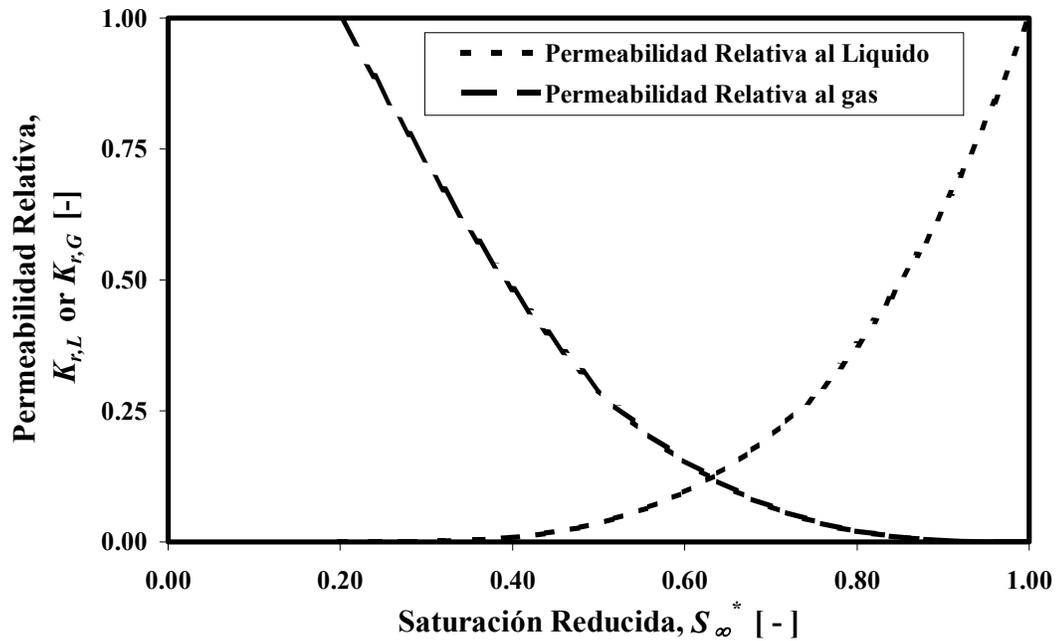


Figura N° 19

Dependencia de la permeabilidad relativa con la cantidad de líquido.

Lo descrito anteriormente se refleja en las siguientes expresiones:

$$K_L(S) = K \cdot k_{rel,L}(S) \quad (41)$$

$$K_G(S) = K \cdot k_{rel,G}(S) \quad (42)$$

La permeabilidad de la fase líquida disminuye a medida que disminuye la saturación en la torta, hasta llegar a cero para un valor finito de saturación. Esta saturación corresponde a la de equilibrio para una diferencia de presión alta, para saturaciones menores que esta solo hay flujo de gas a través de la torta y el líquido es irremovible.

En cuanto a la permeabilidad de la fase gaseosa, se tiene que el flujo de aire cesa cuando la saturación tiene un valor finito. Parece que la existencia de los espacios vacíos, hasta cierto punto, sólo contribuye al área disponible para el flujo de los fluidos y que la velocidad de flujo no se ve apreciablemente afectada si estos espacios se encuentran obstruidos[Svarovsky, 1977]. Algunos de los espacios pueden contener líquido o gas y a una diferencia de presión aplicada no permiten el flujo.

Las ecuaciones son aplicables a la Ley de Darcy debido a que:

- Los poros de la torta son pequeños.
- La distribución de tamaño de poros en la torta es tal, que permite que en cada punto de ella salga la misma cantidad de líquido.
- El régimen de flujo en los poros puede suponerse laminar.
- Las dos fases avanzan a lo largo de la torta en la misma dirección, sin mezclarse, a manera de flujo tapón por la diferencia de presión aplicada.

Aplicando la Ley de Darcy para cada fluido, se tiene:

Para el líquido:

$$\frac{1}{A} \cdot \frac{dV_L}{dt} = \frac{K_L \cdot \Delta p_L}{\mu_L \cdot h_C} \quad (43)$$

Para el gas:

$$\frac{1}{A} \cdot \frac{dV_G}{dt} = \frac{K_G \cdot \Delta p_G}{\mu_G \cdot h_C} \quad (44)$$

### 3.4.1. Modelos de cinética de deslicorización.

#### 3.4.1.1 Modelo de Schubert.

Schubert (1972 y 1982) introdujo una ecuación de velocidad de deslicorización asumiendo que todos los elementos de la torta contribuían proporcionalmente a que el líquido fluyera a través de la misma a las condiciones dadas. El contenido de líquido en la torta es expresado, usualmente en la deslicorización, en términos de la fracción de volumen de poros llenos con líquido o saturación, S:

$$\frac{dS}{dt} = - \frac{2 \cdot K \cdot K_{r,L} \cdot (\Delta p - p_k)}{\varepsilon \cdot \mu \cdot h_C^2} \quad (45)$$

La permeabilidad relativa del líquido,  $k_{rel,l}$  puede ser expresada en términos de la saturación reducida,  $S^*$ , usando la relación de Brutsaert, donde el exponente, N, es relacionado con la estructura de poro:

$$K_{rel,L} = (S^*)^N = \left( \frac{S - S_r}{1 - S_r} \right)^N \quad (46)$$

Si la curva de presión capilar es conocida,  $S_\infty$  es también conocida por la diferencia de presión aplicada, y la ecuación 45 puede ser resuelta por métodos numéricos, como Runge-Kutta de 4to. Orden.

Nicolaou (1999) presenta resultados similares usando un tiempo adimensional con pequeñas diferencias. La presencia de la permeabilidad en el tiempo adimensional sugiere también la posibilidad de que la información de la distribución de tamaño de partículas puede ser incluida.

El valor de  $N=3+2\xi$  es relacionado a la estructura de poro y con la curva de presión capilar, lo cual significa que puede ser diferente por las diferentes distribuciones de tamaño de partículas.

Nicolaou (1999) llega por otras consideraciones a una ecuación similar, la cual puede ser usada para ajustar los datos actuales de cinética de deslicorización de una altura dada de torta y una diferencia de presión dada, para estimar el valor de  $S_\infty$ .

El modelo de Schubert y sus derivaciones necesitan el conocimiento de la permeabilidad, porosidad, presión capilar y alguna información sobre la permeabilidad relativa.

#### **3.4.1.2 Modelo de deslicorización con perfil de saturaciones de Nicolaou (1999)**

Este modelo pretende calcular de una forma más exacta los resultados de la deslicorización de tortas de diferentes alturas y a distintas diferencias de presión. Este modelo fue evaluado por Valentino (1997) y se basa en convertir la curva de presión capilar en una distribución de tamaño de poros. Con esta distribución de tamaño de poros, se aplica la ecuación de Hagen-Poiseuille a cada grupo de poros, lo que conduce a un nivel diferente en cada grupo en un tiempo dado. La integral para una altura dada corresponde a la saturación a esa altura, por lo que este modelo resulta en un perfil de saturación a lo largo de la torta.

Dada una torta totalmente saturada ( $S=1$ ), de altura  $h_c$ , mediante el uso de un medio filtrante y la aplicación de una diferencia de presión de gas  $\Delta P$ , esta es deslicorizada. De la fase de formación de torta se hallan experimentalmente características específicas del producto como son: porosidad ( $\varepsilon$ ), permeabilidad ( $P_c$ ), y altura equivalente de torta ( $h_{ce}$ ). Así mismo, también se tiene como resultado experimental la curva de presión capilar  $P_k = F(S)$ .

Algunas consideraciones importantes que se hacen en este modelo son:

1. Se tiene una variación local y temporal de la saturación en las tortas para cualquier altura y diferencia de presión. Esto es:

$$S = f(x,t) \quad \text{es decir,} \quad \bar{S} = f(t)$$

2. Se tiene una variación temporal del flujo de gas para cualquier altura de torta y diferencia de presión.

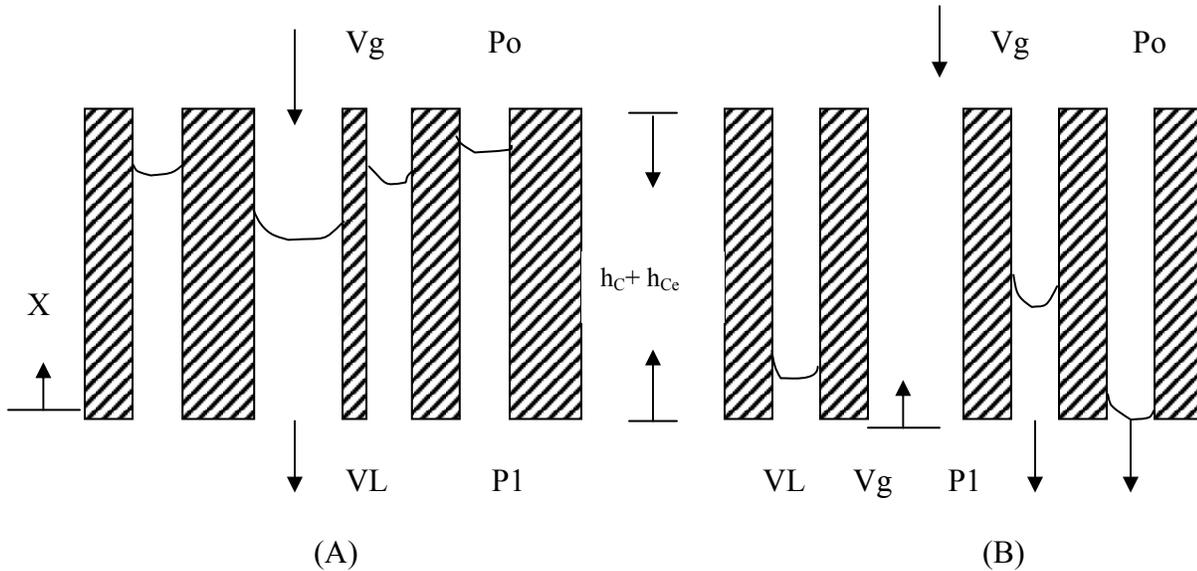
Adicionalmente, en este modelo se deben realizar las siguientes suposiciones:

1. La dirección de flujo es similar para ambas fases fluidas y tienen un comportamiento newtoniano. El régimen de flujo es laminar.
2. La influencia del medio filtrante se toma en cuenta a través de la altura equivalente de torta.
3. Se considera a la torta como un material homogéneo, isotrópico e incompresible.

La simplificación importante de que a lo largo de la torta no existe ningún gradiente de saturación no se hace en este modelo.

En este modelo se considera a la torta como un haz de capilares ininterrumpidos, que entre ellos no existe ninguna comunicación transversal, y que dicha torta posee una distribución de radios capilares que puede ser modelada. A través de la discretización de la distribución de radios capilares (estableciendo intervalos de radios de poros  $\Delta r$ ), resulta un número determinado de grupos capilares teniendo cada uno diferentes radios. Para cada radio capilar se puede conocer el número de capilares que lo conforman. Para el medio filtrante es supuesta la

distribución de radios de poro igual a la de la torta. La figura N°20 muestra el proceso de deslicorización presentado para este modelo.



**Figura N° 20 cinética de deslicorización en la torta modelo**

En un tiempo  $t_0=0$  es sometida a una diferencia de presión  $\Delta P$ , así empiezan a vaciarse los capilares, cuya presión capilar es más pequeña que  $\Delta P$ . Según la ley de Hagen-Poiseuille, los capilares más grandes se vacían más rápido que los capilares más pequeños. Una vez que la superficie del nivel de líquido de los grupos capilares con mayores radios alcanza el lado inferior de la tela ( $x=0$ ), empieza entonces el flujo de gas; el tiempo en el cual inicia el paso de gas se conoce como  $\tau$ . Para tiempos de deslicorización mayores, los grupos con radios capilares más pequeños serán vaciados y se incrementará también el consumo de gas. Se observa en la figura N°20-a que en la superficie de la torta, todos los poros con una presión capilar más pequeña que  $\Delta P$  se han empezado a vaciar. Esto significa que en la rebanada superior de la torta de espesor  $\Delta x$  se puede admitir que la saturación es la de

equilibrio  $S_{\infty}^*$ , sin embargo no es la saturación remanente  $S_r$ . Por otro lado, en la parte inferior de la torta modelo, todos los poros están todavía llenos de líquido. En la figura N°20-b se observa que los poros grandes están completamente vacíos y por tanto, en la parte inferior de la torta la saturación será también  $S^* < 1$ . con la ayuda del modelaje de las tortas como la mostrada en la figura N°20, se puede realizar el cálculo de la cinética de deslicorización por la indagación de la altura de nivel de líquido para cada grupo de poro y para cada tiempo de deslicorización originándose la llamada matriz de nivel de líquido.

Para un capilar, la verdadera fuerza impulsora para vaciar de líquido al mismo, es cuán alejada o mayor sea la diferencia de presión aplicada, respecto a la presión capilar que corresponde al tubo. La presión capilar para un tubo puede ser descrita a través de la ecuación de Laplace.

Según el modelo de Wyllie y Gardner la torta no está constituida por capilares continuos sino por capilares superpuestos y cada rodaja de torta posee la misma distribución de radios de poros. Este hecho permite considerar un radio efectivo de poro:

$$r_{ef} = r \sqrt{\varepsilon^* S^*} \quad (47)$$

Con la ecuación (47), la ecuación de Laplace (36) y teniendo en cuenta la influencia de la tela y del factor de forma (f), resulta la siguiente ecuación para el calculo de la disminución de nivel de líquido:

$$-\frac{dx_i}{dt} = \frac{f(\varepsilon^*)^2 r_i^2 (\Delta P - 2\sigma / r_i)}{8\mu_L X_i} S_{(x_i, t_j)}^{*2} \quad (48)$$

Esta ecuación no es resoluble analíticamente. Se hace por tanto necesaria la resolución numérica. Además, para simplificar esta expresión, se consideran los términos adimensionales indicados a continuación:

$$t_2^* = \frac{f(\varepsilon^*)^2 \gamma^2 t_2}{\mu_L Pke hc^2} \quad (49)$$

$$\Delta P^* = \frac{\Delta P}{Pke} \quad (50)$$

$$he^* = \frac{hce}{hc} \quad (51)$$

$$x^* = \frac{x}{hc + hce} \quad (52)$$

$$r_i^* = \frac{r_i}{r_{\text{máx}}} \quad (53)$$

Adimensionalizando la ecuación (48), se tiene que:

$$-\Delta x_{i,j}^* = \frac{r_i^* (\Delta P^* r_i^* - 1) \Delta t^*}{2x_{i,j-1}^* (1 + he^*)^2} S^{*2} \quad (54)$$

para esta ecuación  $i$  es el índice de grupos de radios de poro y  $j$  es el índice de tiempos.

Las condiciones de borde para las soluciones iterativas del problema son:

$$\begin{aligned} \text{Para } t=0 \quad x_{i,j=0}^* &= 1 \\ S_{j=0,k}^* &= 1 \end{aligned}$$

Esto significa, que la disminución de nivel de agua en el siguiente tiempo resulta como sigue:

$$-\Delta x_{i,j=1}^* = \frac{r_i^* (\Delta P^* r_i^* - 1) \Delta t^*}{2 (1 + he^*)^2} \quad (55)$$

para realizar las iteraciones es necesario que el intervalo de tiempo  $\Delta t$  sea lo más pequeño posible, de modo que con  $\Delta t=1s$  el intervalo es suficientemente pequeño. De esta forma, realizando los cálculos para cada grupo de radios de poro, se pueden obtener las dos primeras columnas de la matriz de nivel de líquido. La figura N° 21 muestra los valores que se pueden obtener para las 2 primeras columnas de la matriz para 6 grupos de radios de poro.

Para calcular la tercera columna de la matriz se necesita en primer lugar determinar el vector de saturación  $S^*_{j=1,k}$ . Este viene a ser la saturación para el tiempo  $t_1$  a diferentes distancias de la tela de filtro. Para ello se fracciona la torta en elementos de torta de espesor  $\Delta x$ . En estos elementos de torta hay un grupo de poro determinado que precisamente aún no ha sido vaciado. A este grupo de poro su correspondiente radio se conoce como un radio de poro fronterizo  $r_x$ . En el ejemplo de la figura N° 17 para la posición  $X^*=1$ , es decir, para la parte superior de la torta, el grupo de poro  $i=4$  precisamente aun no se ha vaciado.

	j=0	j=1	j=2	...	j=n	j=n+1	...
i=1	1	0.9	0.85	...	0	0	...
i=2	1	0.95	0.91	...	0.3	0	...
i=3	1	0.99	0.95	...	0.5	0.2	...
i=4	1	1	0.99	...	0.8	0.5	...
i=5	1	1	1	...	0.95	0.6	...
i=6	1	1	1	...	0.99	0.8	...

**Figura N° 21 Esquematización de una matriz de nivel de líquido ficticia.**

De ahí se tiene para la saturación en esta posición o altura el siguiente resultado:

$$S_{j=1,k=1}^* = \frac{N(r_4)\pi r_4^2 \Delta x + \dots + N(r_6)\pi r_6^2 \Delta x}{A\varepsilon^* \Delta x} \quad (56)$$

el número de capilares de un grupo de poros  $N(r_i)$  puede conocerse con la ecuación:

$$N(r_i) = \frac{\varepsilon^* A}{\pi r_{\max}^2} \lambda r_i^{*(\lambda-3)} \Delta r^* \quad (57)$$

De este modo el resultado general es:

$$S_{j,k}^* = \lambda \sum_{i=x}^n r_i^{*(\lambda-1)} \Delta r^* \quad (58)$$

o bien:

$$S_{j,k}^* = \lambda \int_{r_{\min}^*=0}^{r_x^*} r^{*(\lambda-1)} \Delta r^* \quad (59)$$

Por integración de la ecuación (59) se logra una fórmula sencilla para el cálculo de la saturación local:

$$S_{j,k}^* = r_x^{*\lambda} \quad (60)$$

Con la ayuda de esta ecuación se construye el vector saturación  $S_{j=1,k}^*$ . Así lo que queda por determinar es la disminución de nivel de líquido  $\Delta X_{i,j=2}^*$  con la ecuación (55). Se tiene entonces que mediante estos procedimientos progresivos finalmente se calcula en su totalidad la matriz de nivel de líquido  $X_{i,j}^*$  y la matriz de saturación  $S_{j,k}^*$ .

$$S^*_{j,k} = \begin{vmatrix} S^*_{0,0} & \dots & S^*_{0,1} \\ S^*_{1,0} & \dots & S^*_{1,1} \\ \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ S^*_{m,0} & \dots & S^*_{m,1} \end{vmatrix}$$

k=0, lado inferior de la tela, es decir, x=0

k=1, lado superior de la torta, es decir, x=hc+hce

Así, el primer objetivo que se debe alcanzar es el cálculo de la variación local y temporal de la saturación en la torta modelo.

### 3.4.1.3 Modelo de Wakeman

Recientemente Wakeman (2000) presenta una serie de gráficos de la saturación relativa contra un tiempo adimensional y el gráfico sólo exhibe una curva:

$$\hat{S} = f(\theta \cdot p_a^*) = f\left(\frac{K \cdot \Delta p}{\varepsilon \cdot \mu \cdot h_c^2 \cdot (1 - S_\infty)} \cdot t\right) \quad (61)$$

Donde:

$$p_a^* = \Delta p / Pke \quad (62)$$

Con la ecuación (61), se obtiene el valor de  $\theta p^*$  representado en el gráfico de Wakeman (en el eje x) con el cual se obtiene el valor de  $S_r$ , que viene dado por las siguientes ecuaciones:

$$\hat{S} = \frac{1}{1 + 1.08 \cdot (\theta p^*)^{0.88}} \quad \text{para } 0.096 \leq (\theta p^*) \leq 1.915 \quad (63)$$

$$\hat{S} = \frac{1}{1 + 1.46 \cdot (\theta p^*)^{0.48}} \quad \text{para } 1.915 \leq (\theta p^*) \leq 204 \quad (64)$$

Y de aquí, usando la ecuación original de  $S_r$ , podemos obtener el valor de  $S$  para que se pueda graficar Vs.  $T$  y así obtener la curva de cinética de deslicorización según el modelo de Wakeman.

Las similitudes de este gráfico y el sugerido de acuerdo a las modificaciones del modelo de Schubert son notables, la diferencia principal está que en el anterior la fuerza impulsora es representada por la diferencia entre la presión aplicada y la presión capilar de entrada (máxima fuerza impulsora). Por el contrario, el modelo de Wakeman necesita la información de permeabilidad, porosidad y presión capilar para hacer una predicción.

#### 4. ANTECEDENTES

Durante los últimos años se han desarrollado diversas investigaciones en el Laboratorio de Separaciones mecánicas de la Universidad Central de Venezuela (LSM-UCV), estos han permitido ahondar en el estudio de la relación que existe entre la estructura de la torta, sus características y las propiedades del proceso de filtración, además de haber influido en la comprensión del comportamiento de las partículas que forman un lecho por filtración.

De la misma manera algunos trabajos se han centrado en la influencia de la distribución de tamaños de partículas en el proceso de filtración, obteniéndose que los cambios en la distribución de tamaños de partículas pueden producir variaciones en la resistencia específica y porosidad de la torta, en la curva de presión capilar, en la rapidez de remoción de líquido de la torta y en el consumo de gas.

Bolívar M., en el año 1996 empezó a estudiar cinética de deslicorización en el LSM-UCV, produciendo la curva de remoción de líquido para conseguir los parámetros de deslicorización. Los objetivos fueron alcanzados realizando experiencias de deslicorización con diferentes condiciones de operación.

En esta investigación se propuso un modelo que predice la cinética de deslicorización a cualquier condición de operación y es capaz de simular la condición de equilibrio del proceso.

En el trabajo realizado por Bongiovanni (1998) en el LSM-UCV, se estudió el efecto de la segregación sobre los parámetros con los cuales se forma la torta de filtración, entre ellos la curva de presión capilar, la porosidad, etc. Este se basó en el estudio de tortas de carbonato de calcio segregadas formadas artificialmente.

De este ensayo se obtuvo que las tortas segregadas positivamente presentan una deslicorización precoz a bajas presiones y además posee una presión capilar relativamente superior al resto de las tortas, se infiere un efecto migratorio de las partículas finas con lo que el valor de la porosidad disminuye para este tipo de tortas. La segregación total negativa favorece la etapa de deslicorización, de una manera

efectiva, reduce a un mínimo la saturación remanente, la saturación de equilibrio, presenta velocidades de deslicorización más rápidas.

**Túnez y Márquez en 1998** elaboraron su trabajo especial de grado sobre la influencia de la amplitud y el tamaño promedio de la distribución de tamaño de partícula en la cinética de deslicorización de tortas de filtración de carbonato de calcio. Su trabajo fue desarrollado con fracciones con un tamaño promedio del conjunto de fracciones de 81.5  $\mu\text{m}$  que corresponde a la media aritmética; tamaño que se mantuvo constante en el diseño de todas las mezclas.

Las mezclas obtenidas fueron analizadas por difracción láser utilizando el equipo Mastersizer Micro. Túnez y Márquez realizaron un amplio estudio de las variables que afectan el proceso, seleccionaron una altura de la torta de 30 mm, ya que con las otras alturas usadas (<30mm), no fue posible definir una relación entre la distribución de tamaño de partículas y la cinética de deslicorización, ya que, en estas originan el fenómeno de reabsorción de la humedad.

**Gárces y Tabata en 1999** determinaron curvas experimentales de reducción de humedad para las fracciones estrechas y para cada grupo de mezclas. Prepararon fracciones de granulometría estrecha de carbonato de calcio, unas tamizado vía húmeda y el resto por medio de clasificación centrífuga, a partir de las cuales se diseñaron tres grupos de mezclas simétricas de tamaño promedio constante, variando la desviación estándar, para establecer la influencia de este parámetro en el proceso de deslicorización. Los parámetros que caracterizan estas fracciones fueron obtenidos por el equipo de medición de tamaño de partícula por difracción de rayos láser Mastersizer Micro.

Concluyeron que a medida que aumenta el tamaño promedio de las partículas que forman las tortas de filtración el consumo de gas en el equilibrio se hace mayor, la saturación de equilibrio alcanzada en las mismas se hace menor y la velocidad inicial de deslicorización de la torta formada aumenta. El proceso de deslicorización disminuye a medida que aumenta la desviación estándar de una distribución de tamaño de partícula, con un mismo tamaño promedio, obteniéndose saturaciones de equilibrio mayores y la velocidad inicial de deslicorización se hace menor. También

obtuvieron que existe una relación lineal entre la saturación de equilibrio alcanzada por una torta de filtración y la desviación estándar de la distribución de tamaño de partículas que la forman. Por último, en grupos de mezclas con distinto tamaño promedio y desviación estándar similar, la saturación de equilibrio es mayor si la desviación estándar aumenta.

Meza y Calzadilla analizaron el efecto que produce la asimetría de las mezclas sobre la cinética y el equilibrio de las tortas de filtración. Para ello prepararon dos grupos de mezclas a partir de fracciones puras de  $\text{CaCO}_3$ , con mediana constante y desviación estándar variable (sesgo negativo). La distribución del tamaño de partícula de las mismas se analizó por difracción láser y principio Coulter.

Con las mezclas elaboradas se realizaron pruebas de deslicorización en el equipo Filtratec - UCV. Las tortas a deslicorizar se formaron de manera homogénea por capas, para evitar la segregación de las partículas. Para cada curva de cinética se ejecutaron siete pruebas de deslicorización a tiempos diferentes, este procedimiento es llamado reducción de humedad puntual, con estos datos se obtuvieron las curvas de cinética y de equilibrio. Posteriormente se adimensionalizó las curvas de cinética con el método LSM.

Para probar modelos de correlación de datos adimensionales, con los cuales se puedan predecir las curvas de cinética se usaron tres ecuaciones de ajuste, una ecuación logarítmica y dos potenciales, obteniéndose con una de ellas, la cual tiene la misma forma de la ecuación de ajuste de las curvas de cinética propuesta por Nicolaou, se logra predecir las curvas de cinética con un error de  $\pm 20\%$ .

En este trabajo se probaron grupos adimensionales, con los cuales se pudieron agrupar los datos de las curvas de equilibrio y así obtener las correlaciones de ajuste que predigan el equilibrio de una mezcla en particular. Para esto se probaron dos grupos adimensionales para el cálculo de la presión en su forma reducida: uno que proviene de la ecuación de ajuste de la curva de presión capilar y el otro propuesto por Carman, el cual incluye el tamaño promedio ( $D_{3,2}$ ) como información granulométrica de las mezclas. Con ninguno de los dos grupos probados se consiguió agrupar totalmente los datos de equilibrio de la manera deseada.

**Sorrentino y Anlauf (2001)**, estudiaron sobre la predicción de cambios del comportamiento de la permeabilidad y humedecido del filtro, a través de la torta cuando varía la distribución de tamaño de partícula, presentaron una estrategia de reducción de datos que permiten predecir la permeabilidad y el comportamiento del humedecido basados en la ecuación de Carman-Kozeny a partir de experimentos seleccionados con carbonato calcio. De igual forma, introdujeron un nuevo factor de forma que correlaciona el diámetro medio superficie-volumen con el valor obtenido de la difracción láser que asume que las partículas son esféricas.

**El trabajo presentado por López y Pérez (2001)**, tuvo por objeto mejorar la estrategia desarrollada en el LSM-UCV para evaluar datos de cinética de deslicorización de tortas de filtración, mediante la incorporación de correlaciones entre distribución de tamaño de partículas y la curva de presión capilar. Así mismo se emplea el modelo propuesto por A.B. Yu y colaboradores para determinar la porosidad de partículas no esféricas a partir de la información granulométrica y finalmente, se evalúa la incorporación de dicho modelo a la estrategia de reducción de datos del LSM – UCV.

En cuanto a los análisis de porosidad, López y Pérez, encontraron que existe una marcada diferencia entre la porosidad obtenida en lechos de partículas homogéneas y el lecho de partículas segregadas. También se pudo determinar que para tamaños promedios pequeños la porosidad tiende a aumentar (incluso en fracciones estrechas) lo que indica que el material utilizado (carbonato de calcio) presenta importantes fuerzas electrostáticas en ese rango de tamaños lo que puede conducir a procesos de aglomeración.

**Recientemente Sorrentino (2002)**, ha presentado la correlación entre parámetros de la curva de presión capilar obtenidos mediante el uso de la distribución RRSB con las características de la DTP, lo cual permite estimaciones de la curva de presión capilar a partir de la Distribución de Tamaño de Partículas.

**En el trabajo presentado por Gloria Rojas en Mayo de 2002**, se obtuvo un importante aporte al este tipo de estudio, ya que se pudo obtener una relación directa

entre el  $D_{3,2}$  de la muestra y experimental y la porosidad de la misma con la permeabilidad, estableciendo que, una vez conocidos estos datos,  $D_{3,2}$  y porosidad de la mezcla se puede determinar la permeabilidad de la misma.

A través de este trabajo especial de grado, considerando los aspectos teóricos mencionados anteriormente y los avances obtenidos en dichos trabajos, se podrá estimar los parámetros necesarios para construir la curva de cinética de deslicorización ( $\xi$ ,  $P_{ke}$ ,  $S_r$ ,  $\varepsilon$ ,  $K$ ) a través de los modelos seleccionados, con el fin de hacer un análisis comparativo con los resultados experimentales obtenidos.

## 5. DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS

Los equipos a emplear durante el desarrollo de este trabajo especial de grado, se describen a continuación:

### 5.1. TAMIZADOR OSCILATORIO

El equipo mostrado en la figura N°22 será empleado en el tamizado del carbonato de calcio a granel, con la finalidad de obtener un tamaño nominal menor a  $125\mu\text{m}$ . El tamizador consta de un marco oscilante **a**, que dispone de una base **b**, donde son colocados y sostenidos los tamices **c**, mediante la barra aseguradora **d**. El conjunto se suspende mediante un eje **e**, manteniendo un movimiento oscilatorio lateral impulsado por un motor **f**, que es accionado por el interruptor **g** y transmitido a los tamices a través de un par de poleas **h**, conectadas por una correa **i**.

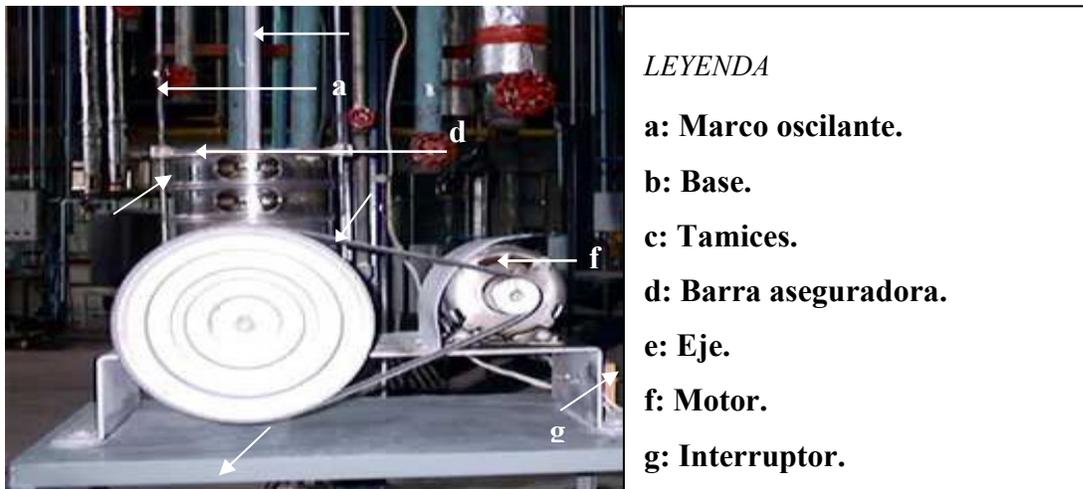


FIGURA N°22: Tamizador oscilatorio.

## 5.2 CLASIFICADOR CENTRÍFUGO ZIGZAG

El clasificador centrífugo zigzag se muestra en la figura N°23, este equipo permite la separación de fracciones estrechas en un rango comprendido entre 2,5 y 70 $\mu$ m, basado en el equilibrio de la fuerza centrífuga sobre un disco giratorio y la velocidad con la cual chocan las partículas arrastradas por un caudal de aire. El mismo está constituido por un motor **b**, donde se fijan las revoluciones **k**, haciendo girar un disco deflector **a**, que se encarga de separar las partículas contenidas en el recipiente **d**. El alimentador **j** permite la entrada de la muestra, arrastrándolas por medio de un caudal de aire medido en un rotámetro **c**, controlando por medio del regulador **h**, que dispone de un silenciador **i**. Las partículas finas se depositan en un recipiente **e** por medio de un ciclón **g**, y las gruesas en el recipiente **f**. El flujo de aire es liberado de las partículas finas por medio de un filtro **n** accionado por el ventilador **m**.

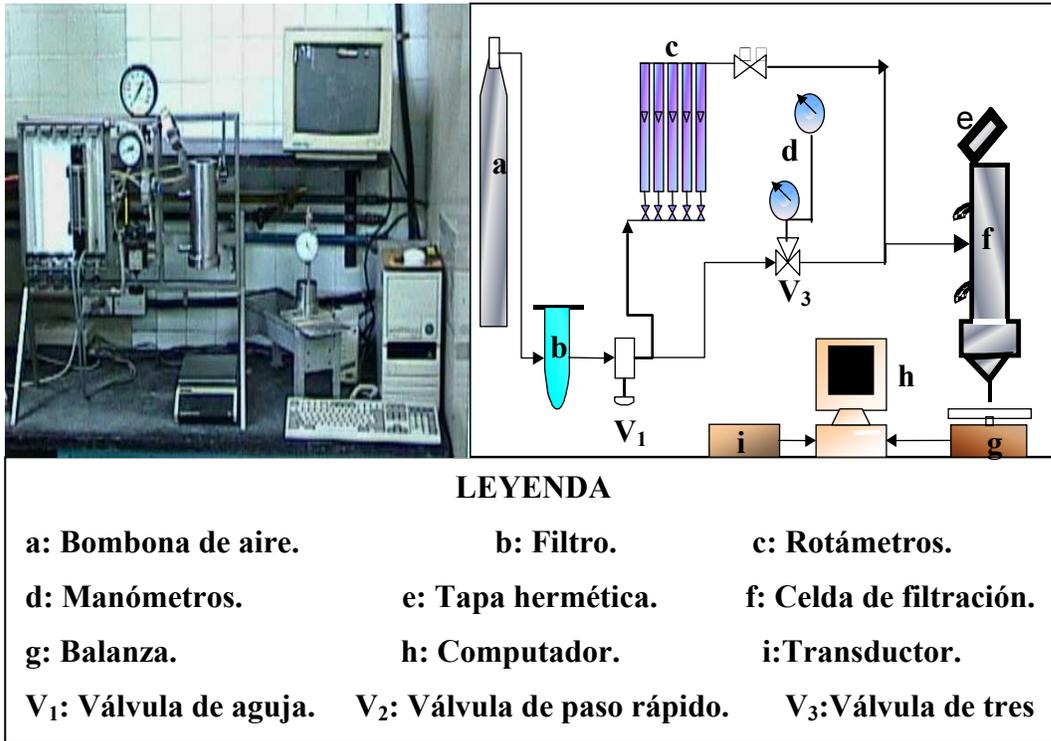


FIGURA N°23. Clasificador centrífugo zigzag.

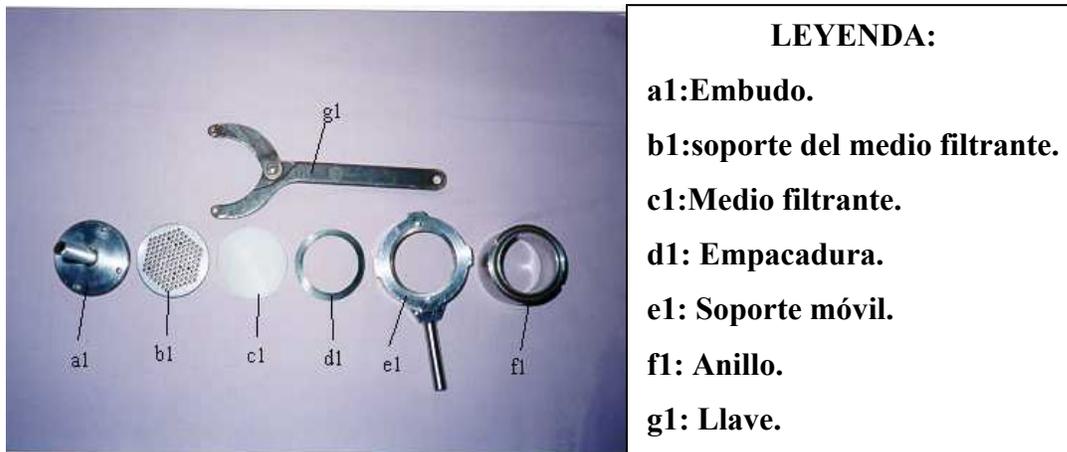
### 5.3 FILTRATEST-UCV:

El Filtratest-UCV mostrado en la figura N°24, corresponde al equipo donde se realizarán las pruebas de formación de torta. El equipo consta principalmente de una celda **f** transportable de filtración a presión, que corresponde a un cilindro vertical hueco de acero inoxidable de tapa hermética **e**, con un vidrio, que permite observar el interior. La celda está diseñada de doble pared con la finalidad de trabajar a temperaturas menores de 120°C, tiene una capacidad de 400 ml y un área de filtración de 19,63 cm<sup>2</sup>, donde pueden ser realizadas pruebas con tortas de hasta 50 mm de espesor. El cilindro de filtración está conectado a un sistema de aire comprimido, en su parte lateral superior, por medio de la cual se produce la diferencia de presión necesaria para la filtración. Este sistema está constituido por una bombona de aire comprimido **a**, cuya humedad e impurezas son retiradas por medio del filtro **b**, y su presión es regulada a través de la válvula de aguja **V<sub>1</sub>**, el caudal es alimentado a través de la válvula **V<sub>2</sub>** y puede ser medido en diferentes rangos por un conjunto de cinco rotámetros **c**, la presión de filtración de la celda es determinada a través de dos manómetros **d**, con diferentes rangos de medición de 0 a 1000 mbar y de 0 a 10 bar. Finalmente, un computador **h** recibe la información de las pruebas por medio de un transductor **i** que envía la señal de medición que registra la balanza **g** y el flotador del rotámetro empleado durante la prueba.

Por la parte interior de la celda se empalma un soporte móvil **e1**, en el que se apoyan, el anillo **f1** donde se forma la torta, una empacadura **d1**, el medio filtrante **c1**, un plato perforado **b1** que sirve de soporte al medio filtrante, un embudo **a1** por donde sale el filtrado y una llave para el desarme de las piezas **g1**, (ver figura N°25).



**FIGURA N°24 Filtratest-UCV.**

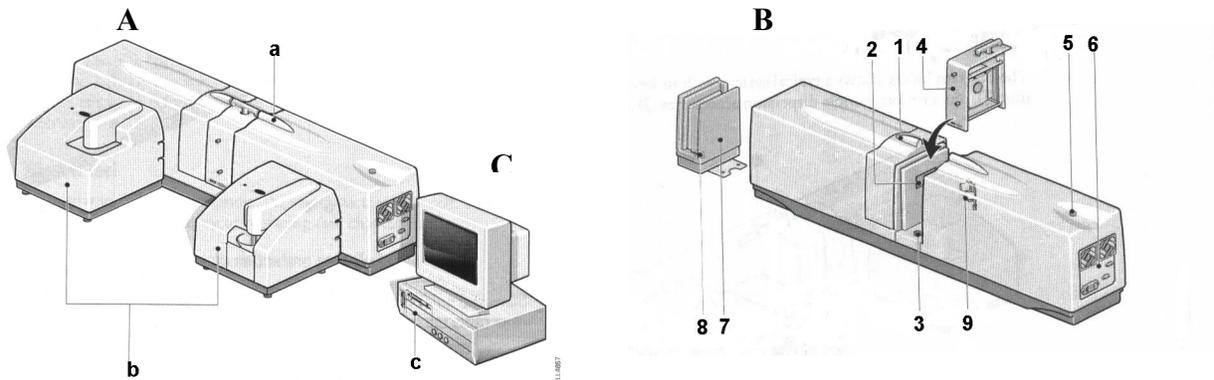


**FIGURA N°25: Sistema de piezas del Filtratest-UCV.**

#### 5.4 MASTERSIZER 2000

El Mastersizer 2000 es un equipo analizador de partículas en el rango comprendido entre 0.2 y 2000  $\mu\text{m}$  basado en el principio de difracción láser. El equipo está constituido por tres secciones mostradas en la figura N°26 :

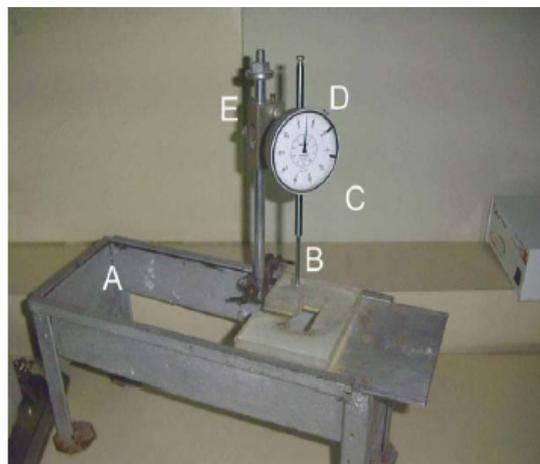
- La unidad óptica **(a)**: tiene como función generar y recolectar la información necesaria para el análisis y la medición del tamaño de las partículas.
- Accesorio de dispersión **(b)**: su objetivo es preparar la muestra y posteriormente llevarla a la unidad óptica para ser medida. Está constituida por 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 detectores 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°26: Mastersizer 2000**

### 5.5 MICRÓMETRO

El micrómetro es un instrumento que permite la medición de la altura de las tortas de filtración formadas y se muestra en la figura N°27. Este instrumento consta de un soporte o base (**A**), donde se ubica el objeto a ser medido, a través de un vástago móvil (**B**) que se manipula hasta colocarlo sobre la superficie de la torta para tomar la medida, la cual es leída en el indicador analógico (**C**), que arroja valores en milímetros con una apreciación de  $\pm 0,01$  mm. Para calibrar este instrumento, se manipulan los tornillos previstos para tal fin (**D y E**).



**Figura N°27 Micrómetro**

## 5.6 BALANZA CON SECADOR INFRARROJO

La balanza digital con desecador infrarrojo se muestra en la Fig. 28, se utiliza para determinar el contenido de humedad presente en una muestra y la masa de la misma. Por medio de este equipo la torta que se forma durante la filtración se seca uniformemente a una temperatura constante. La apreciación de la balanza es  $\pm 0.001$  g.

El equipo se enciende y se apaga mediante la tecla de mando principal (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.

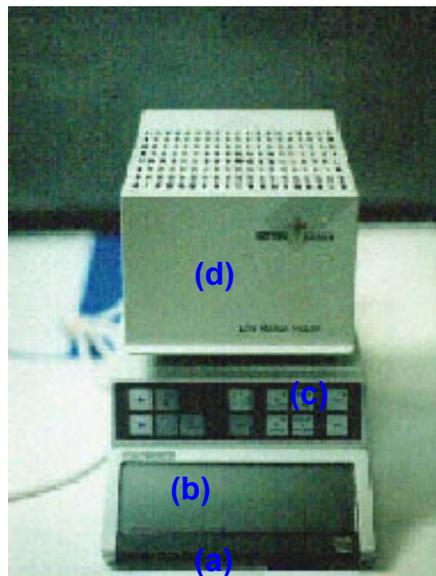


Figura N° 28. Balanza con desecador infrarrojo.

### 5.7 Divisor de muestras PT 1000

El divisor de muestras (Fig N°29) es empleado para dividir cuantitativa y cualitativamente una muestra a granel. El equipo consta de un embudo de alimentación (a) por el cual se alimenta la muestra que va a ser dividida, un dosificador (b) que regula la velocidad de entrada a la corona divisora, este tiene en el panel frontal los dispositivos de encendido, regulación de vibración (en porcentaje) y cronómetro de funcionamiento, una corona divisora (c) que gira a 800 rpm que cumple con la función de dividir la muestra, y en las ramas de ésta posee envases recolectores (d) 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.

En la base principal del equipo (e) se encuentra en su interior el motor que impulsa la corona giratoria. La base presenta un panel frontal que tiene los dispositivos de encendido y cronómetro de funcionamiento.

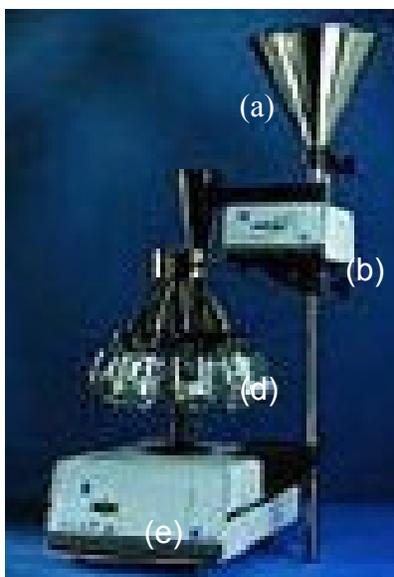


Figura N° 29. Divisor de muestra.

## 6. METODOLOGÍA

La metodología a emplear en este trabajo especial de grado está basada en la determinación de la información cinética de tortas formadas por filtración de carbonato de calcio de diferentes granulometrías en un rango de 10-90 micrones, para ello se obtendrán mezclas de diferentes fracciones de carbonato de calcio, garantizando de esta manera que los resultados que se obtengan, no estén parcializados hacia una granulometría específica, es decir, que dichos resultados puedan ser aplicados a cualquier granulometría de mezclas y/o fracciones de carbonato de calcio. Se dispone de carbonato a granel, el cual es pasado a través de un tamizador oscilatorio, para ser liberado de impurezas, posteriormente se hace pasar por un clasificador centrífugo, en el cual se obtienen las diferentes fracciones de carbonato, dependiendo de las revoluciones del equipo; en una hoja de cálculo de Excel se simula la mezcla esperada con la amplitud deseada, hasta obtener como resultado las fracciones másicas de cada una de las fracciones de carbonato de calcio de las cuales se dispone. Para este estudio se obtuvieron tres mezclas amplias con diferentes tamaños promedio de partículas ( $X_{50}$ ) de 13.3, 28.5, 87.7 para las mezclas denominadas mezcla amplia de 15, 30 y 80 respectivamente, estas mezclas se denominaron amplias, ya que poseen una desviación estándar de 2 a 3. Otro punto importante en este trabajo es la programación de los modelos de cinética seleccionados (Shubert modificado con solución de la ecuación por series y por el método numérico de Runge Kutta, Perfil de saturaciones de Nicolaou, y el modelo de Wakeman) para realizar las comparaciones necesarias.

Para ello es necesario la elaboración de tortas de filtrado que se obtendrán por capas compactas y por sedimentación en el equipo Filtratest –UCV (ya que se prevé que para distintos modos de preparar la torta el comportamiento sea diferente) trabajando con presiones de 100, 200, 400, 600, 800, 1000, 2000, 3000 y 4000 mbar para obtener una curva de presión capilar bien definida, con un número considerable de puntos experimentales que la describen de manera óptima, y a tiempos de

deslicorización de 10, 50, 100, 200 y 300 segundos para cada presión; el hecho de trabajar con un pequeño tiempo de deslicorización como lo es 10 segundos, es debido a que se encuentran trabajos realizados previamente, como el de Pérez-López (2001), donde se usó este tiempo de deslicorización, arrojando en este lapso tiempo una buena información de la curva de cinética de deslicorización.

Como se mencionó anteriormente cada una de las mezclas se deslicorizaba formando tortas de filtración de dos formas diferentes: una por capas compactas y otra por sedimentación siguiendo el procedimiento respectivo para cada una con excepción de la mezcla amplia de 80, con la cual sólo se formaron tortas de filtración segregadas; se consideró suficiente la información reunida hasta ese momento, lo que genera entonces un total de 80 tortas de filtrado para las mezclas de 15 y de 30 y 40 tortas para la mezcla de 80; es decir que para la obtención de datos en las pruebas de deslicorización se realizaron 200 tortas por filtración.

Este estudio es importante porque se determinan parámetros claves (permeabilidad, porosidad y curva de presión capilar), así como la variable a estudiar (cinética de deslicorización). Para obtener estos parámetros se medirán la masa húmeda de la torta de filtrado y la altura de la misma, la masa de la torta una vez que haya secado; con estos datos se determina la saturación de la torta para construir la curva de cinética de deslicorización, para cada mezcla a la presión correspondiente graficando la saturación contra tiempo de deslicorización. De esta curva, usando las saturaciones de equilibrio encontradas para cada presión, se construye la curva de presión capilar, calculando los parámetros de la misma por ajuste "Potencial" usando la ecuación N° 36 y ajustando según el modelo de "Rosín Rammler" usando un arreglo de la ecuación N° 39, una vez conocidos estos parámetros se puede predecir la cinética de deslicorización a través de los modelos descritos anteriormente.

Mediante estos ajustes se determinarán los parámetros experimentales, descritos anteriormente, necesarios para hacer comparaciones con los obtenidos teóricamente, cabe destacar que el parámetro de permeabilidad (K) se obtiene con información experimental de  $D_{3,2}$  de la mezcla y la porosidad de la misma, utilizando tablas

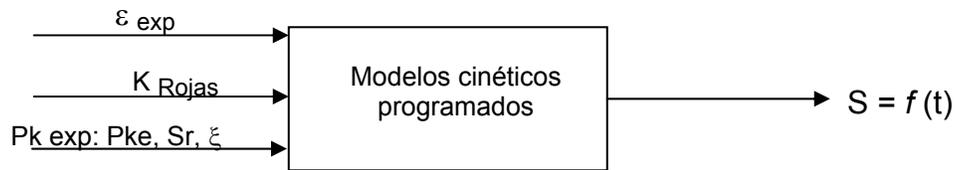
determinadas para tal fin en el trabajo especial de grado de Gloria Rojas, cabe destacar que el trabajo de Rojas se realizó en paralelo a éste, utilizando el mismo tipo de carbonato de calcio y mezclas formadas a partir de fracciones iguales a las que se usaron en este.

Posterior a esto se realizó la programación de los modelos cinéticos a través de hojas de cálculo de Excel, así como también el uso del paquete de programación Mathcad, así como también el uso del programa en el lenguaje de Turbo Pascal, desarrollado por Valentino (1997), del modelo de perfil de saturaciones de Nicolaou, y seguir entonces dos vías de estudio para completar el objetivo de este trabajo lo cual se resume en la figura N° 30.

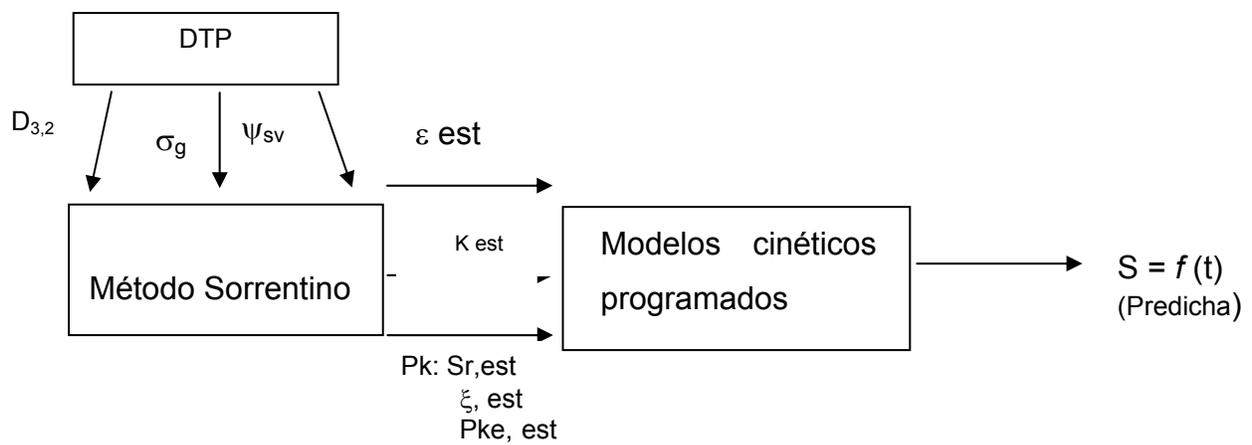
Primero se tiene que con los datos medidos experimentalmente de  $\varepsilon$ ,  $K$  y  $P_k$  se podrá obtener una primera predicción de la cinética, ya que al introducir dichos valores en los modelos se podrá graficar la saturación en función del tiempo (figura N° 30-A).

La segunda fase de este proceso (figura N° 30-B) se obtendrá a partir del estudio de distribución de tamaño de partículas (DTP) de las muestras que arrojan información del  $D_{3,2}$ ,  $\sigma_g$ ,  $\psi_{sv}$ , estos parámetros serán utilizados en el modelo de reducción de datos de Sorrentino, para predecir valores teóricos de  $\varepsilon$ ,  $K$  y  $P_k$ , que nuevamente serán introducidos en los modelos cinéticos programados para obtener una nueva gráfica de saturación en función del tiempo, esta vez con parámetros estimados.

Por último se compararán estos dos tipos de gráficos (experimentales vs. estimados) para estimar cual de los modelos cinéticos programados es el más adecuado para la predicción de la cinética de deslicorización.



(A) Uso de parámetros básicos obtenidos experimentalmente



(B) Uso de parámetros básicos estimados según Sorrentino

Figura N° 30 Metodología

## 7. PLAN DE EXPERIENCIAS.

- **Diseño de mezclas**

El diseño de las mezclas se lleva a cabo a través de una hoja de cálculo Excel ® donde se introducen como datos las especificaciones de la mezcla deseada, en cuanto a granulometría y también los datos granulométricos de las fracciones, que se tienen disponibles para la elaboración de dicha mezcla, la hoja de cálculo realiza un balance de masa entre las fracciones, y haciendo iteraciones hasta obtener los valores granulométricos de la mezcla deseada a través del método de Newton, arroja los porcentajes máxicos de las fracciones estrechas que se necesitan para formar una mezcla deseada.

Una vez obtenidos los porcentajes máxicos de la mezcla, ésta es preparada agregando los porcentajes máxicos de cada fracción encontrada en la hoja. Su granulometría se determina en el Masterziser-2000, si corresponde con la granulometría deseada se procede a preparar la cantidad deseada de mezcla para realizar los respectivos estudios, en caso contrario se procede nuevamente al pesado de las fracciones que componen la mezcla deseada y se repite el análisis granulométrico hasta que la mezcla preparada, coincida con la simulada que es la esperada, ya que esta hoja de cálculo de simulación está diseñada de tal manera que la mezcla preparada sea igual a la simulada, cualquier diferencia puede deberse a errores en el pesado de las fracciones.

- **Pruebas exploratorias**

Se hicieron pruebas de deslicorización en el equipo Filtratest-UCV para una mezcla amplia gruesa y para una fracción de finos de carbonato de calcio con la finalidad de desarrollar destrezas en la operación del equipo para el estudio de la cinética, se trabajó con un rango de presiones de 3000 mbar, a 100 mbar y para cada presión se deslicorizó por

tiempos de 10 , 50, 100, 200 y 300 segundos lo que constituye un total de cinco tortas de filtrado para cada presión y un total de cuarenta tortas de filtrado para cada muestra. A todas estas tortas de filtrado se les determinó la altura en seis puntos diferentes para obtener un promedio, además de la masa de la torta humedad y la masa de la torta seca. Con estos datos se calcula la saturación y se construye la curva de cinética de deslicorización para cada muestra, y a su vez la curva de presión capilar.

Cada una de las mezclas se deslicorizaba formando tortas de filtración de dos formas diferentes una por capas compactas y otra por sedimentación siguiendo el procedimiento respectivo para cada una.

- Determinación de la porosidad

Con los datos extraídos para la construcción de la curva de presión capilar (masa de torta húmeda y de torta de seca y altura de la torta de filtrado) a través de la ecuación N° 20 se determina la porosidad experimental. Para determinar la porosidad denominada como teórica se siguió el modelo de Yu, el cual se encuentra en una hoja de cálculo de Excel, y requiere como datos la granulometría de la mezcla, así como la forma de preparación de la torta (segregada u homogénea) obteniéndose como resultado la porosidad teórica.

- Determinación de la cinética de deslicorización

Con los valores obtenidos de las mediciones realizadas a las tortas de filtración (altura, masa, etc.) se realizan los cálculos de porosidad y humedad que serán utilizados para el cálculo de la saturación, los cuales serán graficados en función del tiempo de deslicorización y así obtener la curva de cinética.

- Determinación de la curva de presión capilar

A partir de la curva de cinética de deslicorización, se obtienen los valores de saturación de equilibrio para cada una de las presiones de deslicorización, esos valores, conforman los puntos experimentales de la curva de presión capilar, la cual se construye con Presión capilar ( $P_k$ ) versus Saturación. Posteriormente se realizan

dos tipos de ajuste de los valores experimentales el primero, denominado potencial, donde se calcula el término  $P_k$  (calculado), a través de la ecuación N° 36 y se grafica versus la saturación, cabe destacar que los parámetros  $\xi$ ,  $S_r$ , y  $P_{ke}$  se determinan utilizando la herramienta Solver de Excel, hasta que su diferencia con la real sea mínima de la misma manera se ajustan los datos experimentales con el modelo de Rosín Rammler utilizando la ecuación N° 38 y utilizando  $P_k'$  en lugar de  $P_{ke}$ .

- Programación de los modelos cinéticos:

En primer lugar se seleccionaron los modelos de cinética de deslicorización a estudiar, estos fueron: el modelo de Shubert modificado, resolviéndose, por dos métodos numéricos matemático: por series y por Runge Kutta, el modelo de perfil de Saturaciones de Nicolaou, y el modelo gráfico de Wakeman, cabe destacar que los programas, de los modelos de Shubert modificado (solución por series) y el de Nicolaou, se encontraron disponibles (Valentino, 1997), en el lenguaje turbo pascal, la programación del modelo de Wakeman se llevo a cabo en una hoja de cálculo de Excel, este modelo fue programado a través de las ecuaciones N° 61-64, al que se le suministran los siguientes datos  $\Delta P$ ,  $\varepsilon$ ,  $K$ ,  $h_c$ ,  $S_\infty$ , y  $\mu$ , arrojando como resultado la saturación para cada instante de tiempo (curva de cinética de deslicorización).

Estos modelos, serán usados suministrándoles datos experimentales, como se describió anteriormente, y además suministrándole datos que se han denominado estimados, a partir de la información granulométrica, como lo son:  $\varepsilon$  a través del modelo de Yu,  $K$  con las tablas generadas en el trabajo especial de grado de Rojas (2002), y los parámetros  $S_r$ ,  $\xi$  y  $P_{ke}$  a través de las ecuaciones propuestas por Sorrentino, en las cuales correlaciona los parámetros del ajuste por Rosín Rammler con las características granulométricas de las mezclas (ver ecuación N°40 y fig. N°14,15 y16).

Posteriormente una vez realizadas las corridas de los programas con datos experimentales y estimados se hará un análisis comparativo, con respecto a la

predicción de la cinética de deslicorización a partir de parámetros predichos, así como también la selección del modelo que mejor se ajuste la cinética de deslicorización.

## 8. ANÁLISIS DE DATOS

A continuación se describe la secuencia llevada a cabo para obtener los datos experimentales de las diferentes pruebas realizadas, así como también su respectivo análisis; de la misma manera se mencionan los problemas de operación que presentaron los equipos en la elaboración de las experiencias, y la forma como se solventaron los mismos.

### 8.1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO.

Resulta de gran importancia conocer las características de la distribución de tamaño de partículas (DTP) de las fracciones a emplear en la preparación de las mezclas, ya que el conocimiento de estas características granulométricas permiten la simulación de su diseño en la hoja de calculo Excel, así como también predecir los parámetros de la curva de presión capilar.

#### 8.1.1 Distribución de tamaño de partículas (DTP) para las fracciones puras.

Las fracciones utilizadas en este trabajo están constituidas por un grupo de ocho fracciones gruesas que van desde 38  $\mu\text{m}$  hasta 125  $\mu\text{m}$  identificadas así con el tamaño nominal promedio del tamiz por medio del cual se separaron y un grupo de seis fracciones finas que abarcan un rango de 3000 a 17000 rpm, representadas de esta manera con el número de revoluciones por minuto con el que se obtuvieron en el clasificador centrífugo (ver apéndice A ).

La distribución de tamaño de partículas de estas fracciones se obtuvo en el equipo Masterziser 2000 y los resultados se presentan en la figura N°31 como distribución de frecuencia acumulada ( $F(x)$ ). En la misma se puede apreciar que las curvas de frecuencia acumulada para fracciones mayores a 38  $\mu\text{m}$  (gruesas) son paralelas entre sí, debido a que las desviaciones estándar geométricas son similares, al igual que para las fracciones menores a 38  $\mu\text{m}$  (finas); sin embargo, al comparar las fracciones gruesas con las finas no se nota un comportamiento paralelo tan marcado debido a que dichas desviaciones entre gruesas y finas presentan diferencia lo cual no las aleja de ser estrechas entre sí.

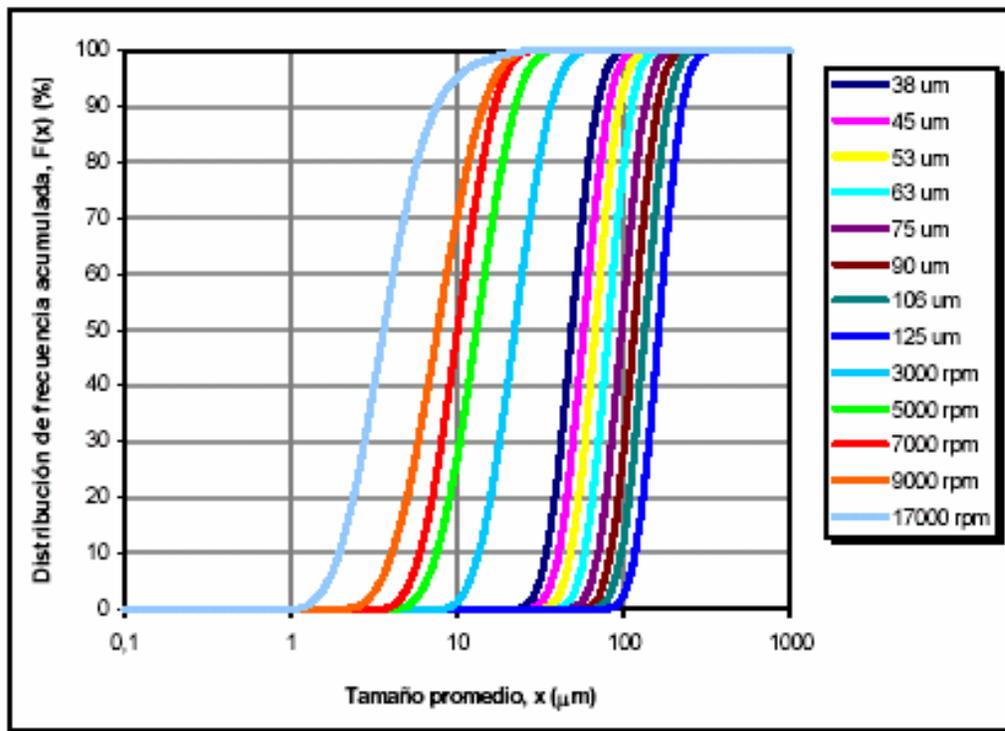


Figura N° 31. Distribución de tamaño de partículas de las fracciones

#### 8.1.2. Distribución de tamaño de partícula (DTP) para las mezclas.

Seguidamente se presenta la distribución de tamaño de partículas (DTP) de las mezclas diseñadas para el estudio de este trabajo especial de grado, comprendido por tres mezclas amplias con diferentes granulometrías, dichas mezclas fueron diseñadas en una hoja de calculo de Excel programada para tal fin en el LSM-UCV. Para cada una de estas mezclas se varió el tamaño promedio ( $x_{50}$ ), cubriendo un rango de  $10 \mu\text{m}$  a  $90 \mu\text{m}$  de media, así mismo, se trabajó con mezclas amplias, es decir, con desviaciones estándar geométricas entre 2 y 3, estas características se presentan en apéndice A. Para la formación de las mezclas se utilizaron las trece fracciones estrechas seleccionadas.

### 8.1.2.1 Distribución de tamaño de partícula (DTP) de las mezclas diseñadas.

Una vez obtenidas las fracciones másicas que conformarán la mezcla, se obtuvo esta, y se realizó el estudio granulométrico a las tres mezclas diseñadas, a través de la técnica de difracción láser, en el equipo Mastersizer 2000, para verificar que las mezclas preparadas correspondían con las mezclas definidas en la hoja de cálculo. En la figura N° 32, se representa la granulometría de las mezclas obtenidas en el Mastersizer 2000.

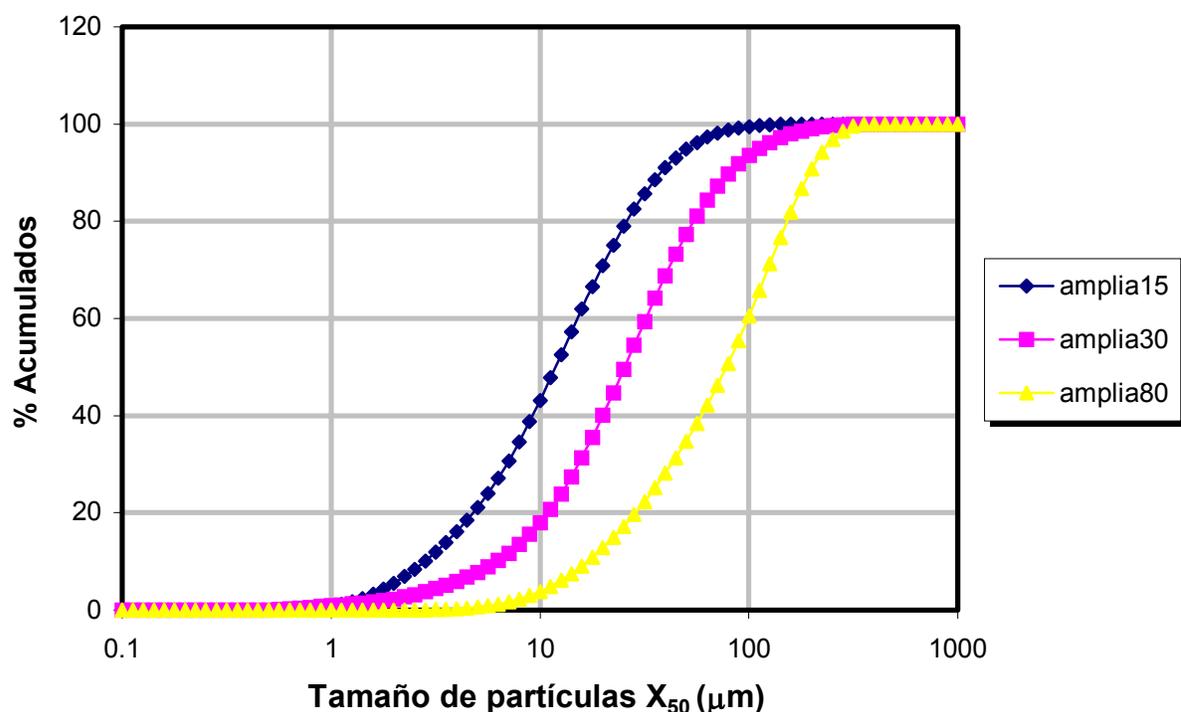


Figura N° 32 . Curva de Frecuencia acumulada de las mezclas diseñadas

### 8.2. OBTENCIÓN DE LOS DATOS PARA LAS CURVAS DE CINÉTICA DE DESLICORIZACIÓN Y PRESIÓN CAPILAR.

Las experiencias para obtener los datos para construir las curvas de cinética de deslicorización y curvas de Presión capilar fueron ejecutadas en el equipo Filtratest – UCV, descrito anteriormente en la sección N°5.3; dichas pruebas se aplicaron a un grupo de tres mezclas, formando tortas de filtración por capas compactas u homogéneas, llamadas de esta manera por la forma como se orientan

las partículas después de aplicarle ligeros golpes a la celda donde se prepara la torta; y tortas de filtración formadas por sedimentación, las cuales por su baja concentración también se les identifica como segregadas (ver apéndice B). A cada una de las tortas de filtración se les realizaron mediciones de: masa de la torta húmeda y masa de la torta seca, empleando para ello la balanza con desecador infrarrojo y altura de la torta en seis puntos distintos que posteriormente fueron promediados obteniéndose el valor de altura de la torta, utilizando el micrómetro (sección 5.5).

Las tortas de filtración que presentaron mayores problemas de obtención de datos eran aquellas que tenían mayor cantidad de finos, ya que estas quedaban muy saturadas cuando se filtraba a presiones bajas (desde 100 mbar hasta 1000 mbar), por lo que resultaba difícil realizar la medición de altura, lo cual pudo generar errores; fue ésta la razón por la cual se despreciaron las pruebas a la presión de 100 mbar en la mezcla amplia de 15 y de 30. Paralelo a esto se pudo observar que durante la formación de tortas homogéneas, ocurre mayor número de inconvenientes que en la elaboración de tortas segregadas, que podrían traducirse en errores, que se producen cuando se hace pasar la mezcla a través del divisor de muestra PT-100 (sección 5.7), y parte de la masa queda adherida en las paredes del equipo, cabe destacar que esto se produjo con mayor connotación en las mezclas con menor tamaño promedio de partículas.

Otro punto del proceso en el cual se pierde masa es durante la formación de la torta, en el cual la celda donde es preparada, es ligeramente golpeada, y a su vez separada levemente del soporte al producirse cada golpe, saliéndose parte del carbonato que ha estado en contacto con el agua, por la parte inferior de la misma.

Cuando se elaboran las pruebas cuyos tiempos de deslicorización son muy pequeños (10 seg.), las tortas formadas, poseen una alta saturación, lo cual hace que las mediciones de altura de las mismas sean menos precisas, esto se agrava cuando además se realizan pruebas a bajas presiones de deslicorización (100, 200 mbar).

En la mezcla amplia de 80 (MA-80) puede notarse que al ser sometida a una presión baja (100 mbar), se obtuvo una saturación mayor que 1 lo cual teóricamente,

es imposible, esto puede justificarse al hecho de la imprecisión que se tuvo al momento de medir la altura de la torta ya que esta se encontraba muy húmeda.

Cuando se llevó a cabo el proceso de deslicorización a presiones altas ( $> 1000$  mbar) en algunos casos dependiendo de la mezcla, mientras mayor fuese el tamaño promedio de partículas, se pudo observar que para el tiempo máximo de deslicorización (300 s), se estaba produciendo secado de la torta, esto podía notarse en la tendencia de los puntos experimentales de la curva de cinética de deslicorización, en donde se notaba una caída brusca en la saturación, en estos casos se tomó como tiempo máximo de deslicorización 250 s y 200 s como tiempo infinito de deslicorización, dependiendo del caso. Es necesario destacar que el efecto de secado en las tortas de filtración existe, es representativo y ocurre debido a que el flujo de gas que pasa a través de ella por un tiempo determinado es tal que además de producir la deslicorización de la torta al finalizar este, comienza el proceso de secado de la misma; en el proceso de secado se conjugan dos variables como lo son el tiempo y la presión de operación y a medida que se trabaja a presiones mayores el secado ocurre en menor lapso de tiempo. Debido a lo expuesto anteriormente, para obtener el mejor ajuste en las curvas de cinética de deslicorización se excluyeron en algunos casos puntos experimentales que estaban fuera de la tendencia de los demás, es decir, como se dijo anteriormente, donde se reportaba una caída irregular de la saturación de la torta de filtrado en un tiempo determinado.

Con respecto a las tortas formadas por sedimentación, se originaron dificultades al momento de las mediciones, al igual que para el caso anterior en las tortas de filtración con mayor cantidad de finos ya que eran las más saturadas; esta razón en combinación con el hecho de que las tortas preparadas por sedimentación generalmente eran muy irregulares originaron complicaciones al momento de realizar las mediciones de altura, acarreado consigo posibles errores.

Las pruebas exploratorias realizadas permitieron solventar problemas correspondientes al desempeño del equipo, que pudieron haber generado errores en las experiencias, como por ejemplo, la fuga de aire que se encontraba en el trayecto de la línea antes de llegar al manómetro para rango de presiones bajas (0 – 1000 mbar), que pudo haber alterado los datos a la hora de leer la diferencia de presión aplicada, de igual manera el escape de gas que se produjo en la línea cuando se operaba a presiones mayores a 1000 mbar.

Como se ha mencionado anteriormente, la curva de presión capilar se construye a partir de las saturaciones de equilibrio haciendo dos tipos de ajuste, un ajuste potencial donde se usó como restricción para el parámetro  $\xi$  que dicho valor estaría entre 0 y 1, debido a que presenta una indeterminación cuando  $\xi$  es igual a uno. Sin embargo en algunos casos (MA-80 sedimentada y MA-15 por capas), dicho rango de restricción hubo que ampliarlo hasta 2, obligado a la amplitud de las mismas, ya que el modelo arrojaba como solución una  $S_r$  mayor que la saturación experimental a la mayor presión capilar.

### **8.3 OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS REQUERIDOS POR LOS MODELOS DE CINÉTICA DE DESLICORIZACIÓN.**

Todos los modelos empleados en este trabajo tienen como similitud el uso de los mismos parámetros para su resolución y por consiguiente, para la descripción de la cinética de deslicorización.

Estos parámetros o propiedades son: permeabilidad ( $K$ ), porosidad ( $\varepsilon$ ), saturación irreducible o remanente ( $S_r$ ), la curva de presión capilar que aporta el valor de presión capilar de entrada ( $P_{ke}$ ) y el parámetro de distribución de tamaño de poro ( $\xi$ ). Estos parámetros son obtenidos por diferentes vías, como se explica en la sección de metodología. Estas vías son: ajuste potencial de los datos experimentales, ajuste de datos a través de Rosín-Rammler y estimación de los mismos a través de las ecuaciones propuestas por Sorrentino (2002).

En el caso de la permeabilidad, era necesario realizar unas pruebas experimentales, pero tomando como referencia trabajos anteriores (Rojas, 2002; Sorrentino, 2002) que aportaron un avance en la predicción de este parámetro; no se tuvo la necesidad de realizar dichas pruebas. Por lo tanto la obtención de este parámetro se hizo a través de la modificación de la ecuación de Karman-Cozeny propuesta por Sorrentino (2002), que describen muy bien el comportamiento de la permeabilidad en mezclas de carbonato de calcio como las usadas en este trabajo. Los resultados de este parámetro se presentan en el apéndice F.

Las diferencias en los demás parámetros serán señaladas en la siguiente sección.

#### **8.4 MODELOS DE CINÉTICA DE DESLICORIZACIÓN**

Se descarta el uso del modelo de Schubert propuesto con resolución por serie (programado en Turbo Pascal), a pesar de que la solución era prácticamente la misma (pequeñas diferencias en ciertos valores), ya que es necesario pensar en la cantidad de error que se puede cometer al resolver el modelo por series, debido a que la misma puede ser truncada en cualquier cantidad de términos lo cual aumentará o disminuirá el error dependiendo de cuantos términos se agreguen o quiten a la serie.

También se compara la ventaja entre el uso de Mathcad y Turbo Pascal, donde se hace clara la decisión de descartar el programa de Turbo Pascal, ya que Mathcad es compatible con office lo que hace más fácil y rápida la comprobación de los modelos. Es importante señalar además, que para el modelo de Perfil de Saturaciones (programado en Turbo Pascal), fue necesario que las curvas obtenidas se suavizaran, ya que es una pequeña limitación del programa, que dichas curvas se grafiquen con ciertas fluctuaciones en su recorrido.

## 9. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos durante la elaboración de este trabajo especial de grado, así como la discusión de los mismos, siguiendo el plan de experiencias propuesto en la sección N° 7.

### 9.1 CINÉTICA DE DESLICORIZACIÓN

Las pruebas de cinética de deslicorización se elaboraron en el equipo Filtratest - UCV, detallado en la sección N° 5; usando una masa de 60 grs. de las mezclas diseñadas de carbonato de calcio, para producir tortas de filtración de una altura aproximada de 20 mm. Dichas tortas fueron formadas de dos modos: por capas compactas de las cuales se tienen tortas homogéneas y por sedimentación obteniendo tortas segregadas. Para las mezclas MA-30, MA-15 diseñadas se trabajó para diferencias de presión, desde 0.2 hasta 4 bar, para la MA-80 desde 0.1 hasta 3 bar y a cinco tiempos de deslicorización desde 10 hasta 300 seg.

La cinética de deslicorización se produjo graficando la saturación vs. el tiempo de deslicorización tal como puede apreciarse en las figuras N°33 y N°34, ajustando los valores de saturación por el modelo propuesto por Nicolaou (1999), a través de la siguiente ecuación:

$$S = (1 + a.t)^{-b}$$

donde los valores de las constantes “a” y “b” son diferentes para cada presión y mezcla; además dicho ajuste permite estimar la saturación de equilibrio para cada

presión. En las figuras N°33 y N°34, también se puede observar que la saturación disminuye a medida que transcurre el tiempo, para cada diferencia de presión aplicada.

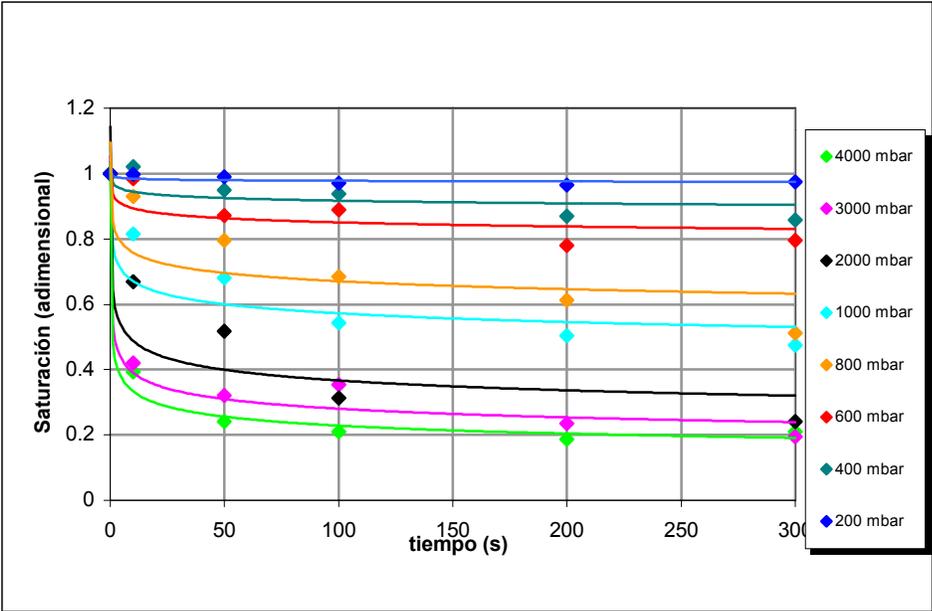
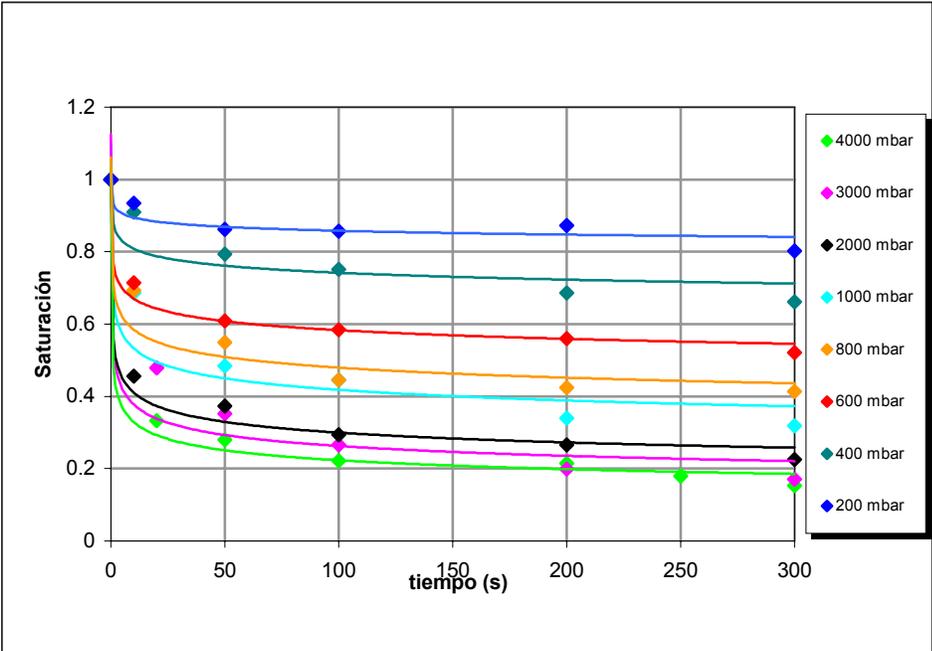


Figura N°33 . Curvas de cinética de deslicorización para la mezcla amplia de 30, homogénea.



---

---

**Figura N°34 . Curvas de cinética de deslicorización para la mezcla amplia de 30, segregada.**

Al comparar ambas figuras se puede apreciar, en la saturación de equilibrio ( $S_{\infty}$ ), que a una misma presión se alcanza una mayor saturación para las tortas formadas por capas, lo que corresponde a una saturación menor para las tortas formadas por sedimentación, esto se debe a que las partículas de las tortas formadas por capas se compactan y empaquetan de forma más densa, pues las partículas finas o de menor diámetro se introducen en los espacios existentes entre las partículas de mayor diámetro produciendo mayor retención de líquido, necesitando de una mayor presión capilar de entrada para la reducción de la saturación.

## **9.2 CURVA DE PRESIÓN CAPILAR**

Una vez obtenidas las curvas de cinética de deslicorización se tiene la información necesaria para construir la curva de presión capilar, que estará constituida por los puntos experimentales que corresponden a la saturación de equilibrio alcanzada en cada curva de cinética de deslicorización.

### **9.2.1 Estimación de los parámetros de la curva de presión capilar.**

Los parámetros básicos de la curva de presión capilar ( $S_r$ ,  $P_k$  y  $\xi$ ) son estimados a través del modelo "potencial", de "Rosín Rammler" y Sorrentino (2002) como sigue a continuación. Los cálculos tipo y representaciones gráficas correspondientes a esta sección se encuentran en el apéndice D.

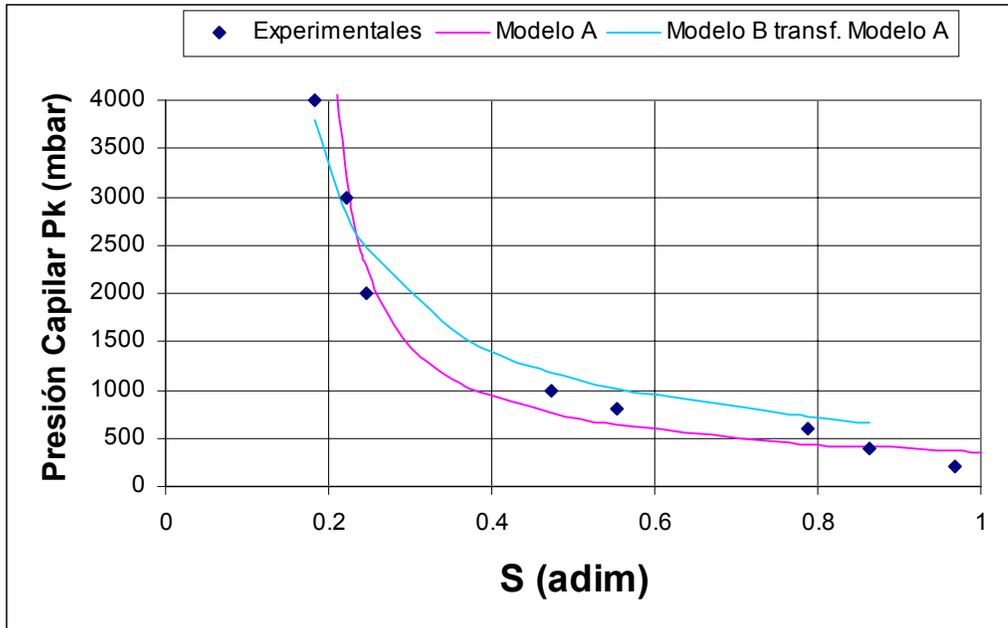
#### **9.2.1.1 Modelo A: Potencial.**

Para determinar los valores de los parámetros de la curva de presión capilar se empleó el modelo potencial donde se ajustan los puntos experimentales de la curva de presión capilar a la siguiente ecuación.

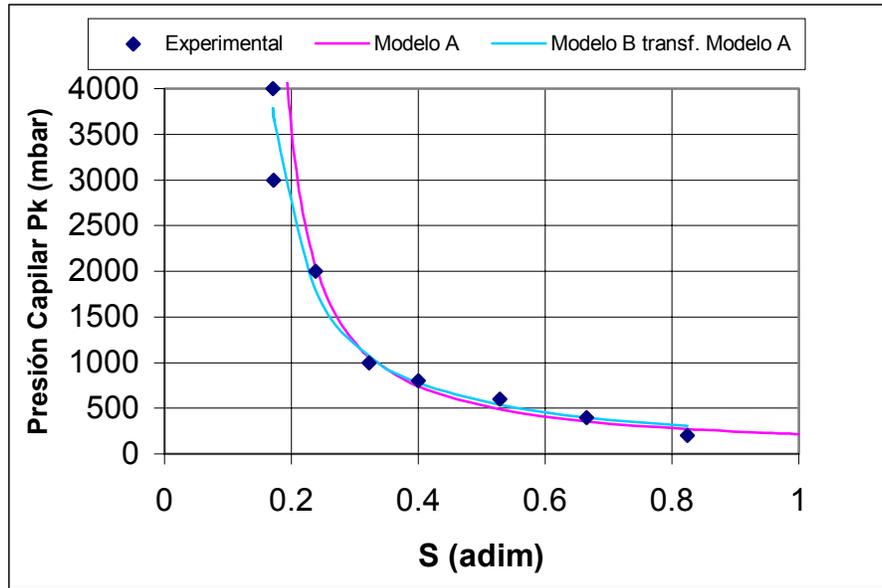
$$Pk = Pk_e \left( \frac{S_\infty - S_r}{1 - S_r} \right)^{-\xi}$$

Dejando como parámetros ajustables el valor de la saturación remanente ( $S_r$ ), la presión capilar de entrada ( $Pk_e$ ) y el factor de distribución de tamaño de poro ( $\xi$ ).

Este modelo se aplicó a las tres mezclas diseñadas, preparadas de forma homogénea y sedimentada, obteniendo las representaciones de la curva de presión capilar para la saturación de equilibrio, como se muestran en las figuras N°35 y N°36.



**Figura N°35. Curvas de presión capilar para la mezcla amplia de 30, homogénea empleando el modelo A y el modelo B transformado a modelo A, con parámetros básicos experimentales.**



**Figura N° 36. Curvas de presión capilar para la mezcla amplia de 30, segregada empleando el modelo A y el modelo B transformado a modelo A, con parámetros básicos experimentales.**

En esta figura puede observarse que la línea de ajuste pasa por casi todos los puntos experimentales, es decir, se ajusta muy bien a dichos valores. Para una mejor visualización de los resultados obtenidos se muestran los valores de los parámetros en las tablas N°6 y N°7.

Tabla N°6. Parámetros de la curva de presión capilar para tortas de filtración homogéneas por el ajuste potencial.

Mezclas	Distribución del tamaño de poro, $\xi$ (Adim)	Saturación remanente, $S_r$ (adim)	Presión Capilar de entrada, $P_{ke}$ (mbar)
MA-15	0,9999	0,2467	433
MA-30	0,7250	0,1823	356

**Tabla N°7. Parámetros de la curva de presión capilar para tortas de filtración segregadas por el ajuste potencial.**

<b>Mezclas</b>	<b>Distribución del tamaño de poro, <math>\xi</math> (Adim)</b>	<b>Saturación remanente, <math>S_r</math> (adim)</b>	<b>Presión Capilar de entrada, <math>P_{ke}</math> (mbar)</b>
<b>MA-15</b>	1.0092	0.3652	173
<b>MA-30</b>	1,0000	0,1478	218
<b>MA-80</b>	1.3103	0.1558	86

De acuerdo a estos resultados, en cuanto a la presión capilar de entrada ( $P_{ke}$ ) se puede observar que esta es de mayor magnitud mientras disminuye el tamaño promedio de las partículas, esto se atribuye a que, a medida que disminuye el tamaño de las partículas la presión que tiene que vencer el gas para desplazar el líquido retenido en los poros debe ser mayor. De igual manera al comparar la presión capilar de entrada de las tortas de filtración homogéneas y sedimentadas, esta es mayor para las tortas homogéneas ya que las partículas se organizan de forma más densa o compacta disminuyendo los poros; por lo que se hace necesario aplicar más presión para vaciar los mismos, lo contrario ocurre con las tortas de filtración sedimentadas; donde por la segregación los poros son de mayor tamaño.

Las tortas de filtración con mayor saturación remanente son las formadas por segregación ya que son más porosas (ver Tabla N°14) y retienen mayor cantidad de líquido a presiones altas. Las tortas sedimentadas se forman en 400 ml de agua saturada y las homogéneas en 70 ml, por lo cual las primeras quedan más húmedas, sin embargo cabe destacar que para la mezcla amplia de 30 existe una contradicción en este sentido, ya que las tortas homogéneas presentan una saturación remanente mayor que las segregadas, lo cual es argumentado en que la disposición de las partículas en las tortas compactas es de tal manera que la cantidad de poros es menor y son más pequeños.

El parámetro de distribución de tamaño de poro ( $\xi$ ) varía entre 0.7 y 1.3 lo cual contradice al modelo propuesto por Wakeman quien fijó un valor entre 0,15 y 0,33 para mezclas con partículas esféricas; esta diferencia es debida a que las mezclas estudiadas están formadas por partículas de forma irregular.

Cabe destacar, que no se puede garantizar que el modelo permita calcular los verdaderos valores de los parámetros, ya que existen muchos máximos y mínimos para estos y debe seleccionarse el mejor por un método de cálculo óptimo con la restricción adecuada ya que fue establecida entre 0 y 1 para este parámetro para la mayoría de los casos basado en resultados de trabajos anteriores, y entre 0 y 2 para las mezclas en donde la restricción 0-1 presentaba problemas en la solución del modelo, este hecho implica que los valores de los otros parámetros variaban de tal manera que no se encontraban dentro de la tendencia, tal como una  $S_r$  mayor a la saturación infinita para la presión más alta de deslicorización.

Los resultados encontrados muestran valores superiores y diferentes para el parámetro de distribución de tamaño de poro dependiendo del tamaño promedio de partícula, obteniéndose los mayores valores en las tortas formadas por sedimentación.

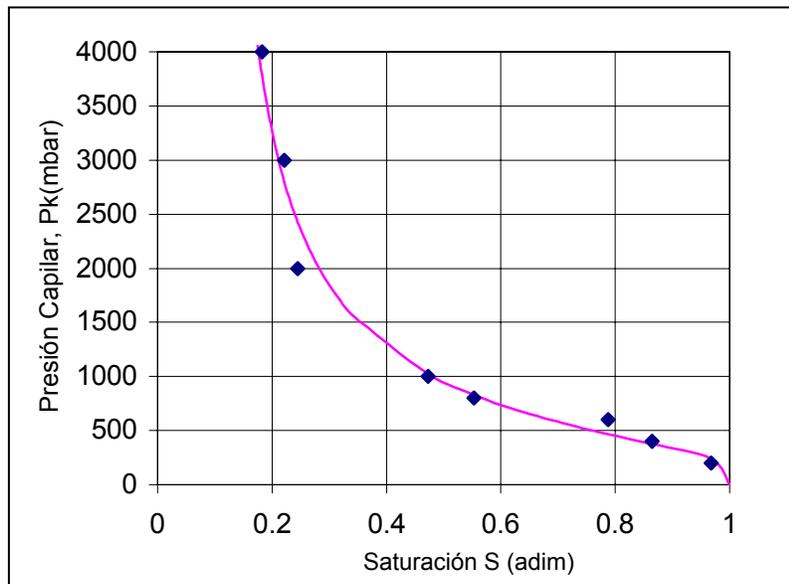
#### 9.2.1.2 Modelo B: Rosin-Rammler.

Para determinar los valores de los parámetros de la curva de presión capilar se empleó el modelo de Rosin Rammler donde se ajustaron los puntos experimentales de la curva de presión capilar a la siguiente ecuación:

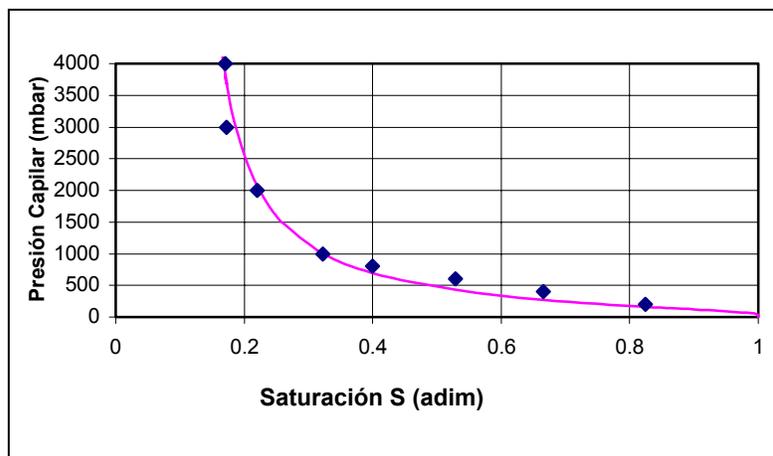
$$Pk = Pk' \cdot \left[ \text{Ln} \left( \frac{1}{1 - S_{\infty}^*} \right) \right]^{-\xi}$$

dejando como parámetros ajustables el valor de la saturación remanente ( $S_r$ ), la presión capilar ( $P_k'$ ) y el factor de distribución de tamaño de poro ( $\xi$ ).

Este modelo se aplicó de la misma forma que el modelo A, a las curvas de presión capilar experimental cuando las tortas fueron preparadas de forma homogénea y sedimentada, obteniendo las representaciones, que se muestran en las figuras N°37 y N°38.



**Figura N°37. Curva de presión capilar para la mezcla amplia de 30, homogénea empleando el modelo B, con parámetros básicos experimentales.**



**Figura N°38. Curva de presión capilar para la mezcla amplia de 30, segregada empleando el modelo B, con parámetros básicos experimentales.**

En estas figuras puede observarse que la línea de ajuste pasa por casi todos los puntos experimentales, lo cual revela que se ajusta muy bien a dichos valores. Para una mejor visualización de los resultados obtenidos se muestran los valores de los parámetros en las tablas N°8 y N°9.

**Tabla N°8. Parámetros de la curva de presión capilar para tortas de filtración homogéneas por el ajuste R-R.**

Mezclas	Distribución del tamaño de poro, $\xi$ (Adim)	Saturación remanente, $S_r$ (adim)	Presión Capilar de entrada, $P_k'$ (mbar)
MA-15	0.8048	0.2374	600
MA-30	0.7996	0.0908	630

**Tabla N°9. Parámetros de la curva de presión capilar para tortas de filtración segregadas por el ajuste R-R.**

Mezclas	Distribución del tamaño de poro, $\xi$ (Adim)	Saturación remanente, $S_r$ (adim)	Presión Capilar de entrada, $P_k'$ (mbar)
MA-15	1.2682	0.3193	176
MA-30	1.0175	0,1065	272
MA-80	0.7801	0.1826	200

Haciendo el mismo análisis que se elaboró para el modelo A, se tiene que a medida que disminuye el tamaño promedio de las partículas la presión  $P_k'$  aumenta, notándose también una gran diferencia de este parámetro en las tortas homogéneas y en las segregadas, en donde en las primeras, la presión capilar necesaria para la remoción de líquido existente en los poros,

es mucho mayor que la determinada en las segundas, como se explico en el caso anterior.

Las tortas formadas por segregación poseen una mayor saturación remanente, ya que son más porosas (ver Tabla N° 14) y retienen mayor cantidad de líquido a presiones altas.

El parámetro de distribución de tamaño de poro ( $\xi$ ) varia entre 0.78 y 1.26 al igual que el modelo A contradice al modelo propuesto por Wakeman. Se puede notar que existen diferencias entre los valores de este parámetro ( $\xi$ ) que depende de la manera como es formada la torta obteniéndose valores más altos en las tortas segregadas.

Este modelo presenta un mejor ajuste que el modelo A (ver figuras N° 35 y 37), ya que presenta las mismas tendencias que los datos experimentales (ver Apéndice D).

En general ambos modelos se ajustan bien a los resultados experimentales, excepto en MA-15, cuando se formaron tortas homogéneas, esto pudo deberse, al hecho de que las partículas quedasen arregladas de manera tal que la cantidad de poros sea mínima y de menor tamaño por lo que la remoción de líquido se hizo más difícil, y la saturación reportada no fue la real.

### **9.2.2 Predicción de los parámetros de la curva de presión capilar.**

Con la finalidad de convertir los datos correlacionados en variables predecibles se realizó el cálculo de la saturación infinita para mezclas formadas por capas y sedimentadas. Partiendo de datos conocidos como : granulometría de la mezcla ( $X_n$  y  $D_{3,2}$ ), altura de la torta de filtración ( $h_c$ ), variación de la presión ( $\Delta P$ ) y tiempo de deslicorización se obtiene:

- ✓ La porosidad ( $\varepsilon$ ) por el modelo de Yu, usando una hoja de cálculo de Excel para obtenerla (apéndice E).

- ✓ El parámetro de distribución de tamaño de poro ( $\xi_p$ ), a través de la relación  $\xi_p = 1.0205 \cdot \xi_{RR}$  correlación determinada por Sorrentino (2002).
- ✓ Presión capilar de entrada (Pke) puede estimarse mediante la siguiente ecuación (Sorrentino, 2002) usando el valor de Pk' proveniente del ajuste de R-R:

$$Pke = \frac{Pk' \cdot (0.1)^{\xi_p}}{\left[ \ln \left( \frac{1}{0.9} \right) \right]^{\xi_{RR}}}$$

- ✓ Permeabilidad (K) a través de los resultados obtenidos por Rojas (2002) y Sorrentino (2002) (ver apéndice F).

Los parámetros de la curva de presión capilar, considerados teóricos pueden observarse en las tablas N°10 , N°11 y N°14.

**Tabla N°10. Parámetros estimados por correlación del ajuste por R-R con el ajuste potencial según Sorrentino para tortas homogéneas**

MEZCLA	$\xi_p$	Pke (mbar)	Sr
MA-15	0.8213	554	0.2374
MA-30	0.8160	582	0.0908

**Tabla N°11. Parámetros estimados por correlación del ajuste por R-R con el ajuste potencial según Sorrentino para tortas segregadas**

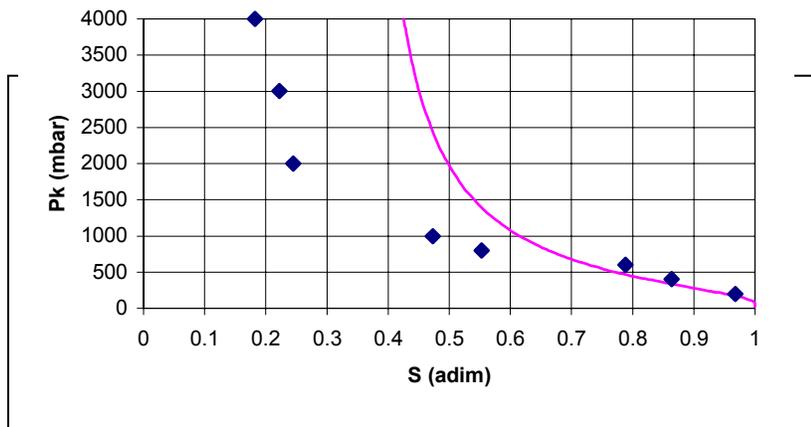
MEZCLA	$\xi_p$	Pke (mbar)	Sr
MA-15	1.2942	155	0.3193
MA-30	1.0384	245	0.1065
MA-80	0.7961	185	0.1826

En estas tablas (N°10 y N°11) se puede notar claramente que la Pke en las tortas homogéneas es mayor que en las tortas segregadas, siguiendo el mismo comportamiento que se ha discutido anteriormente, estos cálculos pueden verse en el apéndice D.

Vemos también, en las figuras N°35 y 36, como la curva de presión capilar obtenida con los parámetros del modelo B transformado al modelo A, a través de las correlaciones propuestas por Sorrentino (2002) (Tablas N°10 y 11), se ajustan mejor a los datos experimentales, sobre todo en la primera etapa de deslicorización.

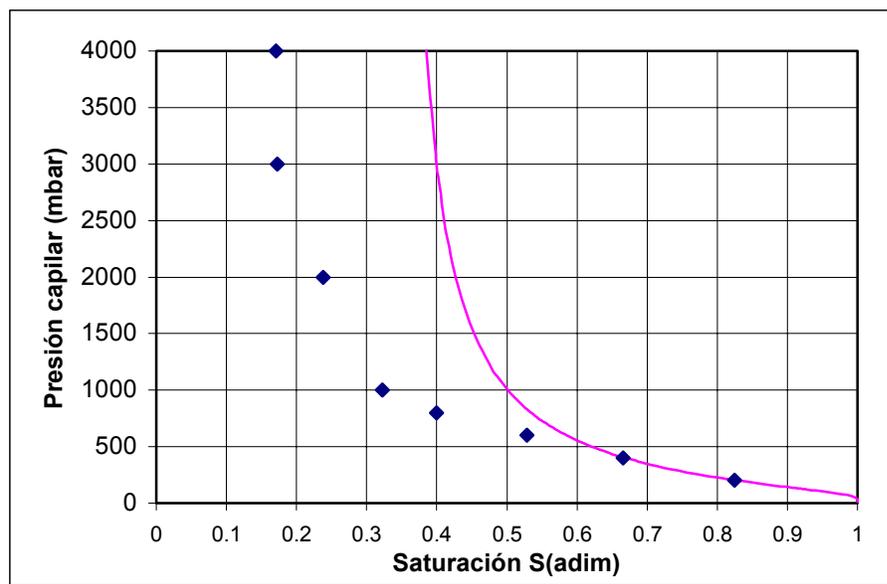
Otra manera de predecir los parámetros de la curva de presión capilar es a través de los diagramas obtenidos en el trabajo doctoral de Sorrentino (2002), donde se obtienen estos parámetros directamente de gráficos a partir de información granulométrica (ver sección 3.3.2), los valores que se obtuvieron a través de estos se pueden ver en las tabla N°12 y N°13, una vez obtenidos los parámetros básicos estimados ( $Pk'$ , Sr,  $\xi$ ), tomando en cuenta que el ajuste por el modelo B, presenta mejores resultados, en los casos estudiados, que el modelo A. Se ajustaron los datos experimentales de la curva de presión capilar usando los parámetros estimados mencionados anteriormente, obteniendo las curvas de presión capilar que se

presentan a continuación.



Saturación S (adim)

**Figura N° 39. Curva de presión capilar para la mezcla amplia de 30, homogénea empleando el modelo B, con parámetros básicos estimados.**



**Figura N°40. Curva de presión capilar para la mezcla amplia de 30, segregada empleando el modelo B, con parámetros básicos estimados.**

En estas curvas que se presentaron, se puede observar que no hay un buen ajuste en general, que se ve afectado marcadamente en la zona que corresponde a altas presiones, sin embargo a presiones menores de 800 mbar el comportamiento del ajuste es bueno, en el sentido de que la curva de ajuste del modelo de R-R pasa muy cerca e inclusive por los puntos experimentales, tomando en cuenta el valor de los parámetros básicos estimados con respecto a los experimentales existe

diferencias sobre todo en los valores de  $S_r$ , en donde los mayores obtenidos fueron según la estimación por el método de Sorrentino (Ver tablas N°12 y N°13). Es necesario también destacar que el mayor problema se encuentra en esta mezcla, ya que al observar lo que sucede en el resto de las mezclas (apéndice D-3) vemos que en estas se tiene un mejor comportamiento.

**Tabla N°12 . Parámetros básicos estimados por Sorrentino a partir de información granulométrica en tortas homogéneas**

<b>MEZCLA</b>	$\xi_{PS}$	<b>Pke (mbar)</b>	<b>Sr</b>
<b>MA-15</b>	<b>0.9677</b>	<b>658.27</b>	<b>0.40</b>
<b>MA-30</b>	<b>1.0258</b>	<b>533</b>	<b>0.34</b>

**Tabla N° 13. Parámetros básicos estimados por Sorrentino a partir de información granulométrica para tortas segregadas**

<b>MEZCLA</b>	$\xi_{PS}$	<b>Pke (mbar)</b>	<b>Sr</b>
<b>MA-15</b>	<b>0.9677</b>	<b>274.28</b>	<b>0.40</b>
<b>MA-30</b>	<b>1.0258</b>	<b>273.57</b>	<b>0.34</b>
<b>MA-80</b>	<b>0.9290</b>	<b>93.06</b>	<b>0.23</b>

Estos parámetro al igual que los demás, hallados experimentalmente o a través de la correlación de R-R con la curva de presión capilar tienen la misma tendencia lo cual hace presumir que estos valores predichos presentan similitud con la realidad, cabe destacar que estas estimaciones se obtienen usando sólo información granulométrica y la forma como fue obtenida la torta de filtrado, es también importante resaltar que la  $S_r$  y el parámetro de distribución de poro ( $\xi$ ) no dependen de lo forma de obtención de la torta.

Por último se tiene que para la simulación a través de los modelos de cinética, es necesario también la obtención de la porosidad, la cual se obtiene por dos vías diferentes, primero experimentalmente (apéndice C) y luego por el método de Yu

Standish (apéndice E), y que podemos ver la diferencia que existe en la Tabla N°14.

**Tabla N° 14. Porosidad de las mezclas estudiadas.**

Mezcla por tipo de formación de torta	Porosidad experimental $\epsilon$ (adim) (a presiones de estudio en mbar)				Porosidad por Yu Standish $\epsilon$ (adim)
	600	800	1000	2000	
MA-15 sed	0.4039	0.395 5	0.3907	0.3924	0.477
MA-15 capas	0.3434	0.327 1	0.3239	0.3213	0.372
MA-30 sed	0.4619	0.440 7	0.4363	0.4347	0.460
MA-30 capas	0.3342	0.343 1	0.3555	0.3609	0.340
MA-80 sed	0.4689	0.467 7	0.4613	0.4511	0.455

### 9.3 MODELOS DE CINÉTICA DE DESLICORIZACIÓN

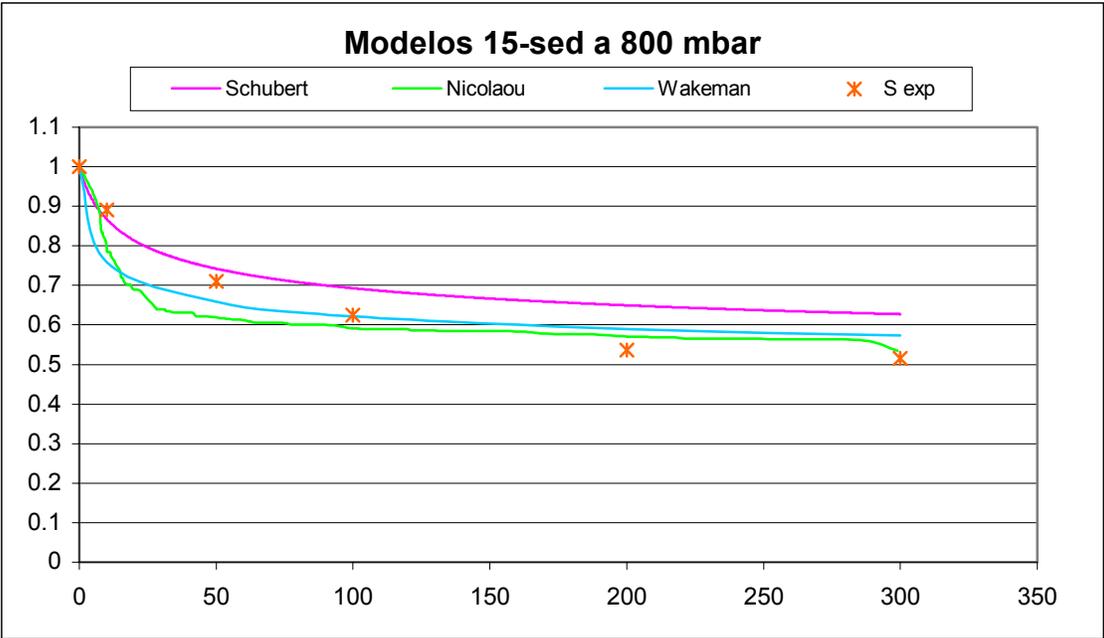
Una vez obtenidos estos parámetros se calculó la saturación de la curva de cinética de deslicorización, dependiendo del modelo a utilizar entre los que están Schubert (solución por Runge-Kutta), Perfil de Saturaciones de Nicolaou, y Wakeman.

Es necesario realizar un análisis de los resultados obtenidos para cada tipo de mezcla utilizadas en este trabajo, con respecto a su comportamiento en cada uno de los modelos utilizados para la simulación de la cinética de deslicorización.

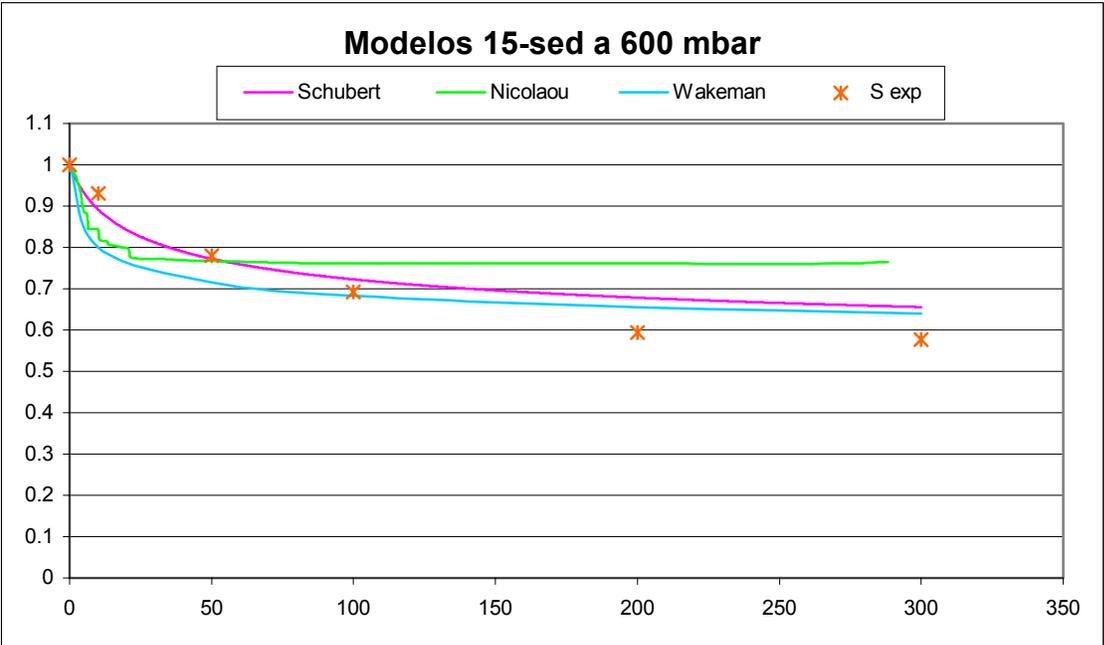
#### 9.3.1 Mezcla de 15 ( $D_{3,2}=7.5$ ; $\sigma_g=2.68$ )

En el caso de esta mezcla los mejores resultados de la simulación de la cinética de deslicorización, fueron obtenidos en la torta formada por sedimentación a

presiones bajas como de 800 y 600 mbar, como se muestra en las figuras N°41 y N°42



**Figura N°41. Modelos de cinética de deslicorización para la mezcla de 15 sedimentada a 800 mbar de presión**

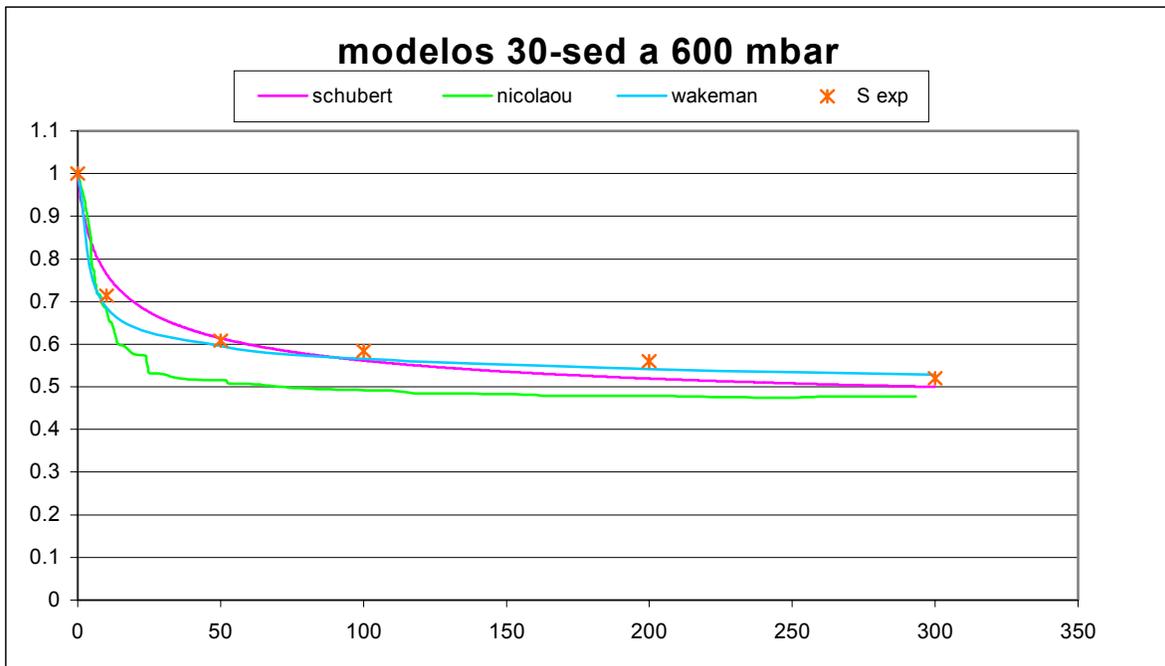


**Figura N°42. Modelos de cinética de deslicorización para la mezcla de 15 sedimentada a 600 mbar de presión**

Este caso podemos ver que para los primeros tiempos de deslicorización el modelo de Schubert es el que mejor se adapta a los valores experimentales, mientras que los demás tienden a ser muy rápidos (esto es para el caso en que se obtuvieron los parámetros a través del ajuste potencial de los mismos). También es importante señalar que la diferencia que se nota en los valores de saturación infinita se puede deber a que en la experiencia haya ocurrido secado, además de que también puede ser que para el modelo sea necesario que transcurra más tiempo para alcanzar dicho valor.

**9.3.2 Mezcla de 30 ( $D_{3,2}=13,4$ ;  $\sigma_g=2.8$ )**

Para esta mezcla se obtuvieron los mejores resultados nuevamente para las tortas que se formaron de manera sedimentada, en la mayoría de las presiones en estudio. De igual manera estos resultados fueron satisfactorios para los casos en que los parámetros se calcularon a través del ajuste potencial de la curva de presión capilar tal como se muestra en la figura N°43



### **Figura N°43 Modelos de cinética de deslicorización para la mezcla de 30 sedimentada para el ajuste potencial a 600 mbar**

Vemos que el modelo que mejor se ajusta a los datos experimentales es el de Schubert, al igual que en las otras presiones en estudio (apéndice G), ya que los otros modelos se consideran muy rápidos para los primeros tiempos de deslicorización que como se dijo antes, es donde ocurre el mayor cambio en la saturación.

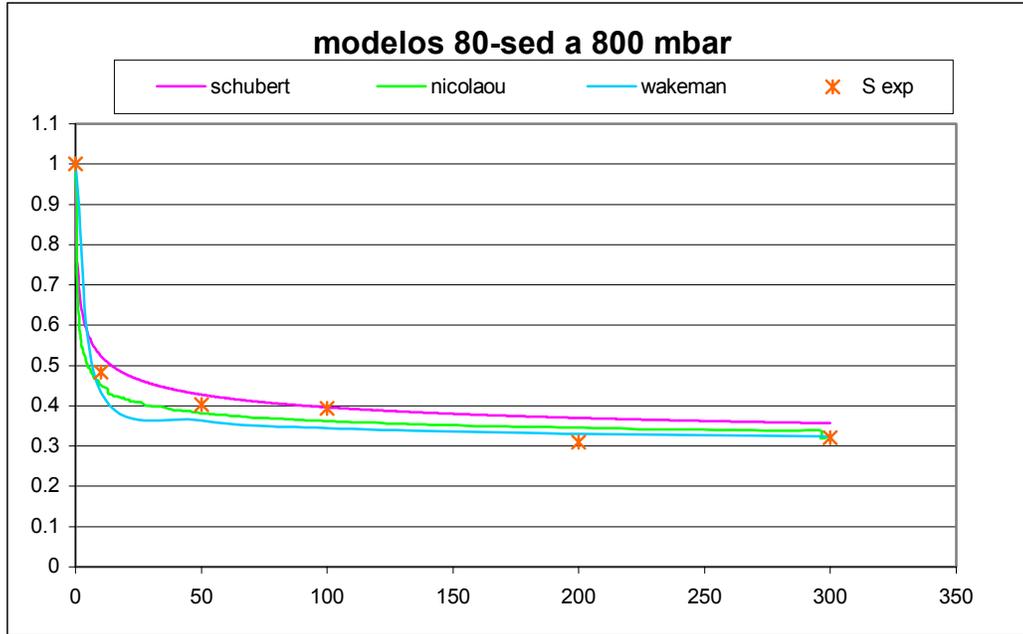
En este caso vemos que los modelos tienden a llegar prácticamente al valor de saturación infinita obtenida experimentalmente que concuerda con la información predicha en las curvas de presión capilar.

De nuevo se verifica el caso en que los resultados obtenidos para las tortas formadas por capas compactas no son los esperados, ya que se piensa, que influye en gran cantidad la forma de preparar la mezcla, además de que como el arreglo de las partículas es mejor, se retiene más humedad en la torta, lo que nos permite cometer más errores en las mediciones.

Cabe destacar que a medida que se aumenta el tamaño de las partículas y la amplitud de la mezcla, los resultados mejoran considerablemente, sobre todo en los casos de tortas sedimentadas. En estos casos no es necesario pensar que hace falta un tiempo mayor en la simulación de los modelos para alcanzar la saturación infinita.

#### **9.3.3 Mezcla de 80 ( $D_{3,2}=44,5; \sigma_g=2.55$ )**

En este caso, como sólo se obtuvieron datos para las tortas formadas por sedimentación, podemos corroborar el hecho que para esta manera de formación de tortas es donde mejor se ajustan los modelos a los datos experimentales, como se muestra en las gráficas N°44

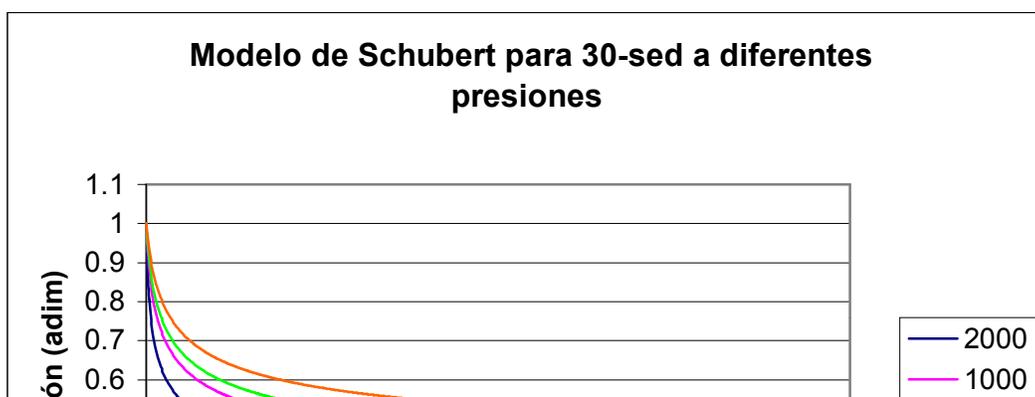


**Figura N°44 Modelos de cinética de deslicorización con la mezcla de 80 para ajuste potencial a 800 mbar.**

Nuevamente vemos que el modelo que mejor se ajusta a los datos experimentales es el modelo de Schubert, ya que no es tan rápido como los demás y tiende a alcanzar los valores de saturación infinita.

Aquí también se puede decir que la influencia del tamaño de partículas es muy importante ya que vemos que para esta mezcla (apéndice G) se cumple en la mayoría de los casos la correspondencia del modelo con los valores experimentales.

De todo lo anterior, podemos decir que el modelo que mejor se ajusta a los datos experimentales es el modelo de Schubert con solución por Runge-Kutta, ya que tiene el mejor comportamiento en la primera fase del proceso de deslicorización que es la parte más importante. Es necesario entonces verificar el comportamiento correcto del proceso y del modelo, lo cual se puede verificar en la figura N°45, donde se muestra el modelo para la misma altura de torta, las mismas características (porosidad, permeabilidad, etc.) pero distinta diferencia de presión.



**Figura N° 45. Modelo de Schubert para las mismas características de torta pero diferentes presiones**

#### **9.4 MODELO DE SCHUBERT**

Como se ha mencionado anteriormente, para este modelo en la mayoría de los casos, se supone que es necesario mayor tiempo de simulación para alcanzar el valor de saturación infinita. También se puede decir que la velocidad de cambio del mismo pareciera ser la indicada para describir la cinética de deslicorización sobre todo a bajas presiones, en mezclas de mayor tamaño de partículas y en bajos tiempos de deslicorización.

Es importante señalar, que se adoptó la forma de solucionar este modelo, en su versión modificada, a través del método numérico de Runge-.Kutta de 4to. Orden, lo que también influye en los resultados, ya que el error asociado a este método es menor que en cualquier otro caso o por lo menos que en el caso de resolución por series.

#### **9.5 MODELO DE NICOLAOU O PERFIL DE SATURACIONES**

Este modelo, en todas las cinéticas, se presenta como el más rápido, cosa que no nos interesa ya que no se adapta a los mayores cambios de saturación en la torta.

Esto puede ser debido a que la información que él maneja está asociada al comportamiento de los capilares de la torta, los cuales son tomados como capilares completamente cilíndricos, cosa que en realidad no sucede y que permite que el modelo suponga o calcule una velocidad de vaciado más rápida, ya que no es lo mismo la cantidad de agua que se pueda desplazar por un cilindro perfecto que por uno con obstáculos.

Además, como se dijo anteriormente, el programa presenta limitaciones a nivel de programación, tales como limitaciones en el tiempo de deslicorización, lo que no nos permite ver que sucede a tiempos mayores de 300 s. Luego, también se puede decir que influyen en él una cantidad de factores tales como la tensión superficial del fluido (agua) y la resistencia del medio que podrían involucrar mayores desviaciones con respecto a la realidad.

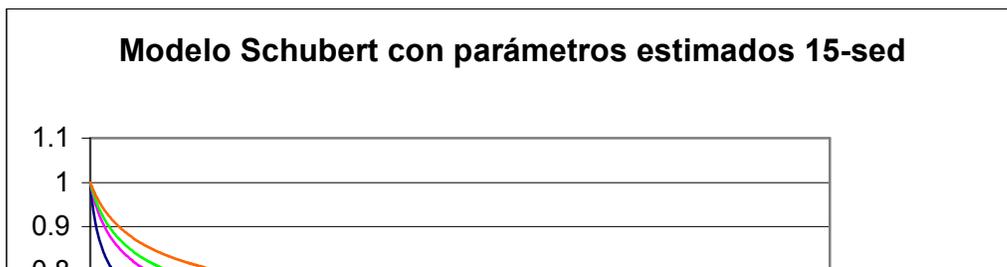
**9.6 MODELO DE WAKEMAN**

Este modelo a pesar de los resultados arrojados, que podría pensarse que son buenos, tiene pequeñas limitaciones, tales como que no involucra en sus cálculos, la información que puede aportar tanto la curva de presión capilar como la distribución de tamaño de partículas, además de que la mayor influencia la tiene la saturación infinita, que es la que más cambia dependiendo del método usado para obtenerla.

Wakeman supone que todas las tortas de filtración se comportan de la misma manera, sin importar como se forman, su granulometría, y lo que es más importante, su parámetro de distribución de tamaño de poro, que influye en la velocidad de vaciado, por lo que este modelo se comporta igualmente de manera muy rápida en los primeros momentos de cambios en la saturación.

**9.7 MODELO DE SCHUBERT A PARTIR DE INFORMACIÓN BASICA ESTIMADA**

Luego de determinar el modelo a utilizar, se procede a realizar su comprobación mediante los parámetros estimados por las proposiciones de Sorrentino (2002). En primer lugar se verifica el comportamiento del mismo en la figura N°46, en la cual vemos nuevamente la cinética de deslicorización pero con los parámetros estimados.



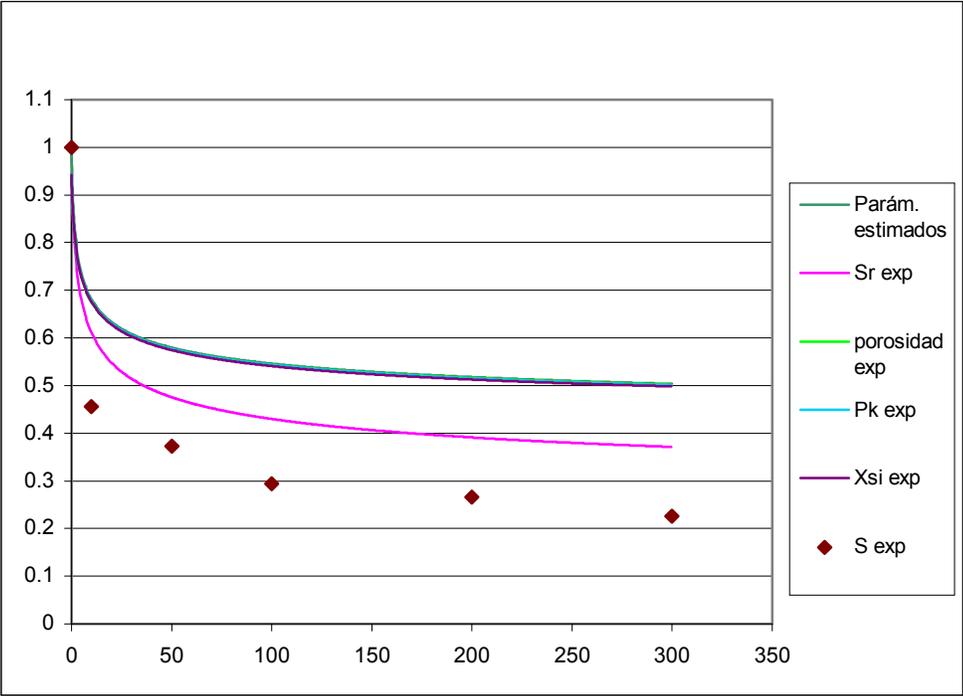
**Figura N°46. Modelo Schubert con parámetros estimados y diferentes presiones**

Luego de haber realizado esta verificación, se nota (ver apéndice D) que existe mucha diferencia entre los datos experimentales y el comportamiento de la curva de presión capilar con los datos estimados. Por lo tanto se ve la necesidad de realizar un análisis de sensibilidad de dichos parámetros para determinar cual de ellos afecta en mayor grado el comportamiento del modelo con respecto a los datos experimentales y poder determinar los problemas existentes en la estimación.

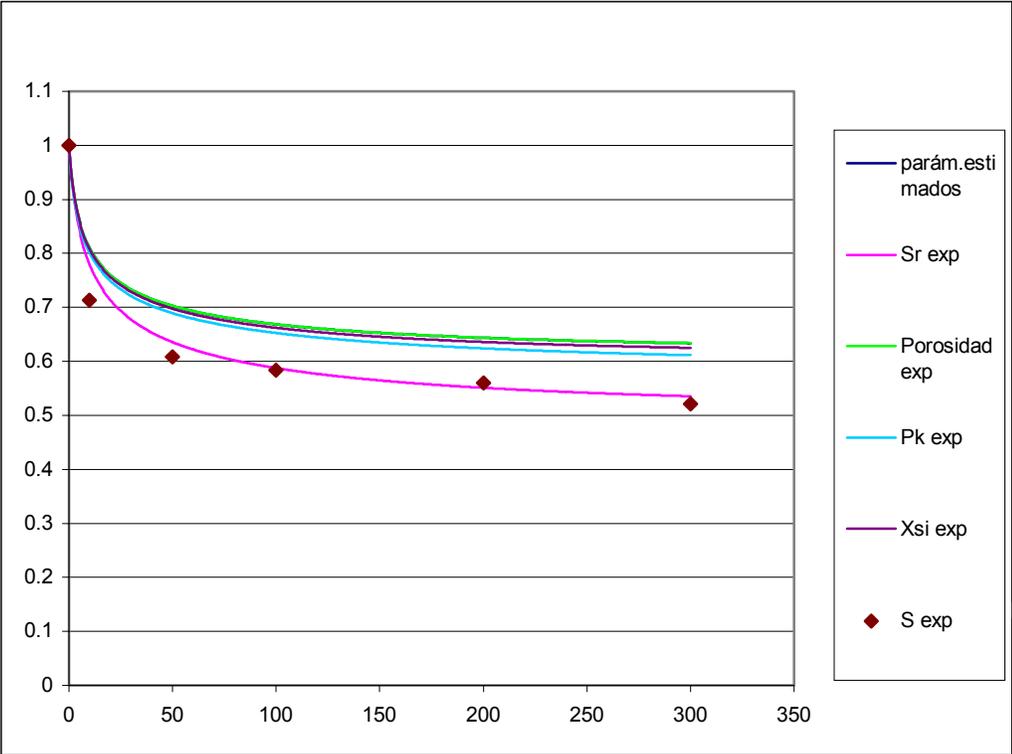
Para esto se hace la simulación del modelo haciendo variar los parámetros estimados de uno en uno, cambiándolos por los parámetros obtenidos experimentalmente, que se suponen más cercanos a la realidad del proceso.

Podemos ver en las figuras N° 47 y 48, como afectan los cambios de los parámetros estimados ( $S_r$ ,  $\varepsilon$ ,  $\xi$  y  $P_k$ ) por los mismos pero en forma experimental, y se verifica que el mayor cambio ocurre cuando se reemplaza la saturación irreducible estimada por la experimental, verificándose un mejor comportamiento del modelo, es decir, se acerca mejor a los datos experimentales tanto a presiones altas como

presiones bajas; lo que nos permite decidir que existen problemas en la estimación de este parámetro.



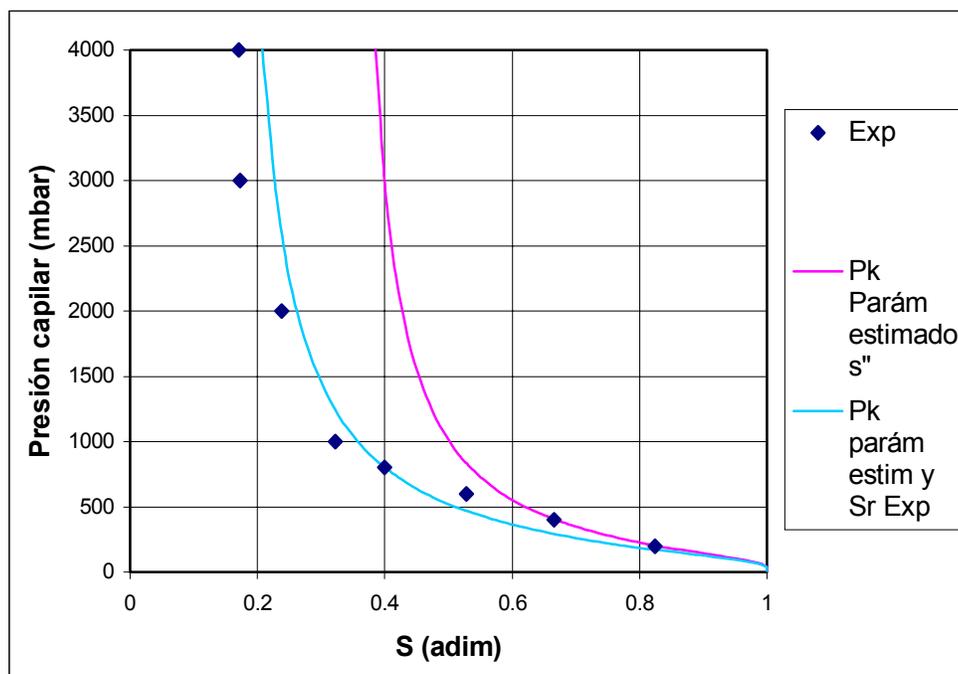
**Figura N° 47. Cinética de deslicorización a partir de parámetros estimados y parámetros estimados con Sr exp para la mezcla 30-sed a 2000 mbar**



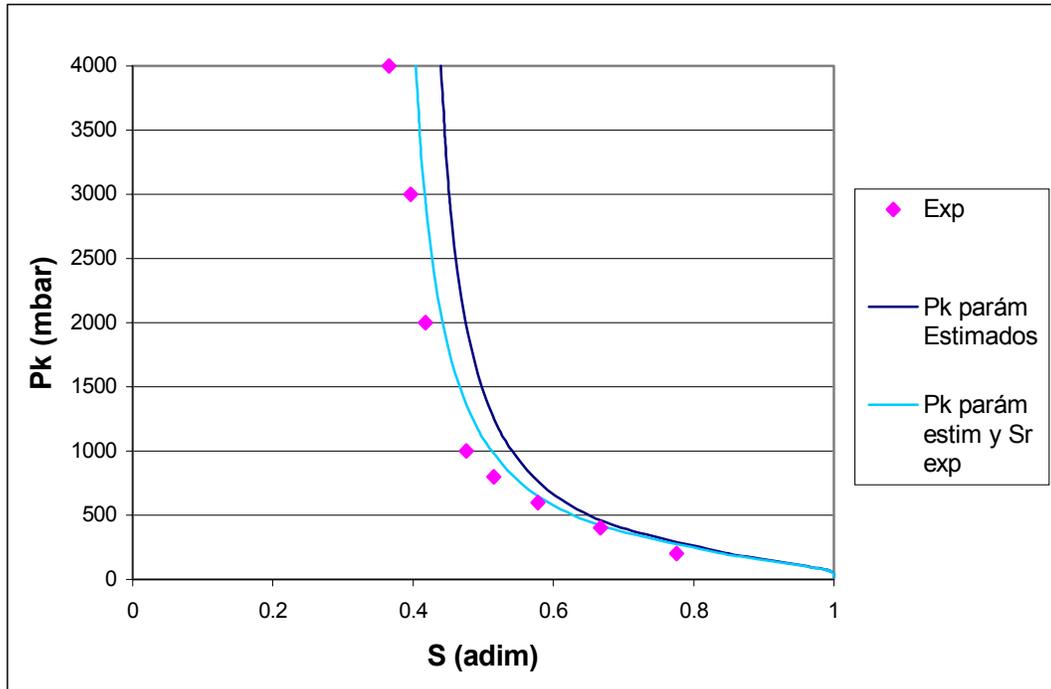
**Figura N° 48. Cinética de deslicorización a partir de parámetros estimados y parámetros estimados con  $S_r$  exp para la mezcla 30-sed a 600 mbar**

En esta última figura vemos que el cambio hace que prácticamente el modelo se ajuste perfectamente a los datos experimentales cuando el mismo se simula con la  $S_r$  experimental (ajuste potencial) y el resto de los parámetros son estimados. Es por esto la gran diferencia de los datos experimentales con la  $S_r$  en la curva de presión capilar, sobre todo para la mezcla amplia de 30.

A partir de esto, también se vio la necesidad de revisar entonces que sucedía con las curvas de presión capilar obtenidas a partir de información básica estimada, cuando se hacen estos cambios también, y el resultado fue que se mejora el comportamiento en la misma con respecto a los datos experimentales, cuando se utiliza la saturación irreducible experimental con el resto de los parámetros estimados, tal como se ve en las figuras N°49 y 50.



**Figura N°49. Curvas de Pk a partir de parámetros estimados y estimados con Sr experimental empleando el modelo B para la mezcla de 30-sed**



**Figura N° 50. Curvas de Pk a partir de parámetros estimados y estimados con Sr experimental empleando el modelo B para la mezcla de 15-sed**

## 10. CONCLUSIONES

El estudio de la cinética de deslicorización de tortas de filtración a partir de la curva de presión capilar permitió establecer las siguientes conclusiones:

- La estimación de los parámetros básicos de la curva de presión capilar, presentan gran semejanza a los obtenidos experimentalmente, con excepción de Sr.

- El uso de la estimación de los parámetros de la curva de presión capilar, para la predicción de cinética de deslicorización, representa una gran herramienta, que permite predecir el comportamiento de la misma, de manera certera y aproximada a la realidad.
- Haciendo uso de los parámetros básicos estimados de la curva de presión capilar, con el parámetro  $S_r$  obtenido experimentalmente, se obtiene una buena predicción de la cinética de deslicorización.
- Existen diferencias entre los parámetros que se obtienen a través de los ajustes usando el modelo A y el modelo B, alcanzando mejores resultados a través del ajuste por Rosín Rammler (modelo B).
- Al aumentar la diferencia de presión utilizada, conjugado con altos tiempos de deslicorización, o indiferentemente, se obtiene datos experimentales que incluyen secado.
- En el período inicial de deslicorización existe mejor ajuste de los modelos con la cinética de deslicorización descrita experimentalmente.
- El modelo de Schubert modificado con solución por Runge Kutta, es el que mejor se ajusta a los datos experimentales, en la predicción de cinética de deslicorización, tomando en cuenta el hecho, de que ninguno de los modelos incluye la perturbación del secado que puede producirse en la torta de filtración a determinadas presiones, y determinados tiempos de deslicorización.
- El modelo propuesto por Nicolaou, presenta resultados alejados de la realidad acentuada en la fase inicial de la deslicorización, presenta un vaciado muy rápido de los capilares, en esta etapa.

- La forma como es preparada la torta, es un factor de peso en cuanto a los resultados obtenidos, en las tortas formadas por capas hay mayor discrepancia entre los ajustes y los resultados experimentales.
- En las mezclas estudiadas en este trabajo especial de grado, las que presentaban un tamaño promedio de partícula menor, presentaron mayores diferencias entre el modelado de cinética de deslicorización y las curvas que se obtuvieron a través de datos experimentales.

## **11. RECOMENDACIONES**

De las conclusiones mencionadas anteriormente se pueden dar las siguientes recomendaciones a fin de mejorar resultados en trabajos siguientes que mantenga la línea de este trabajo:

- Realizar de manera precisa las medidas necesarias en las pruebas experimentales para evitar vicios en los resultados.

- Utilizar tiempos de deslicorización pequeños en la primera fase de deslicorización que permita obtener más información en esta etapa donde ocurren la mayoría de los cambios en la curva de cinética.
- Tomar en cuenta que al realizar las pruebas a presiones y tiempos altos de deslicorización se produce secado.
- Realizar la simulación del modelo de Schubert a tiempos mayores para verificar que se alcance la saturación de equilibrio experimental.
- Mejorar la estimación de la saturación irreducible para obtener valores más cercanos a la realidad y describir mejor la cinética de deslicorización.
- Estudiar la posibilidad de introducir en los modelos información que tome en cuenta el secado de las tortas de filtración.
- Profundizar en el estudio de la correlación existente entre los parámetros obtenidos con el ajuste potencial y el ajuste de Rosín-Rammler.
- Elaborar en orden aleatorio las pruebas experimentales.

## **12. BIBLIOGRAFÍA**

- YU, A.B, BRIDGWATER, J y BURBIDGE, A. "On de modelling of the packing of fine particles", Department of chemical Engineer, University of Cambridge. Pembroke Street, Cambridge CB2 3RA, UK, accepted 6 January 1997.
- ALLEN, T.: "Particle size measurement", Chapman and Hall, 1990.
- ALVARADO, A. y RAMOS, C., Trabajo Especial de Grado UCV, 1999.
- ANLAUF, H., NICOLAOU, I. y SORRENTINO, J.A. : "Cake Filtration Technology for the Process Industry", Material del Curso, Caracas, Octubre 1994.
- ARIAS, L. y OSORIO, H., Trabajo Especial de Grado. UCV, 1999.

- ARIAS, T. y UGAS, D., Trabajo Especial de Grado. UCV, 1998.
- BROWN, George. "Operaciones básicas de ingeniería química". Editorial Martín, Barcelona, 1965.
- CALZADILLA, H.y MEZA, M., Trabajo Especial de Grado. UCV, 2000.
- CAYAMA, N., Trabajo Especial de Grado. UCV, 1999.
- FINOL, C. y SANTALICES, M.. Trabajo Especial de Grado. UCV, 1999.
- Foust, Alan. "Principios de Operaciones Unitarias". Compañía Editorial Continental. México, 1997.
- GARCÉS, G. y TABATA, D., Trabajo Especial de Grado. UCV, 1999.
- HERRERA, R. y JAIME, R., Trabajo Especial de Grado U.C.V., 2000.
- LÓPEZ, F y NÚÑEZ, A. Trabajo Especial de Grado. UCV, 2000.
- MANUAL DE USO DEL MASTERZISER 2000. Laboratorio de Separaciones Mecánicas – UCV.
- MARQUINA, I. y ARIAS, R., Trabajo Especial de Grado. UCV, Mayo 1998.
- NICOLAOU, I. "Habilitación post – doctoral". Universidad de Karlsruhe, 1999.
- PÉREZ, O y LÓPEZ, M "Porosidad y curva de presión capilar de diferente granulometría".
- PURCHAS, D y WAKEMAN, R.: "Solid-Liquid Separation Equipment Scale-Up", Upland Press, 1986.
- ROCCARO, V. "Filtración de lodos rojos". Trabajo de ascenso a profesor titular. Facultad de ingeniería. UCV, 1997.
- ROJAS, G "Influencia de la estructura de la torta sobre su permeabilidad y porosidad", Trabajo especial de grado, UCV, 2002.
- RUSH, H., "Solid liquid separation technology". Alemania, VCH, 1996.
- SORRENTINO, J. "Caracterización de sistemas de partículas". Serie: Monografías del LSM - UCV. UCV. Caracas, 1998.
- SORRENTINO, J. A. and ANLAUF, H., "Correlation of cake dewatering data using particle size distribution information", Advances in Filtration and

- Separation, Vol. 15. Conference held during the Annual Meeting of the American Filtration and Separation Society, Tampa, FL, May 1-4, 2001.
- SORRENTINO, J. A. and ANLAUF, H., “Predicting changes in permeability and dewatering behaviour of filter cakes when varying particle size distribution”, accepted for presentation at the Sixth World Congress of Chemical Engineering, Melbourne, Inglaterra, September 23- 27, 2001.
  - SORRENTINO, J. A., “Data reduction strategy for cake dewatering kinetic data with the inclusion of particle size distribution information”, Conference held during the GVC Fachausschuss, Strassbourg, March 27- 28, 2000.
  - SORRENTINO, J. “Advances in correlating cake properties with particle collective characteristics” Disertación Doctoral, Universidad de Karlsruhe, Alemania, 2002
  - SVAROVSKY, L. (Editor): “Solid Liquid Separations”, Butterworths (London), 2a. Edición, 1988, pp. 120-161.
  - VALENTINO, S. “Modelos para predecir la humedad de las tortas de filtración”. Trabajo Especial de Grado, UCV. Caracas, 1997.
  - WAKEMAN, R. “Filtration post treatment processes”. Elsevier, Amsterdam, 1975.

## APÉNDICE A. Análisis granulométrico

### Apéndice A – 1. Datos obtenidos en el equipo de difracción láser para las fracciones seleccionadas.

**Tabla N°15A. Características de la distribución del tamaño de las partículas para las fracciones estrechas mayores a 38  $\mu\text{m}$  de carbonato de calcio seleccionadas**

Distribución Acumulada F(x) %	38 (μm) Tamaños X (μm)	45 (μm) Tamaños X (μm)	53 (μm) Tamaños X (μm)	63 (μm) Tamaños X (μm)	75 (μm) Tamaños X (μm)	90 (μm) Tamaños X (μm)	106 (μm) Tamaños X (μm)	125 (μm) Tamaños X (μm)
10.00	34.26	40.61	47.96	58.06	69.90	82.88	96.25	116.59
20.00	38.58	45.63	53.74	64.85	78.09	92.81	107.52	130.20
30.00	42.11	49.73	58.50	70.34	84.54	100.55	116.60	141.36
40.00	45.42	53.57	62.88	75.41	90.58	107.71	124.97	151.47
50.00	48.74	57.46	67.34	80.50	95.87	115.08	133.63	161.81
60.00	52.36	61.61	71.99	86.03	103.54	122.84	142.48	172.81
70.00	56.23	66.48	77.42	82.29	110.78	131.80	152.95	185.57
80.00	61.50	72.27	84.31	89.62	120.35	141.71	165.92	200.07
90.00	69.13	81.08	94.39	111.08	134.70	158.81	185.34	223.16
99.99	111.25	126.04	155.29	176.46	215.04	249.53	282.02	353.26
Mediana X <sub>50</sub> (μm)	48.74	57.48	67.34	80.50	96.87	115.08	133.68	161.81
Diámetro D <sub>3,2</sub> (μm)	46.96	55.39	65.02	77.95	83.79	111.45	129.30	156.70
Desviación estándar Geométrica (adim)	1.31	1.31	1.30	1.29	1.29	1.29	1.29	1.29

**Tabla N°15B. Características de la distribución del tamaño de las partículas para las fracciones estrechas menores a 38 μm de carbonato de calcio seleccionadas**

Distribución Acumulada F(x) %	3000 rpm Tamaños X (μm)	5000 rpm Tamaños X (μm)	7000 rpm Tamaños X (μm)	9000 rpm Tamaños X (μm)	11000 rpm Tamaños X (μm)	17000 rpm Tamaños X (μm)
10.00	13.45	7.53	5.97	4.07	3.09	1.96
20.00	15.90	9.04	7.10	5.00	3.78	2.39

30.00	18.00	10.38	8.05	5.85	4.39	2.78
40.00	20.04	11.70	9.05	6.71	4.99	3.19
50.00	22.19	13.09	10.05	7.64	5.63	3.63
60.00	24.55	14.63	11.17	8.69	6.35	4.15
70.00	27.40	16.45	12.48	9.95	7.24	4.81
80.00	30.99	18.81	14.15	11.68	8.43	5.75
90.00	35.52	22.25	16.81	14.35	10.30	7.56
99.99	62.85	39.42	28.23	28.14	23.66	31.26
Mediana $X_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	22.19	13.09	10.05	7.64	5.63	3.63
Diámetro $D_{3,2}$ ( $\mu\text{m}$ )	21.81	11.96	9.29	6.82	4.95	3.31
Desviación estándar Geométrica (adim)	1.46	1.51	1.48	1.62	1.62	1.72

**Apéndice A – 2. Datos obtenidos en el equipo de difracción láser para las mezclas diseñadas para la elaboración de este este trabajo.**

**Tabla N°16. Características de la distribución de tamaño de partículas para las mezclas diseñadas.**

Distribución Acumulada	Mezcla amplia de 15 Tamaños	Mezcla amplia de 30 Tamaños	Mezcla amplia de 80 Tamaños
------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------

F(x) %	X ( $\mu\text{m}$ )	X ( $\mu\text{m}$ )	X ( $\mu\text{m}$ )
10.00	3.19	7.02	15.12
20.00	5.91	12.14	25.95
30.00	8.65	16.79	39.89
40.00	11.63	21.74	57.51
50.00	15.18	27.47	78.49
60.00	19.73	34.52	102.44
70.00	26.06	43.77	129.57
80.00	35.61	57.35	163.64
90.00	53.81	83.16	213.24
99.99	314.50	386.66	440.47
Mediana $X_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	13.324	28.555	87.755
Diámetro $D_{3,2}$ ( $\mu\text{m}$ )	7.526	13.446	44.58
Desviación estándar Geométrica (adim)	2.93	2.75	2.72

### Apéndice A – 3. Procedimiento experimental para la realización de tortas de filtración por capas compactas y por sedimentación.

En esta sección se presentan los pasos a seguir para la realización de las pruebas de deslicorización.

Las pruebas de deslicorización se realizaron a tortas de filtrado preparadas de dos formas: una homogénea y otra segregada.

#### Tortas de filtrado homogéneas:

Las pruebas de deslicorización a tortas de filtrado homogéneas se aplicaron siguiendo estos pasos:

- Pesar 60 gr. de muestra de carbonato de calcio (mezcla).
- Distribuir la muestra en ocho porciones iguales, a través del equipo divisor de muestra PT-1000.
- Formar la torta de filtración:
  1. Fuera de la celda de filtrado del equipo Filtratec - UCV, en el soporte con anillos colocar el medio filtrante y asegurar el mismo
  2. Colocar una pinza en la manguera del soporte con anillos para impedir la salida del líquido.
  3. Llenar las  $\frac{3}{4}$  partes del anillo con aproximadamente 75 ml de agua saturada con carbonato de calcio.
  4. Agregar la primera porción de muestra y golpear ligeramente el anillo dejando asentar las partículas.
  5. Repetir el paso anterior para cada porción de muestra hasta formar completamente la torta a filtrar.
  6. Colocar el soporte móvil con la torta a filtrar en la celda del Filtratec-UCV.
  7. Abrir la línea de gas y fijar la presión de operación en el manómetro manipulando la válvula D.
  8. Retirar la pinza de la manguera ubicada en el soporte móvil.
  9. Comenzar a filtrar dejando pasar gas a la celda para ello debe abrirse la válvula de paso rápido azul del equipo.
  10. Registrar el tiempo al comenzar la deslicorización, es decir, cuando no se observe líquido en la superficie de la torta de filtración.
  11. Detener el proceso de deslicorización una vez que se cumpla el tiempo deseado, cerrando la válvula azul para impedir el paso de gas.
  12. Despresurizar el sistema, abriendo la tapa de la celda de filtración del equipo y retirar el soporte móvil con la torta de filtración.
  13. Medir en el micrómetro la altura de la torta de filtración en seis puntos diferentes sin retirar la misma del soporte con anillo, y tomar nota.
  14. Retirar la torta del soporte, pesarla y anotar, para obtener la masa húmeda.

15. Colocar la torta en la balanza desecadora hasta que se haya secado completamente.
16. Pesarse la torta de filtrado seca para determinar su masa.
17. Lavar el soporte móvil con anillo y el medio filtrante.

Tortas de filtración segregadas:

Para las pruebas de deslicorización a tortas de filtrado segregadas se emplearon los siguientes pasos:

- Pesarse 60 gr de muestra de carbonato de calcio (mezcla).

### 3. Tortas de filtrado segregadas:

1. Ensamblar el soporte con anillo y el medio filtrante.
2. Colocar el soporte en la celda del equipo Filtratest –UCV.
3. Llenar la celda del Filtratest - UCV con 400 ml de agua saturada con carbonato de calcio.
4. Agregar los 60 gr de muestra de carbonato de calcio dentro de la celda.
5. Dejar transcurrir un tiempo prudencial para que se depositen las partículas.

Para filtrar y deslicorizar se realizan los mismos pasos de las tortas de filtrado homogéneas.

## APÉNDICE B. Valores experimentales de las pruebas de cinética de deslicorización y presión capilar.

Tabla N°17. Datos experimentales de las tortas de filtración para la mezcla amplia de 15 formada por sedimentación.

P(mbar)	t(s)	Mth (g)	Mts (g)	hc (mm)	
	10	78.023	62.601	19.64	18.06
				20.33	19.67
				18.45	19.23
	50	76.596	62.398	18.64	18.57
				18.64	20.28

200	100	75.847	62.376	19.56	19.14	
				19.52	18.95	
				18.39	20.04	
	200	74.116	62.425	18.43	19.07	
				19.5	19.92	
				18.67	17.57	
		300	73.259	62.578	18.56	18.84
					18.87	19.58
					17.26	18.40
400	10	76.266	62.376	17.99	18.42	
				19.64	18.11	
				20.28	17.64	
	50	75.011	62.512	18.48	18.83	
				18.69	17.68	
				18.53	20.28	
	100	774.163	62.415	19.51	18.94	
				19.4	18.95	
				18.19	20.24	
	200	72.728	62.378	18.55	19.07	
				20.61	19.92	
				18.72	17.52	
	300	71.947	62.294	18.45	19.04	
				18.87	19.53	
				18.31	18.42	
				17.97	18.62	

Tabla N°17. Continuación

P(mbar)	t(s)	Mth (g)	Mts (g)	hc (mm)	
600	10	75.643	62.338	19.63	18.35
				18.27	17.63
				18.67	18.51
	50	73.881	62.403	18.63	17.65
				18.59	19.22
				19.57	18.73
	100	72.907	62.235	18.26	18.92
				20.17	18.51

	200	71.578	62.210	19.44	19.06
				20.67	19.92
				19.78	17.46
	300	70.724	62.353	18.39	19.24
				18.91	19.55
				18.40	18.32
800	10	74.286	62.415	17.93	18.62
				18.67	18.21
				17.11	18.61
	50	72.458	62.394	17.57	18.03
				18.51	17.56
				18.54	18.14
	100	71.721	62.198	19.53	18.46
				19.41	18.86
				17.99	20.13
	200	70.394	62.223	18.47	18.97
				19.63	18.87
				20.54	17.43
	300	69.673	62.359	18.34	18.96
				18.97	19.57
				17.45	17.38
				18.93	18.46

Tabla N°17 Continuación

P(mbar)	t(s)	Mth (g)	Mts (g)	hc (mm)	
	10	73.543	62.509	18.63	18.14
				17.69	17.25
				18.61	18.06
	50	71.617	62.308	19.47	18.02
				17.53	17.03
				19.49	18.31
				19.23	18.67

1000	100	70.981	62.447	17.95	19.09
				18.41	18.67
	200	69.728	62.221	20.58	18.74
				20.64	17.31
				17.29	18.91
	300	68.935	62.419	18.61	19.29
18.28				17.35	
17.89				18.28	
2000	10	72.896	62.601	19.75	18.08
				17.22	18.72
				18.25	17.49
	50	71.195	62.540	21.42	18.15
				17.4	17.58
				18.55	18.62
	100	69.639	62.418	19.19	17.67
				17.95	19.09
				18.34	18.45
	200	68.844	62.240	21.17	18.83
				20.52	17.23
				17.25	19.00
	300	68.169	62.356	17.66	19.28
				18.45	18.13
				17.76	18.26

Tabla N° 17.Continuación

P(mbar)	t(s)	Mth (g)	Mts (g)	hc (mm)	
	10	70.189	62.223	16.77	16.50
				16.37	16.13
				16.45	16.46
	50	69.183	62.322	17.67	17.66
				16.84	17.42
				16.48	17.21

3000	100	68.004	62.124	17.24	16.64
				17.23	16.78
				16.88	16.50
	200	67.370	62.027	17.5	17.34
				17.47	17.26
				17.35	17.38
	300	66.977	62.719	19.33	18.35
				18.4	19.32
				19.46	18.97
4000	10	69.014	62.165	16.78	16.64
				16.12	16.60
				17.14	16.66
	50	68.116	61.940	16.7	16.31
				16.77	16.87
				16.73	16.68
	100	67.706	62.000	16.76	18.40
				17.13	18.46
				17.52	17.65
	200	66.572	62.069	17.77	17.67
				17.76	17.35
				17.75	17.66
	300	66.135	62.301	17.08	17.13
				16.74	16.26
				16.79	16.75

Tabla N° 18 . Datos experimentales de la torta de filtración para la mezcla amplia de 15 formadas por capas.

Presión (mbar)	Tiempo (s)	Mth (g)	Mts (g)	hc (mm)	
200	10	74.945	62.496	17.43	17.60
				17.46	18.11
				17.52	17.62
	50	74.476	62.425	17.09	17.95
				17.13	17.98
				17.43	17.51
	100	74.224	62.501	17.14	16.99
				17.14	18.46
				17.29	17.40

	200	73.745	62.378	17.20	17.44	
				17.25	17.56	
				17.38	17.37	
	300	73.629	62.336	17.11	17.43	
				17.55	17.47	
				17.33	17.38	
400	10	74.754	62.524	17.03	17.60	
				17.46	18.11	
				17.52	17.54	
	50	74.151	62.334	17.13	17.78	
				17.43	16.85	
				17.95	17.43	
	100	73.586	62.287	17.14	16.81	
				17.14	18.46	
				16.88	17.29	
	200	72.962	62.447	17.10	17.44	
				17.20	16.91	
				17.25	17.18	
	300	72.723	62.461	16.85	17.11	
				16.97	17.47	
				17.08	17.09	
	600	10	74.397	62.553	17.52	18.11
					17.60	16.71
					17.23	16.34
50		73.254	62.354	17.13	16.85	
				17.95	16.78	
				17.43	17.22	
100		72.491	62.215	16.81	17.14	
				16.88	18.46	
				16.32	17.12	
200		72.159	62.423	16.44	17.20	
				16.91	17.25	
				17.10	16.98	
300		71.647	62.445	16.85	16.97	
				16.11	17.47	
				16.80	16.84	

Tabla N°18. Continuación

Presión (mbar)	Tiempo (s)	Mth (g)	Mts (g)	hc (mm)		
800	10	73.756	62.509	17.40	16.49	
				17.62	17.46	
				16.75	17.14	
	50	72.378	62.312	17.18	16.87	
				17.40	16.78	
				16.90	17.03	
	100	71.234	62.274	17.18	16.41	
				15.86	16.32	
				16.84	16.52	
					16.40	16.29

	200	70.921	62.435	17.10	16.95
				16.16	16.58
	300	70.142	62.279	15.95	15.97
				16.01	16.47
				16.80	16.24
				16.42	16.53
1000	10	72.987	62.280	17.60	17.26
				16.72	16.91
				16.85	17.43
	50	71.635	62.312	16.65	16.78
				16.95	16.93
				17.14	16.46
	100	70.408	62.346	15.81	16.32
				16.88	16.52
				16.44	16.01
	200	69.353	62.324	16.10	16.91
				16.31	16.35
				15.80	16.42
300	69.220	62.378	16.16	16.47	
			16.85	16.34	
			16.42	16.32	
2000	10	72.045	62.312	17.60	16.26
				15.71	16.46
				15.98	16.75
	50	71.181	62.439	16.89	16.78
				17.43	16.76
				17.14	16.36
	100	69.651	62.170	16.88	16.32
				15.81	16.50
				16.44	16.12
	200	68.293	62.048	16.10	16.91
				16.20	16.35
				16.85	16.47
300	68.103	62.190	16.11	16.47	
			15.80	16.34	

Tabla N° 18 . Continuación

Presión (mbar)	Tiempo (s)	Mth (g)	Mts (g)	hc(mm)	
3000	10	68.945	60.491	16.12	17.24
				16.75	17.26
				17.04	16.89
	50	69.025	62.205	18.03	18.22
				18.89	18.80
				18.09	18.40
	100	67.125	61.156	18.26	17.42
				17.27	17.96
				17.97	17.78

	200	65.902	60.824	17.40	17.32
				17.48	17.56
				17.48	17.45
	300	65.636	61.376	18.54	18.39
				18.46	18.55
				18.59	18.51
4000	10	67.536	59288	15.60	17.50
				15.62	17.55
				16.88	17.14
	50	67.458	61.164	17.45	17.94
				17.55	18.39
				17.86	17.94
	100	67.198	62.025	18.05	18.46
				18.13	19.81
				18.40	18.57
	200	66.481	62.076	17.63	18.31
				17.65	18.75
				17.69	18.10

Tabla N°19 Datos experimentales para las tortas de filtración de la mezcla de 30 formadas por sedimentación

P(mbar)	t(s)	Mth(g)	Mts(g)	hc(mm)	
	10	76.356	62.423	18.85	18.94
				19.01	18.87
				18.78	18.65
	50	75.900	62.438	19.20	19.36
				19.13	19.35
				19.12	19.04
				19.74	19.86

200	100	76.664	62.376	19.78	19.54
				19.92	19.60
				19.28	19.16
	200	76.156	62.372	19.32	19.25
				19.39	19.28
				20.26	20.43
	300	76.58	62.392	20.28	20.32
				20.29	19.98
				18.88	18.99
400	10	76.074	62.454	18.67	18.95
				18.53	19.26
				19.99	20.15
	50	76.013	62.376	19.83	19.79
				20.20	19.98
				19.78	19.89
	100	74.986	62.367	19.95	19.43
				20.01	19.62
				20.41	20.65
	200	74.677	62.320	20.16	19.99
				20.34	20.91
				20.00	19.65
	300	73.711	62.327	19.99	19.87
				19.79	20.70

Tabla N°19. Continuación

P(mbar)	t(s)	Mth(g)	Mts(g)	hc(mm)	
	10	75.829	62.23	20.93	20.98
				20.99	20.76
				20.96	20.84
	50	74.813	62.358	21.65	21.96
				21.78	21.54
				21.83	21.14

600	100	73.833	62.383	21.23	21.45
				21.49	21.19
				21.03	20.99
	200	71.884	62.400	19.86	19.98
				19.57	20.02
				19.89	19.84
	300	71.930	62.210	20.72	20.97
				20.85	20.57
				20.53	20.68
800	10	74.033	62.394	19.79	19.85
				19.62	19.82
				19.69	19.97
	50	71.453	62.417	19.64	19.84
				19.78	19.53
				19.91	19.14
	100	70.612	62.387	20.65	20.92
				20.48	20.66
				20.84	20.35
	200	69.653	62.354	19.99	20.05
				19.95	19.89
				20.13	19.93
	300	69.807	62.326	20.43	20.58
				20.45	20.26
				20.69	20.17

Tabla N° 19. Continuación

P(mbar)	t(s)	Mth(g)	Mts(g)	hc(mm)	
	10	72.539	62.46	18.74	18.52
				18.42	18.57
				19.05	19.14
	50	70.62	62.446	19.85	19.82
				19.52	19.46
				19.58	20.01

1000	100	69.377	62.382	19.26	19.15
				19.42	19.23
				18.99	19.51
	200	68.200	62.254	20.19	20.18
				20.11	20.19
				19.98	20.25
	300	69.026	62.307	21.95	21.92
				21.98	21.99
				21.92	21.94
2000	10	70.200	62.377	19.97	19.87
				19.58	20.03
				19.95	20.42
	50	68.705	62.368	19.89	19.57
				20.52	19.98
				19.72	19.66
	100	67.561	62.442	20.12	19.76
				20.22	19.99
				19.82	20.80
	200	66.677	62.412	19.42	19.55
				19.89	19.08
				19.25	19.33
	300	66.277	62.385	20.22	19.98
				19.99	19.93
				20.10	19.90

Tabla N°19. Continuación

P(mbar)	t(s)	Mth(g)	Mts(g)	hc(mm)	
	10	68.403	62.365	17.85	17.08
				17.44	17.27
				18.72	17.67
	50	67.150	62.413	18.70	19.08
				17.95	17.18
				17.55	18.09

3000	100	65.989	62.021	18.2	18.72
				19.17	18.79
				19.09	18.79
	200	64.826	61.800	19.62	17.00
				16.45	18.92
				22.25	18.85
	300	64.702	62.147	22.14	18.22
				14.44	17.21
				22.07	18.82
4000	10	67.539	62.205	18.95	20.02
				19.51	18.95
				19.50	19.39
	50	66.465	62.067	19.04	18.56
				19.42	19.81
				18.98	19.16
	100	65.797	62.119	19.89	18.27
				19.64	20.22
				20.2	19.64
	200	64.933	62.192	20.08	20.21
				15.7	15.5
				17.05	17.71
	300	64.770	62.249	19.48	19.94
				19.25	19.93
				19.56	19.63

Tabla N° 20. Datos experimentales de la torta de filtración para la mezcla amplia de 30 formadas por capas.

Presión (mbar)	Tiempo (s)	Mth (g)	Mts (g)	hc	
200	10	74.348	62.145	16.79	17.68
				17.35	17.89
				17.42	17.43
	50	74.036	62.148	16.96	17.42
				17.29	17.52
				17.36	17.71
	100	73.915	62.114	16.89	17.63
				17.23	17.76
				17.38	17.38

	200	73.683	62.004	16.72	17.62	
				17.26	17.65	
				17.42	17.33	
	300	73.203	62.026	16.50	17.27	
				16.71	17.62	
				16.99	17.02	
400	10	74.075	62.010	16.71	17.60	
				16.80	17.79	
				17.06	17.19	
	50	73.755	61.990	17.04	17.60	
				17.29	18.03	
				17.41	17.47	
	100	73.383	61.940	16.70	17.97	
				17.04	17.98	
				17.16	17.37	
	200	73.006	62.024	17.07	17.90	
				17.49	17.95	
				17.60	17.60	
	300	72.650	62.071	17.14	17.64	
				17.27	17.79	
				17.47	17.46	
	600	10	73.422	62.163	16.10	17.18
					17.06	17.64
					17.13	17.02
50		72.505	62.294	16.90	17.44	
				16.97	17.46	
				17.17	17.19	
100		71.243	62.124	16.22	16.55	
				16.32	16.60	
				16.37	16.41	
200		70.633	62.041	16.05	17.46	
				16.13	17.62	
				16.68	17.79	
300		70.549	62.001	16.12	16.98	
				16.27	16.29	
				16.57	16.65	

Tabla N°20. Continuación

Presión (mbar)	Tiempo (s)	mth (g)	mts (g)	hc(mm)		
800	10	73.572	62.052	16.91	17.69	
				17.36	17.96	
				17.49	17.48	
	50	70.902	61.995	16.41	17.46	
				16.46	17.49	
				16.55	16.87	
	100	69.753	62.104	16.43	16.98	
				16.59	17.71	
				16.71	16.88	
					16.55	17.03

	200	68.831	62.045	16.64	17.06
				16.82	16.82
				16.66	17.35
	300	68.003	62.137	16.66	17.76
				16.75	17.04
				17.15	17.67
1000	10	72.279	62.185	17.27	17.76
				17.67	17.50
				16.70	17.75
	50	70.409	62.002	17.20	17.93
				17.73	17.46
				16.97	17.80
	100	68.908	62.216	17.18	17.92
				17.63	17.50
				16.75	17.49
	200	68.224	62.153	17.32	17.62
				17.49	17.33
				16.70	17.27
300	67.586	62.136	16.95	17.28	
			16.98	17.04	
			16.21	17.33	
2000	10	69.40	61.990	16.37	17.46
				16.64	16.80
				15.26	17.44
	50	67.450	61.919	15.29	17.57
				17.40	16.59
				17.40	18.82
	100	66.583	62.124	17.71	19.41
				18.81	18.43
				17.17	18.11
	200	63.630	62.003	17.18	17.49
				17.40	17.61
				17.53	18.54
300	64.964	61.653	17.83	18.86	
			17.85	18.12	

Tabla N°20. Continuación

Presión (mbar)	Tiempo (s)	mth (g)	mts (g)	hc(mm)	
3000	10	66.622	61.426	17.74	17.61
				17.64	16.73
				17.06	17.36
	50	65.951	61.919	17.21	17.77
				17.37	17.83
				17.61	17.56
	100	65.579	61.498	16.57	17.31
				16.67	17.32
				16.83	16.94

	200	64.873	61.896	17.20	18.03
				17.25	18.12
				17.47	17.61
	300	64.891	61.973	18.48	19.06
				18.64	19.13
				18.76	18.81
4000	10	67.480	61.922	18.61	18.40
				18.11	18.87
				17.79	18.36
	50	64.443	60.795	18.73	18.60
				18.61	18.29
				18.50	18.21
	100	64.675	61.738	18.34	17.83
				17.64	18.68
				18.72	18.29
	200	64.170	61.548	17.86	17.83
				18.62	18.68
				18.20	18.24
300	64.393	61.949	17.14	18.06	
			16.29	17.71	
			16.14	17.07	

Tabla N° 21. Datos experimentales de la torta de filtración para la mezcla amplia de 80 formadas por sedimentación.

Presión (mbar)	Tiempo (s)	Mth (g)	Mts (g)	hc (mm)	
100	10	77.405	61.918	19.53	19.77
				19.64	20.20
				19.69	19.83
	50	77.086	61.983	19.00	19.43
				19.08	19.56
				19.12	19.28
	100	77.900	61.914	19.11	19.03
				20.23	19.28
				19.14	19.36

	200	76.032	62.132	18.47	18.52	
				19.36	18.40	
				18.70	18.69	
	300	75.452	61.913	18.30	17.30	
				17.80	17.62	
				17.36	17.68	
200	10	76.976	62.006	18.95	19.35	
				19.15	19.38	
				19.28	19.29	
	50	77.256	62.089	17.46	20.47	
				18.09	20.52	
				19.56	19.22	
	100	78.357	62.151	19.73	20.15	
				19.78	21.20	
				20.00	20.28	
	200	74.974	62.180	19.20	19.84	
				19.29	19.93	
				19.61	19.67	
	300	68.615	62.182	18.52	20.20	
				19.12	20.95	
				20.17	20.11	
	400	10	77.323	62.059	19.78	20.46
					19.80	20.78
					20.25	20.32
50		76.305	62.208	19.87	21.30	
				20.22	21.42	
				20.52	20.67	
100		74.310	62.366	20.30	21.42	
				20.40	21.78	
				20.74	20.93	
200		72.660	62.279	20.85	21.62	
				20.95	21.34	
				21.62	21.28	
300		69.346	62.252	20.52	21.30	
				20.62	21.60	
				20.63	20.93	

Tabla N°21. Continuación

Presión (mbar)	Tiempo (s)	mth (g)	mts (g)	hc(mm)		
600	10	74.190	62.401	20.32	20.93	
				20.37	21.23	
				20.38	20.73	
	50	74.179	59.204	20.81	21.90	
				21.33	22.30	
				21.56	21.58	
	100	69.003	62.173	19.86	21.70	
				20.11	21.87	
				20.80	20.87	
					19.66	21.04

	200	68.555	62.125	19.67	21.37	
				20.03	20.53	
				19.11	20.97	
	300	68.669	62.088	19.45	21.02	
				19.98	20.36	
				19.87	21.76	
800	10	71.926	62.136	20.21	22.54	
				21.46	21.49	
				20.32	21.03	
	50	69.719	62.142	20.41	21.10	
				20.92	20.76	
				20.12	20.85	
	100	69.548	62.199	20.44	20.87	
				20.77	20.73	
				20.33	21.63	
	200	68.282	62.265	20.77	21.87	
				20.89	21.10	
				20.23	21.91	
	300	68.327	61.964	20.57	22.32	
				21.31	21.27	
				20.06	19.76	
	1000	10	69.983	61.851	19.53	20.50
					19.48	19.87
					20.89	20.97
50		69.593	62.003	21.52	21.33	
				21.56	21.254	
				21.63	20.98	
100		68.423	62.176	21.80	20.60	
				21.60	21.32	
				20.54	20.47	
200		67.328	62.031	20.93	20.40	
				20.86	20.64	
				20.52	20.54	
300		67.127	62.260	21.24	20.38	
				20.95	20.73	

Tabla N° 21. Continuación

Presión (mbar)	Tiempo (s)	mth (g)	mts (g)	hc(mm)	
2000	10	69.964	61.924	19.58	20.62
				19.78	20.80
				20.37	20.23
	50	68.977	62.130	19.09	20.59
				19.15	20.66
				20.37	20.19
	100	68.054	62.232	19.68	21.26
				19.85	21.85
				20.12	20.55

	200	66.686	62.083	19.78	21.14
				19.83	21.30
				20.03	20.58
	300	66.822	62.402	19.80	19.69
				18.30	18.82
				20.25	20.75
3000	10	68.642	62.023	20.15	20.39
				20.19	20.63
				20.29	20.38
	50	66.047	62.344	19.11	20.00
				19.16	20.28
				19.20	19.66
	100	67.475	61.945	19.66	20.31
				20.02	20.33
				20.14	20.09
	200	65.396	62.140	19.54	20.25
				19.72	20.43
				19.88	19.96
300	65.989	62.110	19.87	20.45	
			19.94	20.77	
			20.23	20.25	

### APÉNDICE C. Curvas de cinética de deslicorización y cálculos tipo.

Apéndice C-1. Curvas de cinética de deslicorización para las mezclas diseñadas en este trabajo.

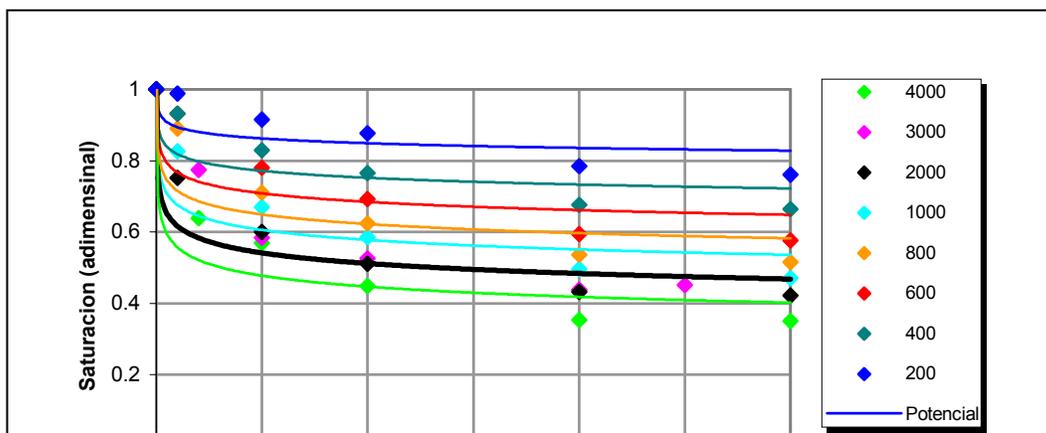


Figura N°51. Curvas de cinética de deslicorización para la mezcla de 15, sedimentada.

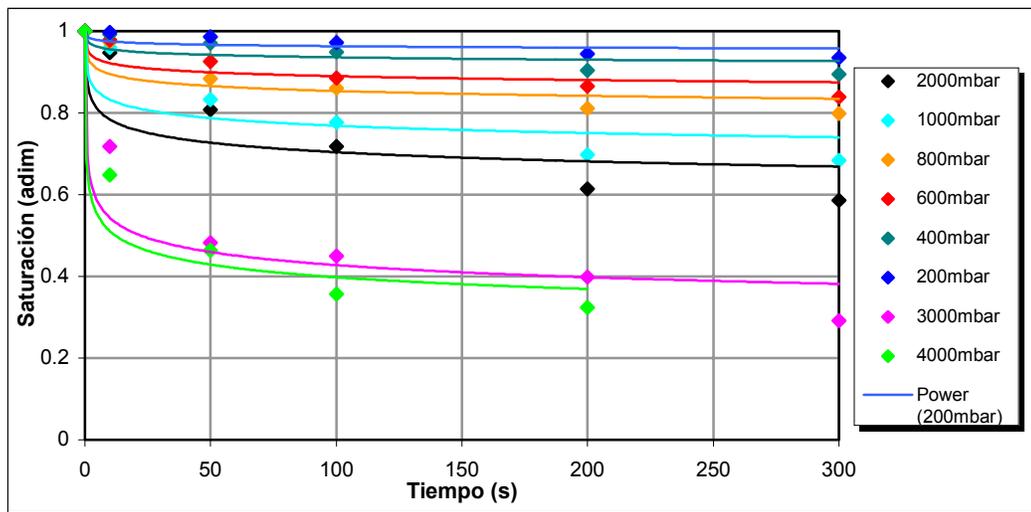


Figura N°52. Curvas de cinética de deslicorización para la mezcla de 15, homogénea.

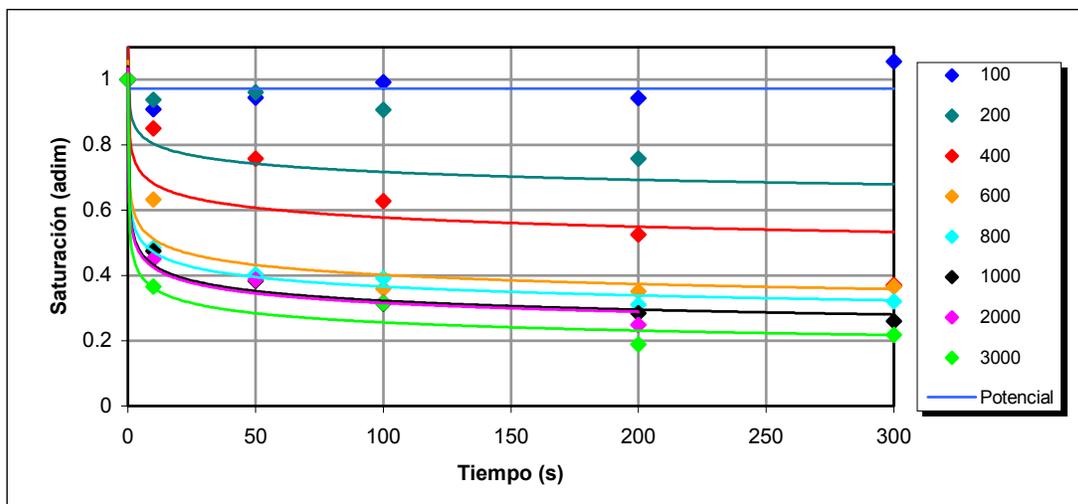


Figura N°53. Curvas de cinética de deslicorización para la mezcla de 80, sedimentada

**Apéndice C - 2. Cálculo tipo para determinar las curvas de cinética de deslicorización.**

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

1. Cálculo de la saturación para la mezcla amplia 30 homogénea a una presión de 2000 mbar y un tiempo de deslicorización de 10 seg.

**1.1. Cálculo de la humedad final (H).**

$$H = \frac{M_{th} - M_{ts}}{M_{th} - M_p} = \frac{69.402g - 61.990g}{69.402g - 2.6g}$$

$$H = 0.1109$$

**1.2. Cálculo de altura promedio (hc).**

$$hc = \frac{\sum hc}{5}$$

$$hc = \frac{16.20mm + 16.40mm + 16.60mm + 17.30mm + 17.50mm}{5}$$

$$hc = 16.80 \text{ mm}$$

**1.3. Cálculo de la porosidad (ε).**

$$\varepsilon = 1 - \frac{M_{ts} - M_p}{\rho_s \cdot A \cdot hc} = 1 - \frac{61.99g - 2.6g}{2.71 \frac{g}{cm^3} * 19.63cm^3 * 1.680cm}$$

$$\varepsilon = 0.3355$$

**1.4. Cálculo de la saturación (S).**

$$S = \frac{\rho_s}{\rho_f} * \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} * \frac{H}{1 - H} = \frac{2.71 \frac{g}{cm^3}}{1 \frac{g}{cm^3}} * \frac{1 - 0.3355}{0.3355} * \frac{0.1109}{1 - 0.1109}$$

$$S = 0.6697$$

2. Cálculo de la saturación de ajuste para la mezcla amplia de gruesos homogénea a una presión de 2000 mbar y un tiempo de deslicorización de 10 seg.

**2.1 Cálculo de la saturación de equilibrio experimental (S).**

$$S_{\infty} = a' * (t_{\infty})^{b'} = 1.475 * 300^{-0.3146}$$

Donde a' y b' son los valores de la curva de ajuste de la curva de cinética de deslicorización obtenida experimentalmente.

$$S_{\infty} = 0.2452$$

**2.2. Cálculo de la saturación de ajuste (S<sub>cal</sub>).**

Esta saturación para cada uno de los cinco tiempos de deslicorización 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:

$$S_{cal} = (1 + a*t)^{-b} * (1 - S_{\infty}) + S_{\infty}$$

obteniéndose:

$$a = 0.0716$$

$$b = 0.9194$$

$$S_{cal} = (1 + 0.0717 * 10)^{-0.9194} * (1 - 0.245) + 0.245$$

$$S_{cal} = 0.7045$$

**APÉNDICE D. Curvas de presión capilar y cálculos tipo.**

Apéndice D - 1. Curvas de presión capilar para las mezclas diseñadas en este trabajo empleando el modelo A (potencial).

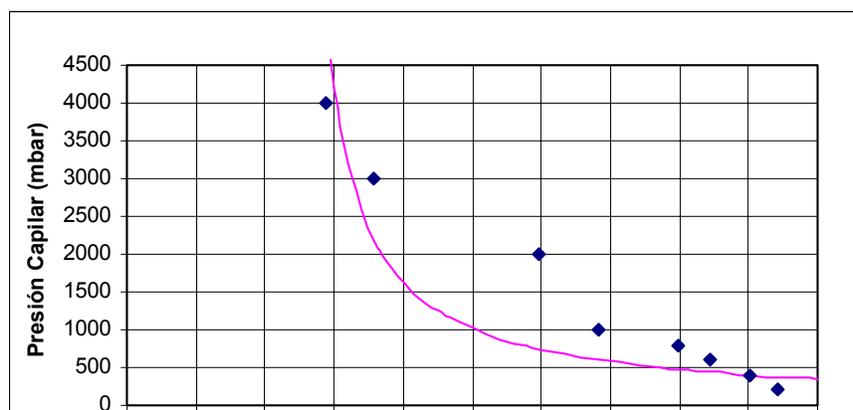


Figura N°54. Curva de presión capilar para la mezcla amplia de 15, homogénea.  
Modelo A

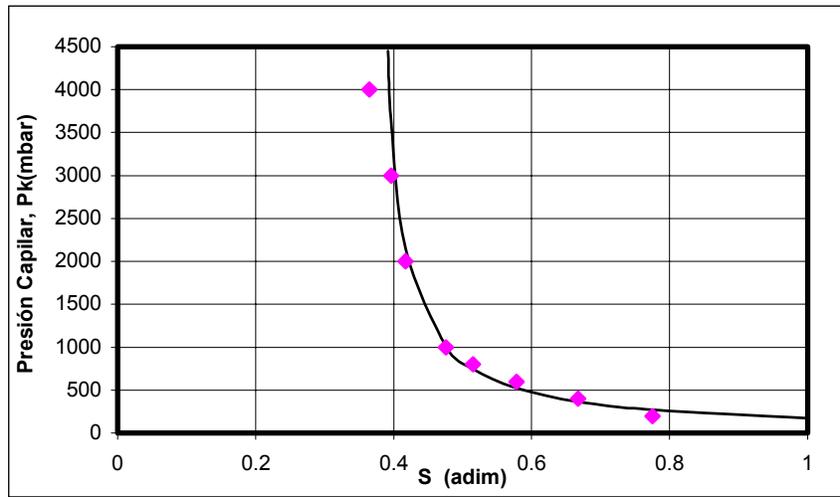


Figura N°55. Curva de presión capilar para la mezcla amplia de 15, sedimentada.  
Modelo A

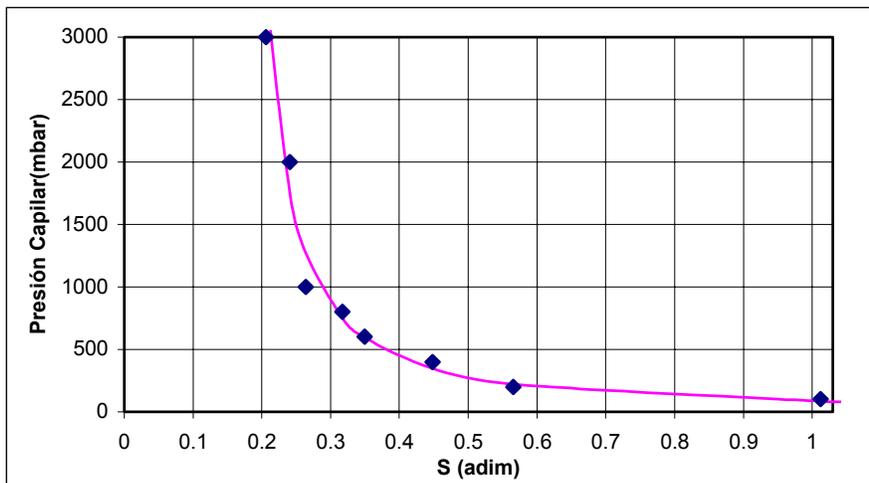


Figura N°56. Curva de presión capilar para la mezcla amplia de 80, sedimentada. Modelo A

**Apéndice D – 2. Curvas de presión capilar para las mezclas diseñadas en este trabajo empleando el modelo B (Rosín Rammler).**

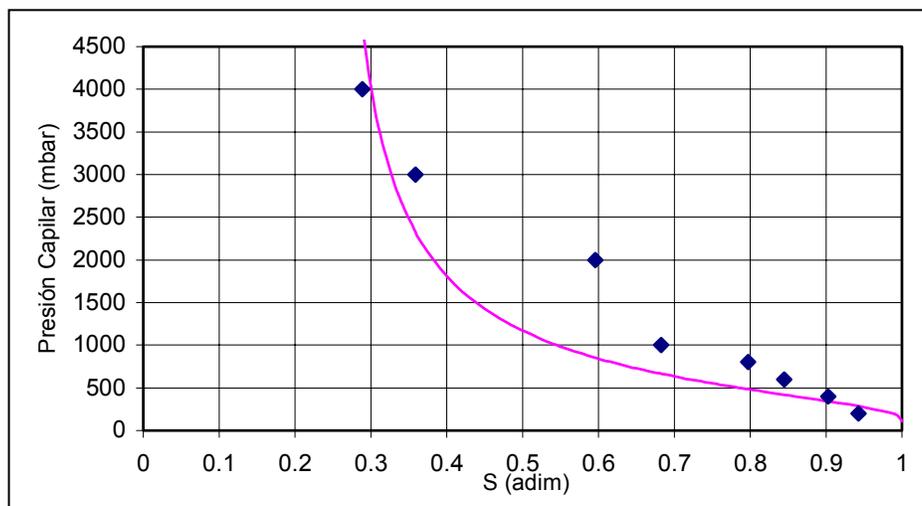


Figura N°57. Curva de presión capilar para la mezcla amplia de 15, homogénea. Modelo B

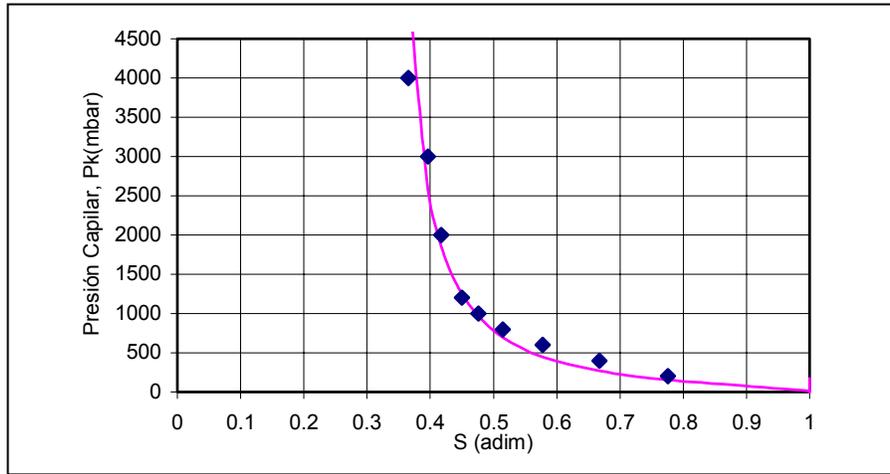


Figura N°58. Curva de presión capilar para la mezcla amplia de 15, segregada. Modelo B

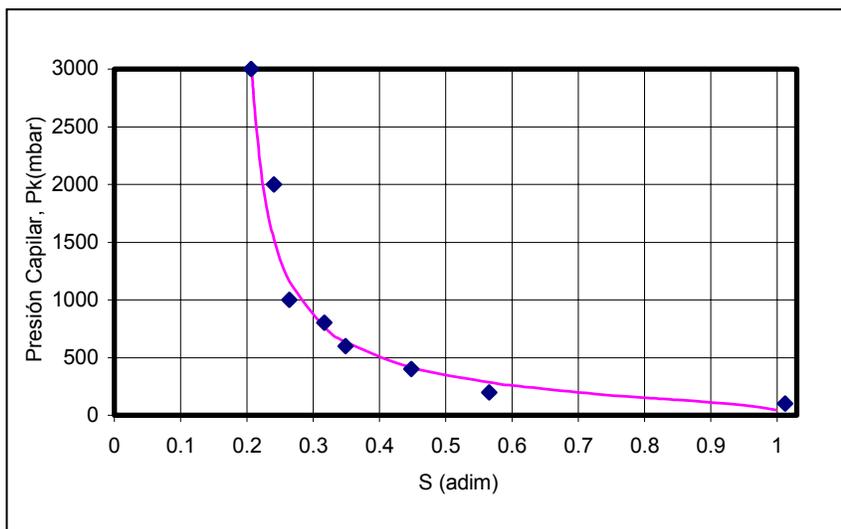


Figura N° 59. Curva de presión capilar para la mezcla amplia de 80, segregada.

Modelo B

Apéndice D - 3. Curvas de presión capilar usando parámetros básicos estimados por el método de Sorrentino empleando el modelo B (Rosín Rammler).

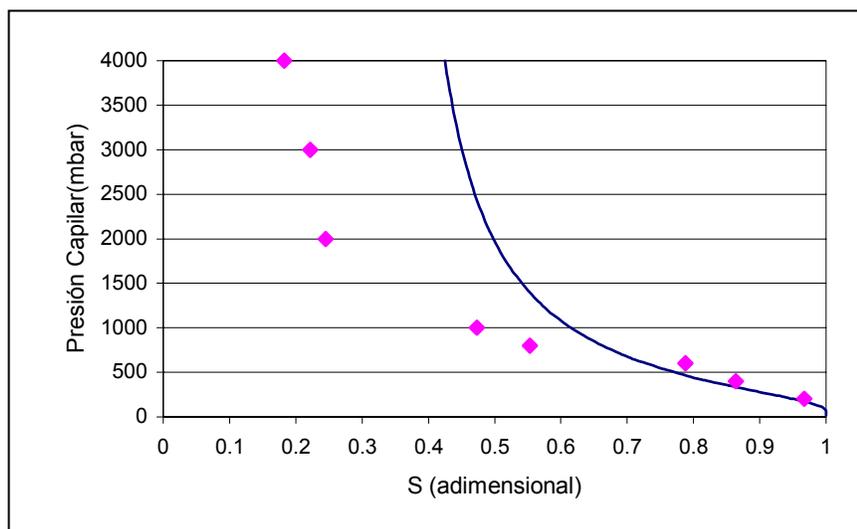


Figura N° 60. Curva de presión capilar para la mezcla amplia de 30, homogénea, con parámetros estimados por Sorrentino. Modelo B

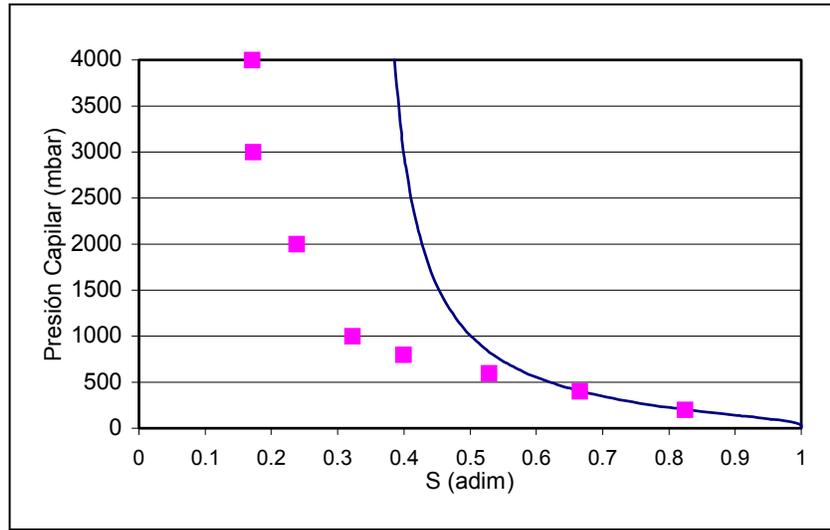


Figura N°61 . Curva de presión capilar para la mezcla amplia de 30, segregada, con parámetros estimados por Sorrentino. Modelo B

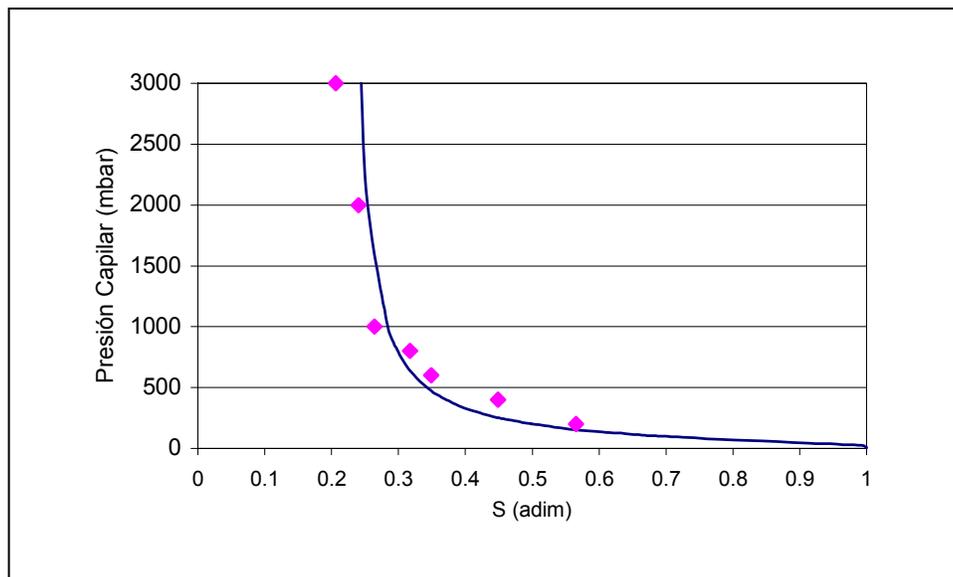


Figura N°62. Curva de presión capilar para la mezcla amplia de 80, segregada, con parámetros estimados por Sorrentino. Modelo B

#### **Apéndice D - 4. Cálculos tipo para determinar las curvas de presión capilar.**

Seguidamente se presentan los cálculos tipo necesarios para determinar la curva de presión capilar para la mezcla amplia de 30 formada por capas compactas a la presión de 2000 mbar.

A partir de los datos de la saturación de equilibrio (S.) para cada una de las diferencias de presión aplicada (200, 400, 600, 800, 1000, 2000, 3000 y 4000 mbar) se calcula la saturación reducida de equilibrio.

Los valores de los parámetros de la curva de presión capilar se determinaron a través de cada uno de los modelos empleados en este trabajo, a saber, y de la misma manera, es decir, se elaboro el ajuste de la misma (ajuste potencial y Rosín Rammler), usando parámetros obtenidos como se presentan a continuación:

##### **1. Modelo A:**

Usando el modelo potencial se permitieron variar libremente los tres parámetros: Saturación remanente ( $S_r$ ), presión capilar de entrada ( $P_{ke}$ ) y el

parámetro de distribución de tamaño de poro ( $\xi$ ) empleando para ello la herramienta solver de Excel, obteniendo los siguientes resultados:

$$S_r = 0.1823$$

$$P_{ke} = 356 \text{ mbar}$$

$$\xi = 0.7249$$

Una vez obtenidos los parámetros básicos experimentales de la curva de presión capilar se obtienen:

$$S^* = \frac{0.2452 - 0.1823}{1 - 0.1823}$$

$$S^* = 0.0769$$

$$P_k(\text{calculado}) = P_{ke} * \left( \frac{S_\infty - S_r}{1 - S_r} \right)^{-\xi}$$

$$P_k(\text{calculado}) = 356 \text{ mbar} * \left( \frac{0.2452 - 0.1823}{1 - 0.2452} \right)^{-0.7249}$$

$$P_k(\text{calculado}) = 2156 \text{ mbar}$$

## 2. Modelo B:

Al usar este modelo, al igual que en el modelo anterior, se dejaron variar los parámetros Saturación remanente ( $S_r$ ), presión capilar ( $P_k'$ ) y el parámetro de distribución de tamaño de poro ( $\xi$ ) empleando para ello la herramienta solver de Excel, obteniendo los siguientes resultados:

$$S_r = 0.0908$$

$$P_k' = 630 \text{ mbar}$$

$$\xi = 0.7996$$

obteniéndose a su vez  $S^* = 0.1698$ , y se obtiene la Presión capilar ( $P_k$ ) por medio de la siguiente ecuación:

$$Pk_{RR} = Pk' \left[ \text{Ln} \left( \frac{1}{1-S^*} \right) \right]^{-\xi}$$

$$Pk_{RR} = 630 \text{ mbar} \left[ \text{Ln} \left( \frac{1}{1-0.1698} \right) \right]^{-0.7996}$$

$$Pk_{RR} = 2417 \text{ mbar}$$

## 2.1 Parámetros básicos estimados, a través del método de Sorrentino

Los parámetros de la curva de presión capilar Saturación remanente ( $S_r$ ), presión capilar ( $Pk'$ ) y el parámetro de distribución de tamaño de poro ( $\xi$ ) se obtuvieron mediante las figuras N°14, N°15 y N°16 (sección 3.3.2), respectivamente, estas gráficas propuestas por Sorrentino permiten estimar estos parámetros con información básica granulométrica de la mezcla en estudio, de acuerdo a la información granulométrica de las mezclas con las cuales se trabajó en este trabajo (ver apéndice A) según las figuras mencionadas anteriormente se obtuvieron los siguientes parámetros estimados:

$$S_r = 0.3387$$

$$Pk' = 533$$

$$\xi = 1.0258$$

De igual manera se usó el modelo de Rosín Rammler para ajustar la curva de presión capilar y se obtuvo la presión capilar estimada por Sorrentino ( $Pk_{PS}$ ):

$$Pk_{PS} = 533 \text{ mbar} \left[ \text{Ln} \left( \frac{1}{1-0.1414} \right) \right]^{-1.0258}$$

$$P_{k_{PS}} = 3670 \text{ mbar}$$

### Apéndice E. Resultados y cálculos tipo de porosidad por el Método de Yu Standish

Los cálculos realizados para determinar la porosidad mediante este método, están referidos a tortas de la mezcla amplia de 15 formada por sedimentación (poured).

- **Determinación de pseudos-componentes de la mezcla**

A partir de la curva de distribución acumulada, se obtienen los pseudo componentes de la mezcla, fraccionándola en intervalos de 5%, ordenándose de mayor a menor tamaño (x).

Para el pseudo-componente 10 ( $i=10$ ), la fracción ( $F_{vi}$ ) y el diámetro ( $x_i$ ) y se determina como:

$$F_{vi} = \Delta F(x) = (55-50)\% = 5\%$$

$$x_i = \frac{\hat{x}_{i, (F(x)=55\%)} + \hat{x}_{i, (F(x)=50\%)}}{2} = \frac{15.07 + 13.34}{2}$$

$$X_{10}=14.20$$

- **Porosidad Individual ( $\varepsilon_i$ )**

Para cada pseudo componente se calculó la porosidad inicial utilizando la ecuación (30) propuesta por Yu Standish utilizando los parámetros de ajuste (a, b,  $\varepsilon_0$ ) encontrados en el trabajo de López-Pérez (2001). Para el pseudo componente 10 (i=10) en lecho poured se tiene que:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_0 + (1 - \varepsilon_0) \cdot \text{Exp}(-a \cdot x_i^b)$$

$$\varepsilon_{10} = 0.5092 + (1 - 0.5092) \cdot \exp(-1.3799 \cdot (14.20)^{0.3487})$$

$$\varepsilon_{10} = 0.5243$$

- **Volumen específico individual ( $V_i$ )**

Para i=10 se tiene:

$$V_i = \frac{1}{1 - \varepsilon_i} = \frac{1}{1 - 0.5243}$$

$$V_{10} = 2.102$$

- **Razón de tamaño volumétrico ( $R_{i,j}$ )**

Para cada pseudo componente (i) se determina la razón de tamaño volumétrico con respecto a cada pseudo componente (j). Para el pseudo componente 10 (i=10) se determina la razón de tamaño volumétrico con respecto al pseudo componente 1 (j=1):

$$R_{i,j} = x_i / x_j = x_{10} / x_1 = 14.20 / 117.81$$

$$R_{10,1} = 0.1205$$

- **Razón de Empaque ( $r_{i,j}$ )**

Utilizando los parámetros P encontrados en el trabajo de López-Pérez (2001), se determinó la razón de empaque para cada pseudo componente (i) respecto a cada pseudo componente (j), lo cual es:

$$r_{i,j} = R_{i,j}^P = (0.1205)^{0.52}$$

$$r_{10,1} = 0.3328$$

- **Funciones  $f(r_{i,j})$  y  $g(r_{i,j})$**

Para cada razón de empaque se determinan las funciones  $f(r_{i,j})$  y  $g(r_{i,j})$  involucradas en el modelo de Yu Standish:

$$f(r_{i,j}) = (1-r_{i,j})^{3.33} + 2.81 \cdot r_{i,j} \cdot (1-r_{i,j})^{2.77}$$

$$f(r_{1,10}) = (1-0.3328)^{3.33} + 2.81 \cdot (0.3328) \cdot (1-0.3328)^{2.77}$$

$$f(r_{1,10}) = 0.5647$$

$$g(r_{i,j}) = (1-r_{i,j})^{1.97} + 0.36 \cdot r_{i,j} \cdot (1-r_{i,j})^{3.67}$$

$$g(r_{1,10}) = (1-0.3328)^{1.97} + 0.36 \cdot (0.3328) \cdot (1-0.3328)^{3.67}$$

$$g(r_{1,10}) = 0.4777$$

- **Volumen específico de empaque individual para cada componente ( $V_i^T$ )**

Se tiene que:

$$(V_i)^T = \sum_{j=1}^{i-1} [V_j - (V_j - 1)g(r_{i,j})]F_{V_j} + V_i F_{V_i} + \sum_{j=i+1}^n V_j (1 - f(r_{i,j}))F_{V_j}$$

$$(V_{10})^T = \sum_{j=1}^{10-1} [V_j - (V_j - 1)g(r_{10,j})]F_{V_j} + V_{10} F_{V_{10}} + \sum_{j=10+1}^{20} V_j (1 - f(r_{10,j}))F_{V_j}$$

$$V_{10}^T = 1.8662$$

- **Volumen específico de la mezcla ( $V_e$ )**

Una vez obtenidos todos los volúmenes específicos de empaque individual para cada pseudo componente se considera el valor máximo de ellos como el valor de volumen específico de la mezcla:

$$V_e = \max (1.6341; 1.7780; 1.8398; 1.8783; 1.9002; 1.9104; 1.9124; \\ 1.9082; 1.8988; 1.8848; 1.8662; 1.8426; 1.8137; 1.7784; \\ 1.7358; 1.6829; 1.6164; 1.5295; 1.4024; 0.9525)$$

$$V_e = 1.9124$$

- Porosidad de la mezcla ( $\varepsilon$ )

$$\varepsilon = 1 - \frac{1}{V_e} = 1 - \frac{1}{1.9124}$$

$$\varepsilon = 0.477$$

Tabla N°22 Resultados del cálculo de porosidad por el método de Yu Standish para la mezcla amplia de 15

Pseudo Componente (i)	Mecanismo de Sedimentación (poured packing)			Mecanismo por capas (tapped packing)		
	Porosidad individual $\varepsilon_i$ (adim)	Volumen específico individual $V_i$ (adim)	Volumen específico de empaque individual $V_i^T$ (adim)	Porosidad individual $\varepsilon_i$ (adim)	Volumen específico individual $V_i$ (adim)	Volumen específico de empaque individual $V_i^T$ (adim)
20	0.6136	2.588	1.6341	0.5891	2.433	1.371
19	0.5799	2.380	1.7780	0.5490	2.218	1.494
18	0.5649	2.298	1.8398	0.5296	2.126	1.545
17	0.5543	2.244	1.8783	0.5149	2.062	1.575
16	0.5466	2.205	1.9002	0.5034	2.014	1.589
15	0.5407	2.177	1.9104	0.4943	1.978	1.591
14	0.5362	2.156	1.9124	0.4867	1.949	1.586
13	0.5325	2.139	1.9082	0.4803	1.924	1.573
12	0.5294	2.125	1.8988	0.4746	1.903	1.556
11	0.5267	2.113	1.8848	0.4694	1.885	1.533
10	0.5243	2.102	1.8662	0.4646	1.868	1.504
9	0.5222	2.093	1.8426	0.4601	1.852	1.470
8	0.5203	2.085	1.8137	0.4557	1.837	1.430
7	0.5185	2.077	1.7784	0.4515	1.823	1.382
6	0.5169	2.070	1.7358	0.4474	1.810	1.326
5	0.5154	2.064	1.6829	0.4432	1.796	1.259
4	0.5140	2.058	1.6164	0.4389	1.782	1.117
3	0.5127	2.052	1.5295	0.4344	1.768	1.073
2	0.5114	2.047	1.4024	0.4292	1.752	0.930
1	0.5095	2.039	0.9525	0.4180	1.718	0.501
Vol. específico de la mezcla $V_e$ (adim)			1.9124	1.5915		

Tabla N°23 Resultados del cálculo de porosidad por el método de Yu Standish para la mezcla amplia de 30

Pseudo Componente (i)	Mecanismo de Sedimentación (poured packing)			Mecanismo por capas (tapped packing)		
	Porosidad individual $\epsilon_i$ (adim)	Volumen específico individual $V_i$ (adim)	Volumen específico de empaque individual $V_i^T$ (adim)	Porosidad individual $\epsilon_i$ (adim)	Volumen específico individual $V_i$ (adim)	Volumen específico de empaque individual $V_i^T$ (adim)
20	0.5880	2.427	1.5288	0.5591	2.268	1.2765
19	0.5498	2.221	1.7078	0.5084	2.034	1.4073
18	0.5364	2.157	1.7821	0.4872	1.950	1.4665
17	0.5295	2.125	1.8197	0.4749	1.905	1.4961
16	0.5253	2.106	1.8396	0.4667	1.875	1.5099
15	0.5223	2.093	1.8498	0.4604	1.853	1.5143
14	0.5200	2.084	1.8532	0.4552	1.836	1.5117
13	0.5182	2.076	1.8513	0.4508	1.821	1.5033
12	0.5168	2.069	1.8447	0.4470	1.808	1.4895
11	0.5155	2.064	1.8336	0.4435	1.797	1.4704
10	0.5145	2.060	1.8181	0.4403	1.787	1.4460
9	0.5135	2.056	1.7979	0.4374	1.777	1.4160
8	0.5128	2.052	1.7725	0.4346	1.769	1.3799
7	0.5121	2.049	1.7412	0.4320	1.760	1.3369
6	0.5115	2.047	1.7023	0.4294	1.753	1.2853
5	0.5109	2.045	1.6540	0.4269	1.745	1.2231
4	0.5104	2.043	1.5915	0.4244	1.737	1.1456
3	0.5100	2.041	1.5054	0.4218	1.729	1.0432
2	0.5096	2.039	1.3691	0.4187	1.720	0.8909
1	0.5092	2.038	0.9152	0.4135	1.705	0.4691
Vol. específico de la mezcla $V_e$ (adim)			1.8532	1.5143		

Tabla N°24 Resultados del cálculo de porosidad por el método de Yu Standish para la mezcla amplia de 80

Pseudo Componente (i)	Mecanismo de Sedimentación (poured packing)			Mecanismo por capas (tapped packing)		
	Porosidad individual $\epsilon_i$ (adim)	Volumen específico individual $V_i$ (adim)	Volumen específico de empaquete individual $V_i^T$ (adim)	Porosidad individual $\epsilon_i$ (adim)	Volumen específico individual $V_i$ (adim)	Volumen específico de empaquete individual $V_i^T$ (adim)
20	0.5380	2.164	1.546	0.4898	2.268	1.2711
19	0.5224	2.094	1.690	0.4606	2.034	1.3741
18	0.5176	2.073	1.750	0.4493	1.950	1.4168
17	0.5149	2.062	1.789	0.4418	1.905	1.4427
16	0.5132	2.054	1.814	0.4362	1.875	1.4567
15	0.5120	2.049	1.828	0.4318	1.853	1.4613
14	0.5112	2.046	1.834	0.4284	1.836	1.4577
13	0.5107	2.044	1.831	0.4257	1.821	1.4474
12	0.5103	2.042	1.823	0.4235	1.808	1.4312
11	0.5100	2.041	1.809	0.4217	1.797	1.4103
10	0.5098	2.040	1.791	0.4202	1.787	1.3855
9	0.5096	2.039	1.770	0.4190	1.777	1.3575
8	0.5095	2.039	1.745	0.4180	1.769	1.3264
7	0.5095	2.039	1.718	0.4171	1.760	1.2922
6	0.5094	2.038	1.687	0.4163	1.753	1.2543
5	0.5093	2.038	1.652	0.4157	1.745	1.2116
4	0.5093	2.038	1.611	0.4150	1.737	1.1625
3	0.5093	2.038	1.561	0.4144	1.729	1.1033
2	0.5092	2.038	1.493	0.4138	1.720	1.0239
1	0.5092	2.038	1.297	0.4128	1.705	0.8067
Vol. específico de la mezcla $V_e$ (adim)			1.8337	1.4613		

## APÉNDICE F. Resultados de Permeabilidad

Para realizar el cálculo de los valores de permeabilidad se tomaron los resultados del trabajo realizado por Rojas (2002) y Sorrentino (2002) los cuales arrojan grandes avances en la predicción de este parámetro.

Para ello se tomaron de las gráficas resultantes de este trabajo (figuras N°61 y 62) los valores que se presentan en la tabla N°25

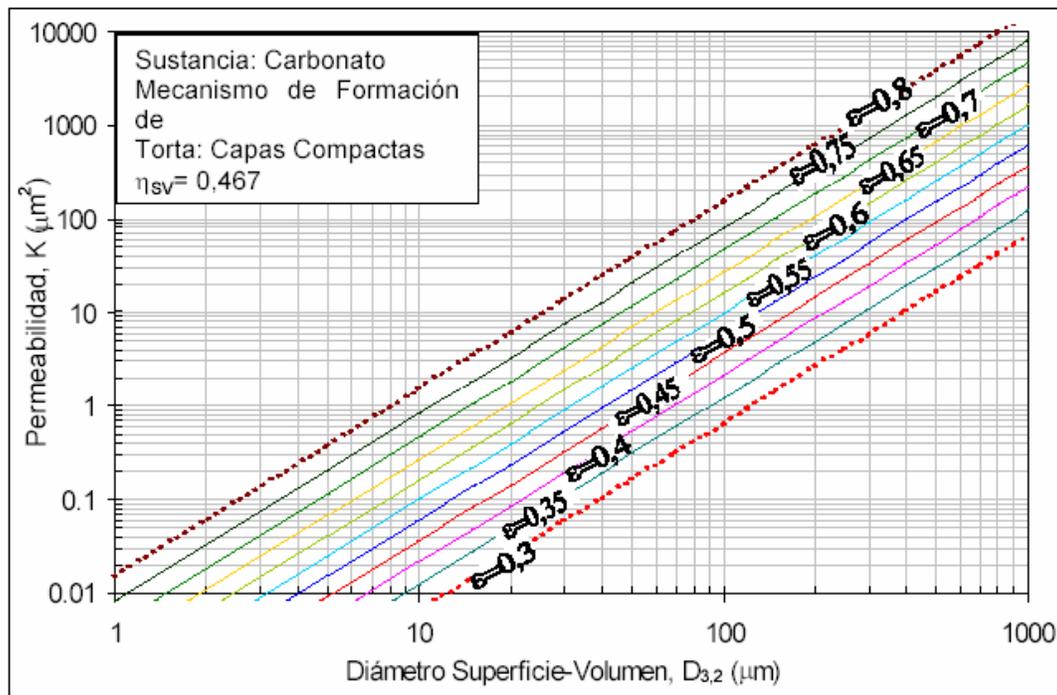


Figura N° 63. Predicción de la permeabilidad para tortas de carbonato formadas por capas compactas variando la porosidad

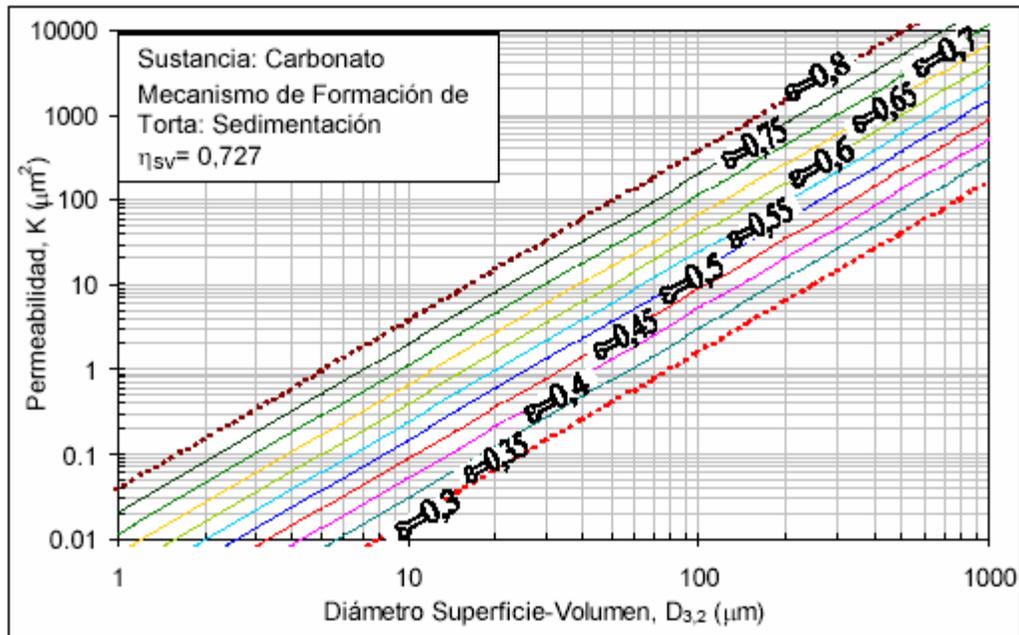


Figura N° 64. Predicción de la permeabilidad para tortas de carbonato formadas por sedimentación variando la porosidad

Tabla N° 25. Resultados de permeabilidad

Mezcla por tipo de formación de torta	Permeabilidad			
	600	800	1000	2000
15-sed	$3.2832 \times 10^{-14}$	$2.996 \times 10^{-14}$	$2.840 \times 10^{-14}$	$2.8974 \times 10^{-14}$
15-capas	$5.8004 \times 10^{-14}$	$4.8443 \times 10^{-14}$	$4.6569 \times 10^{-14}$	$4.4368 \times 10^{-14}$
30-sed	$1.7796 \times 10^{-13}$	$1.4318 \times 10^{-13}$	$1.3672 \times 10^{-13}$	$1.3437 \times 10^{-13}$
30-capas	$1.5596 \times 10^{-13}$	$1.731 \times 10^{-13}$	$2.002 \times 10^{-13}$	$2.1317 \times 10^{-13}$
80-sed	$1.5240 \times 10^{-12}$	$1.505 \times 10^{-12}$	$1.409 \times 10^{-12}$	$1.2701 \times 10^{-12}$

**Apéndice G. Modelos de cinética de deslicorización a partir de información básica experimental**

A continuación se presentan las gráficas del resultado de la simulación de los modelos con los parámetros obtenidos a partir de información básica experimental ajustando los datos con el modelo A (ajuste potencial)

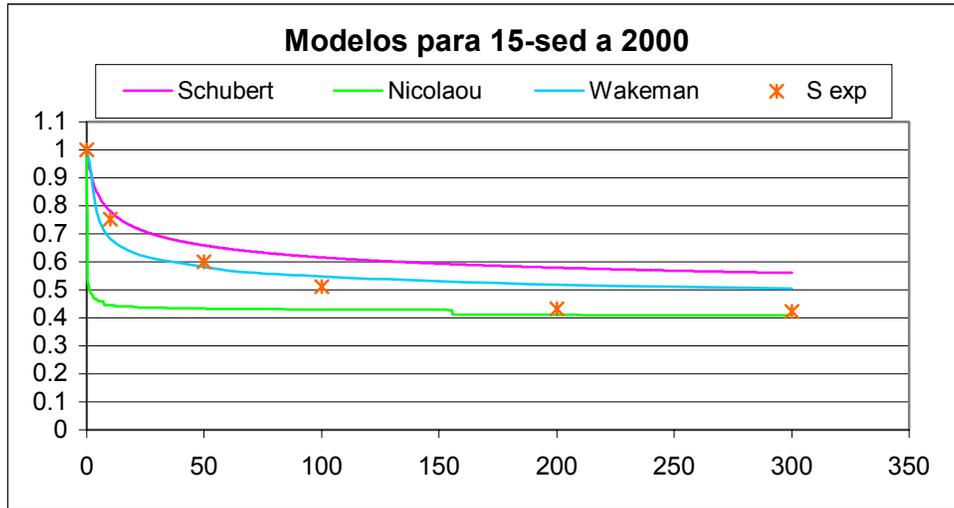


Figura N° 65. Modelos de cinética para la mezcla 15 formada por sedimentación a 2000 mbar

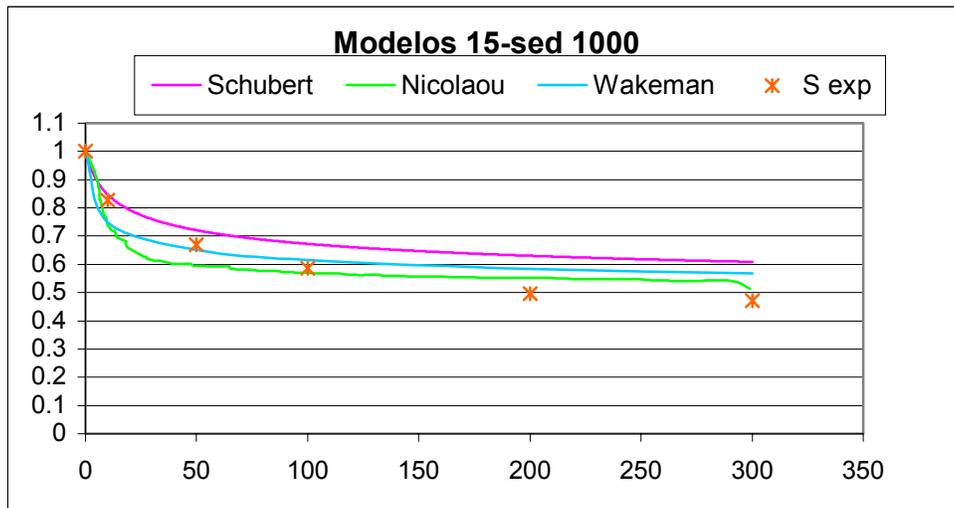


Figura N° 66. Modelos de cinética para la mezcla 15 formada por sedimentación a 1000 mbar

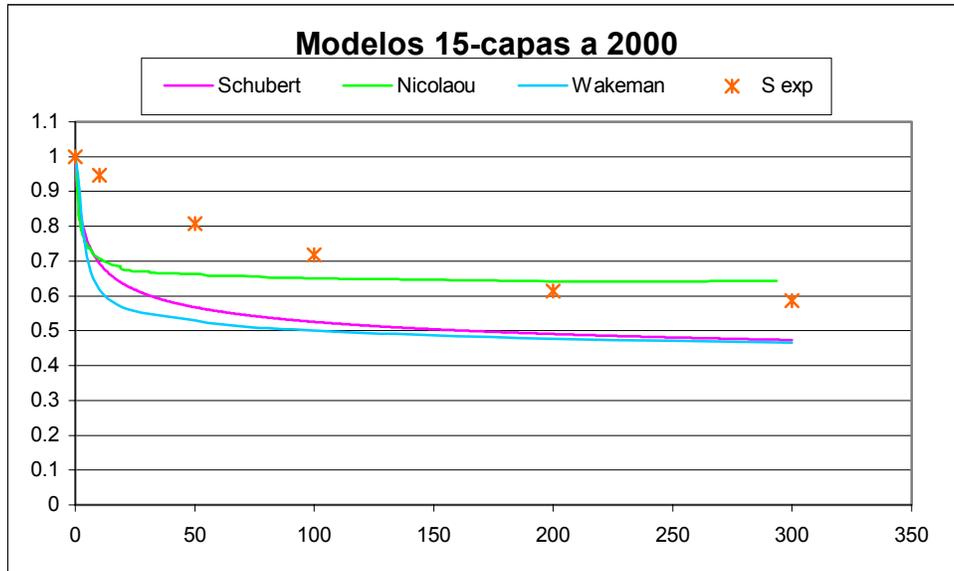


Figura N° 67. Modelos de cinética para la mezcla 15 formada por capas compactas a 2000 mbar

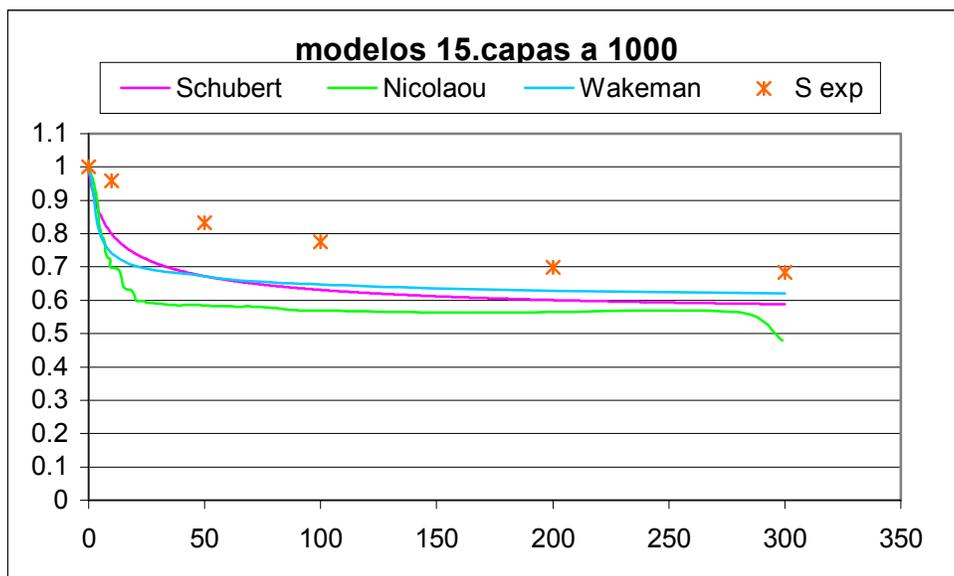


Figura N° 68. Modelos de cinética para la mezcla 15 formada por capas compactas a 1000 mbar

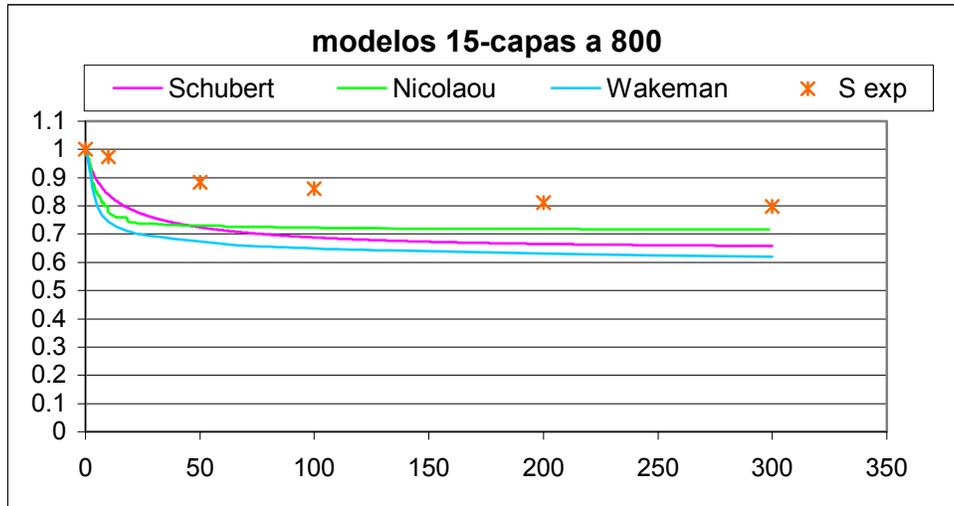


Figura N° 69. Modelos de cinética para la mezcla 15 formada por capas compactas a 800 mbar

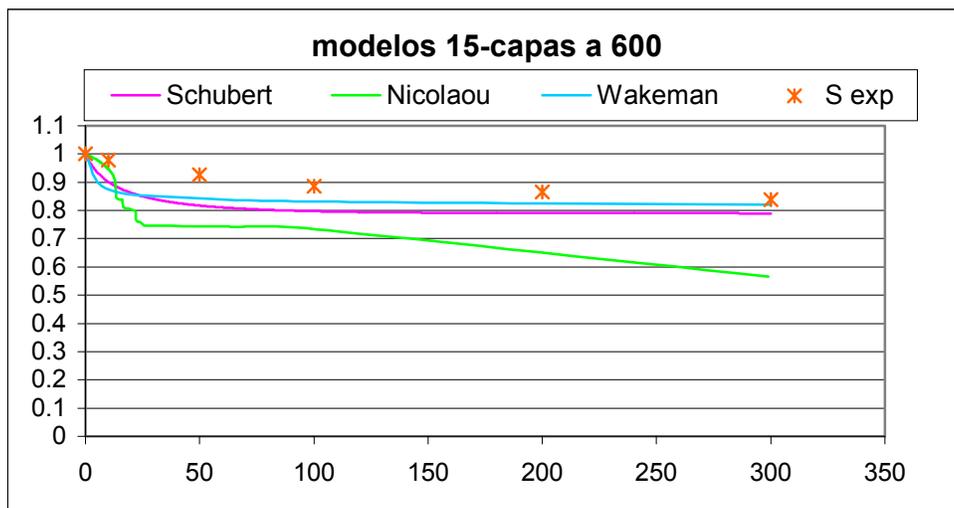


Figura N° 70. Modelos de cinética para la mezcla 15 formada por capas compactas a 600 mbar

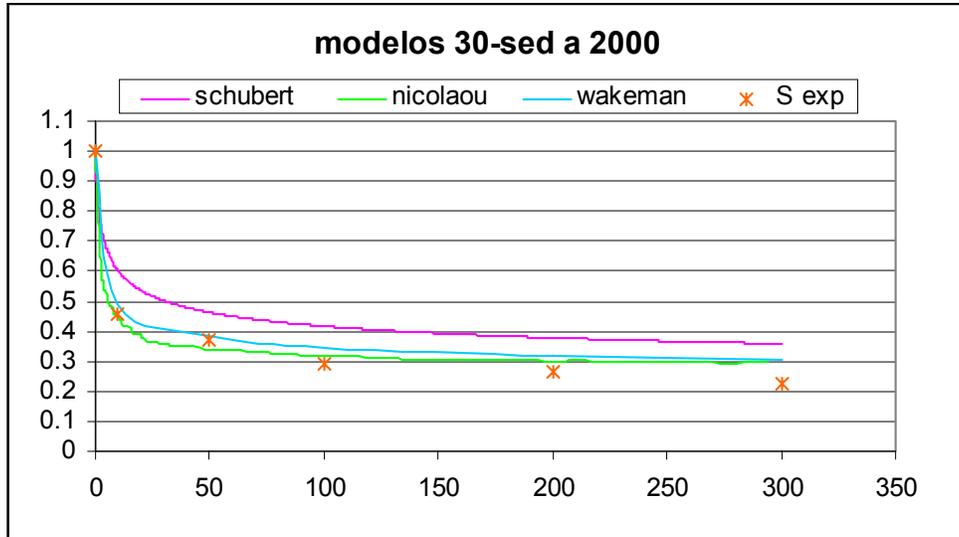


Figura N° 71. Modelos de cinética para la mezcla 30 formada por sedimentación a 2000 mbar

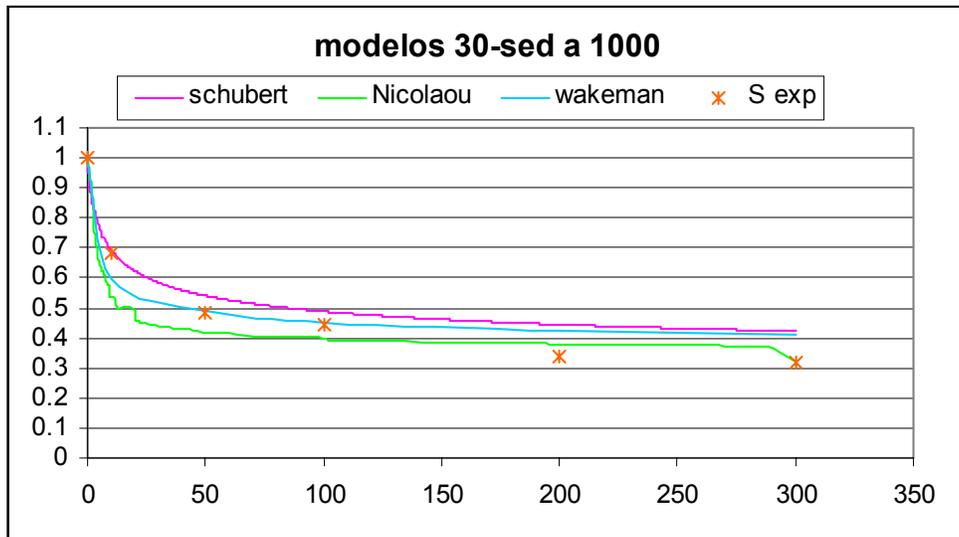


Figura N° 72. Modelos de cinética para la mezcla 30 formada por sedimentación a 1000 mbar

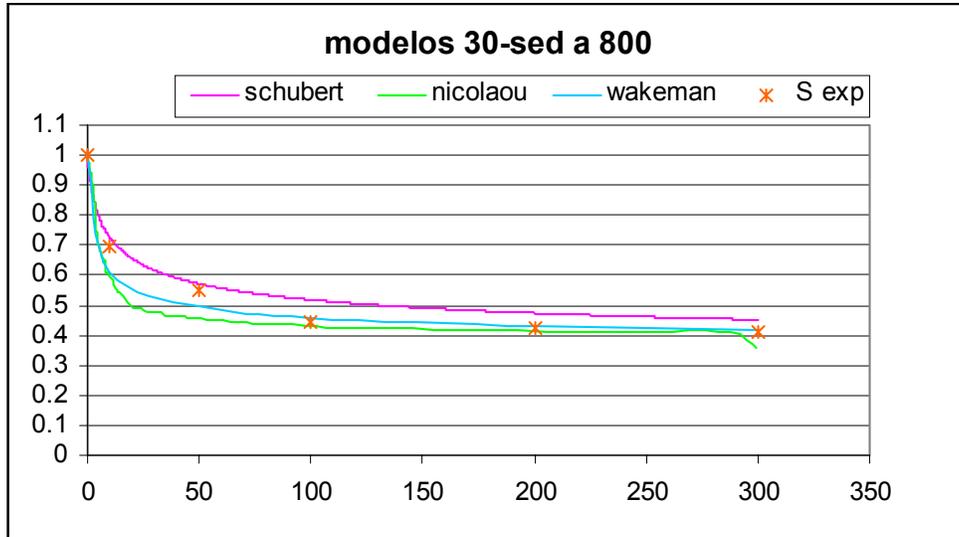


Figura N° 73. Modelos de cinética para la mezcla 30 formada por sedimentación a 800 mbar

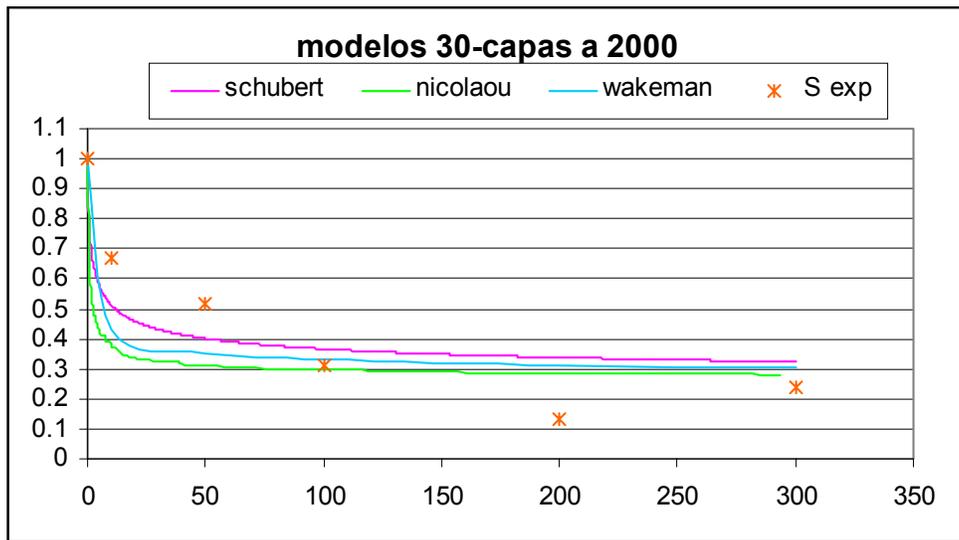


Figura N° 74. Modelos de cinética para la mezcla 30 formada por capas compactas a 2000 mbar

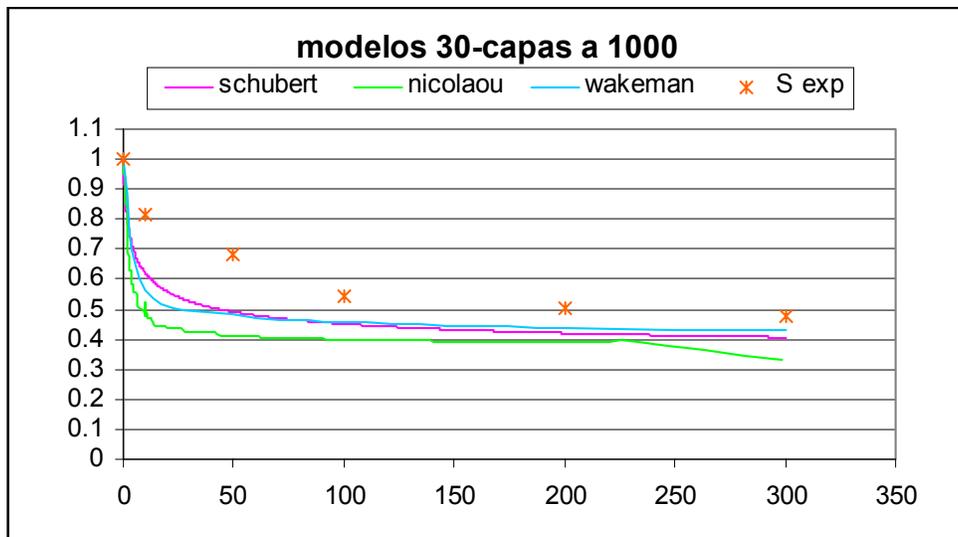


Figura N° 75. Modelos de cinética para la mezcla 30 formada por capas compactas a 1000 mbar

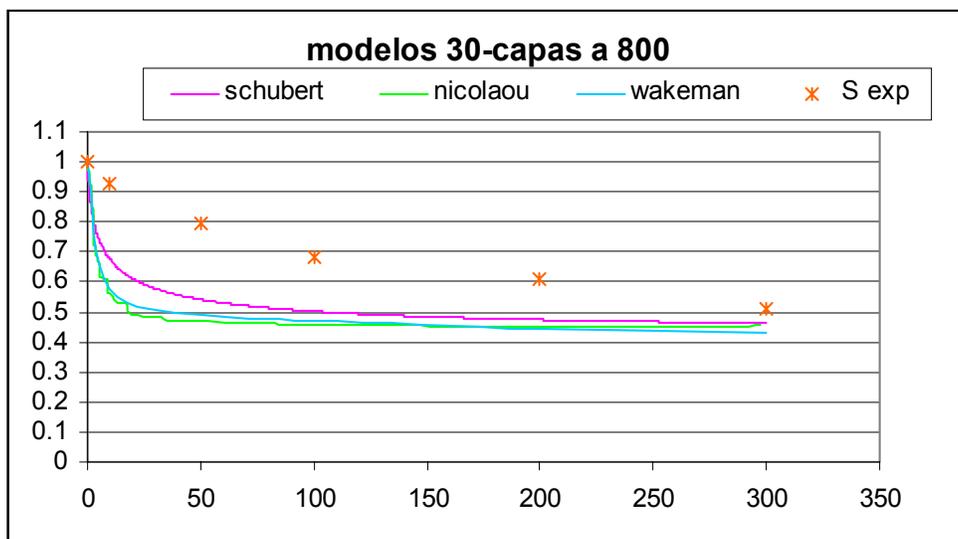


Figura N° 76. Modelos de cinética para la mezcla 30 formada por capas compactas a 800 mbar

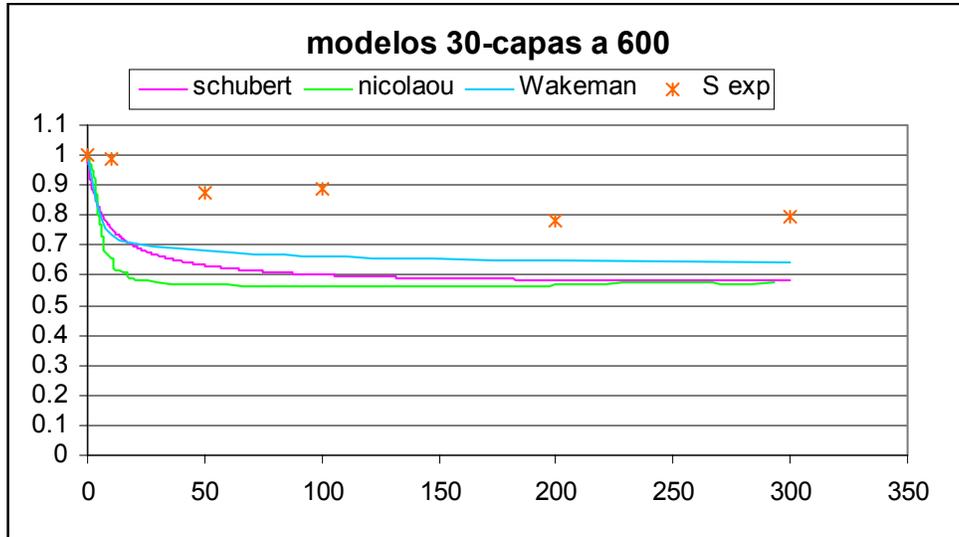


Figura N° 77. Modelos de cinética para la mezcla 30 formada por capas compactas 600 mbar

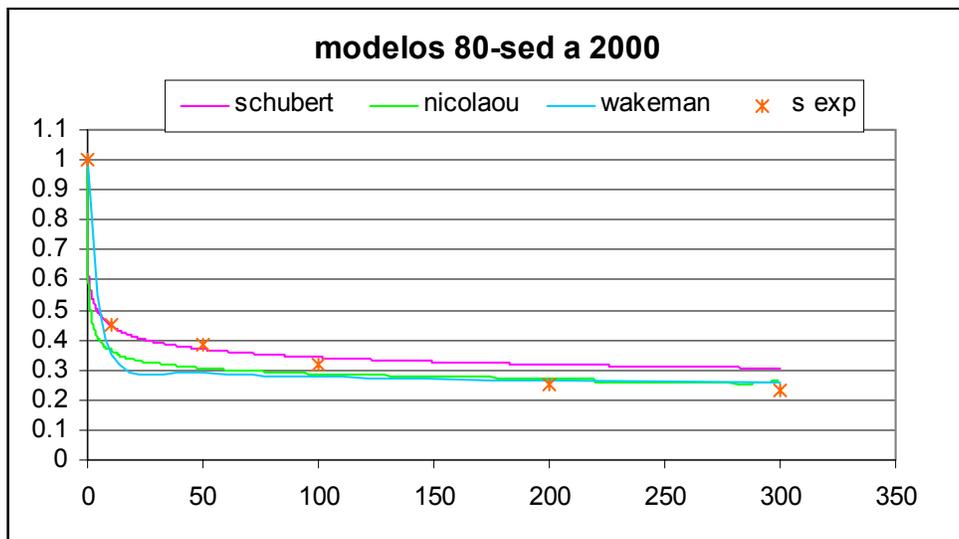


Figura N° 78. Modelos de cinética para la mezcla 80 formada por sedimentación a 2000 mbar

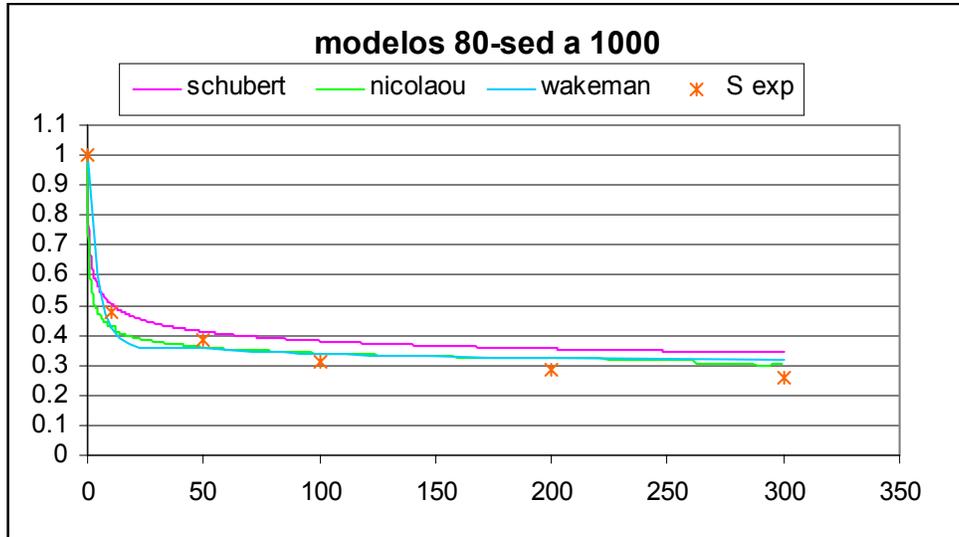


Figura N° 79. Modelos de cinética para la mezcla 80 formada por sedimentación a 1000 mbar

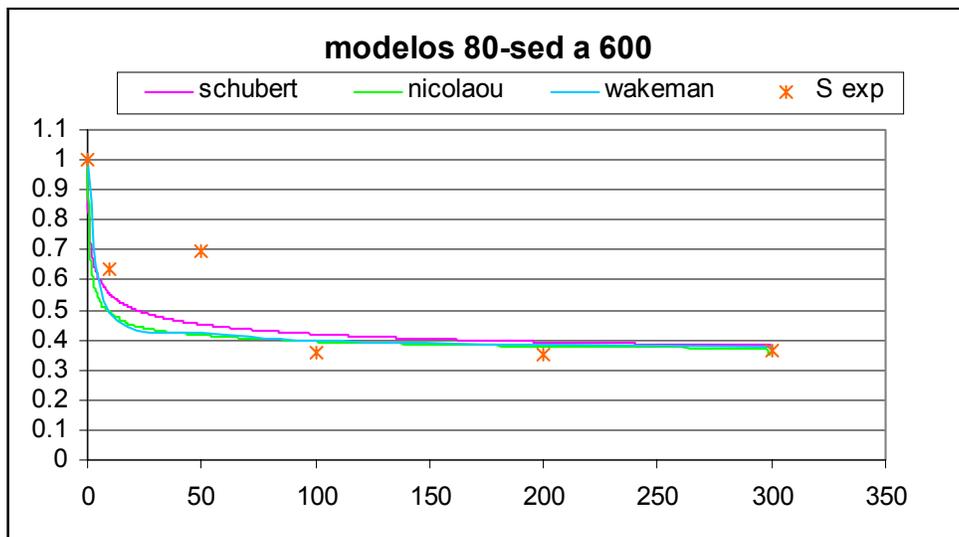


Figura N° 80. Modelos de cinética para la mezcla 80 formada por sedimentación a 600 mbar