

**Rojas C., Gloria C.**

## **INFLUENCIA DE LA ESTRUCTURA DE LA TORTA SOBRE SU PERMEABILIDAD Y POROSIDAD**

**Tutor: Prof. José A. Sorrentino. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Química. Año 2002, 165p.**

**Palabras Claves:** Permeabilidad, tortuosidad, segregación, homogeneidad.

**Resumen.** El proceso de filtración, es uno de los más utilizados en la industria química para llevar a cabo la separación de mezclas de sólidos y líquidos en las cuales la cantidad de sólidos es relativamente pequeña con relación al líquido que constituye la suspensión a tratar. Este proceso, normalmente es estudiado a través de las características de los productos obtenidos, es decir, el lecho o torta de filtración y el líquido filtrado que logra pasar a través de la masa porosa.

En las investigaciones relacionadas con el proceso de filtración, se ha determinado que los factores que afectan considerablemente el comportamiento de este proceso mecánico de separación son, la forma y la distribución de tamaño de partículas (DTP) de los sólidos contenidos en la suspensión a separar.

Debido a que diferentes mecanismos o métodos de preparación de las tortas de filtración, conducen a estructuras de lechos distintos, en este trabajo se plantea estudiar no solo la influencia que tiene la forma y tamaño de las partículas sobre las características de las tortas, sino también el efecto causado por la manera como se promuevan la deposición de las partículas sólidas durante el proceso.

Para realizar las pruebas experimentales que permiten obtener datos para analizar el comportamiento de tortas de filtración, se utilizaron dos

sustancias, una cuyas partículas son de forma esférica (esferas de vidrio) y otra de partículas con forma irregular (carbonato de calcio). Las pruebas de filtración se realizaron aplicando el método de permeación. Las tortas que fueron filtradas se formaron mediante dos mecanismos, sedimentación y por capas compactas con los cuales se pudo obtener condiciones de segregación y homogeneidad en el lecho respectivamente.

Los resultados de permeabilidad y porosidad, se analizaron a través del diagrama permeabilidad-porosidad que describe el modelo de Carman-Kozeny aplicado en este trabajo para estudiar el flujo de fluidos a través de lechos sólidos. Pudo determinarse que el comportamiento de las propiedades de la torta depende de tres parámetros: la forma de las partículas, el tamaño de las mallas y el mecanismo de formación de la torta. El efecto de estos tres parámetros pudo sintetizarse en un nuevo factor, denominado factor de forma partícula-poro.

Se utilizó el modelo de Yu-Standish para el cálculo de la porosidad obteniéndose resultados en un margen de error del 15% respecto a los valores experimentales.

Finalmente, se obtuvieron diagramas que permiten el cálculo directo de la permeabilidad de tortas, una vez conocida la sustancia que constituye el lecho, el factor de forma partícula-poro y la porosidad de la torta.

# *ÍNDICE GENERAL*

---

<b>CONTENIDO</b>	<b>PÁGINA</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	ix
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	xiii
<b>LISTA DE SIMBOLOS</b>	xviii
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	3
<b>3. OBJETIVOS</b>	5
3.1. OBJETIVO GENERAL	5
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
<b>4. MARCO TEÓRICO</b>	7
4.1. FORMACIÓN DE LA TORTA	8
4.2. BALANCE DE MASA	9
4.3. LEY DE DARCY	10
4.4. PARÁMETROS DE LA FILTRACIÓN POR FORMACIÓN DE TORTA	12

4.4.1. RESISTENCIA DEL MEDIO FILTRANTE _____	12
4.4.2. RESISTENCIA ESPECÍFICA DE LA TORTA _____	13
4.4.3. PERMEABILIDAD _____	13
4.4.4. POROSIDAD _____	14
4.4.5. SOLIDOSIDAD _____	15
4.5. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA ESPECÍFICA Y RESISTENCIA DEL MEDIO FILTRANTE _____	16
4.5.1. MÉTODO DE VOLUMEN DE FILTRADO - TIEMPO _____	16
4.5.2. MÉTODO DE ALTURA DE TORTA - TIEMPO _____	18
4.5.3. MÉTODO DE PERMEACIÓN DE TORTA _____	19
4.6. MODELOS DE PERMEABILIDAD _____	20
4.6.1. MODELOS DE ARREGLOS CAPILARES _____	21
4.6.1.1. Modelo de Carman-Kozeny _____	22
4.6.1.2. Modelo de Rumpf-Gupte _____	24
4.6.1.3. Modelo de Molerus-Rumpf-Pahl _____	25
4.6.2. MODELOS DE FLUJO ALREDEDOR DE OBJETOS _____	25
4.6.2.1. Modelo de Happel-Brenner _____	26
4.6.3. COMPARACIÓN DE MODELOS DE PERMEABILIDAD _____	27
4.7. MODELOS DE POROSIDAD _____	29
4.7.1. MODELO DE YU-STANDISH _____	30
4.7.1.1. Planteamiento Teórico del Modelo de Yu-Standish _____	30
4.7.1.2. Parámetros del modelo de Yu-Standish _____	32

4.8. CARACTERIZACIÓN DE SISTEMAS DE PARTÍCULAS	35
4.8.1. TAMAÑO DE PARTÍCULAS	35
4.8.1.1. Diámetro de Esfera Equivalente	36
4.8.1.2. Diámetro de Círculo Equivalente	37
4.8.1.3. Diámetros Estadísticos	37
4.8.2. DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA (DTP)	38
4.8.2.1. Densidad de Distribución	38
4.8.2.2. Distribución de Frecuencia Acumulada	39
4.8.2.3. Tipos de Distribución de Tamaño de Partículas	39
4.8.2.4. Tamaño promedio	40
4.8.2.5. Medidas de Dispersión	42
4.8.3. SUPERFICIE ESPECÍFICA	42
4.8.4. FACTOR DE FORMA	44
4.8.4.1. Factor de forma para carbonato y esferas de vidrio	45
<b>5. ANTECEDENTES</b>	<b>47</b>
5.1. EFECTO DE LA ESTRUCTURA DE LA TORTA EN LAS CARACTERÍSTICAS DE FILTRACIÓN	47
5.2. EFECTO DEL TIPO DE DETERMINACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA EN LA RELACIÓN ENTRE AMPLITUD Y DESLICORIZACIÓN	48

5.3. EFECTO DE LA SEGREGACIÓN DE LA TORTA EN SUS CARACTERÍSTICAS DE FILTRACIÓN _____	49
5.4. MODELO DE CORRELACIÓN DADAS CURVAS DE DESLICORIZACIÓN CON INFORMACIÓN GRANULOMÉTRICA _____	50
5.5. EFECTO DE LA FORMA DE LAS PARTÍCULAS SOBRE LA RELACIÓN ENTRE LA GRANULOMETRÍA Y PERMEABILIDAD	51
5.6. EVALUACIÓN DEL USO DEL TAMAÑO PROMEDIO D <sub>3,2</sub> PARA REPRESENTAR LA INFLUENCIA DE LA GRANULOMETRÍA SOBRE LA PERMEABILIDAD _____	52
5.7. ESTIMACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LA TORTA DE FILTRACIÓN USANDO MEDICIONES DEL ÁNGULO FOTOMÉTRICO _____	53
5.8. POROSIDAD Y CURVA DE PRESIÓN CAPILAR DE MEZCLAS DE DIFERENTE GRANULOMÉTRIA. _____	53
<b>6. DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS _____</b>	<b>55</b>
6.1. FILTRATEST – UCV _____	55
6.2. BALANZA CON DESECADOR INFRAROJO _____	58
6.3. MICRÓMETRO _____	59
6.4. DIVISOR DE MUESTRAS _____	59
6.5. MASTERSIZER 2000 _____	60

<b>7. METODOLOGÍA</b>	<b>62</b>
7.1. SELECCIÓN DE MEZCLAS	62
7.2. PRUEBAS DE FILTRACIÓN	63
7.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS	64
<b>8. PLAN DE EXPERIENCIAS</b>	<b>65</b>
8.1. SELECCIÓN DE MEZCLAS	65
8.2. PRUEBAS EXPLORATORIAS	66
8.3. PRUEBAS DE PERMEABILIDAD	66
<b>9. ANALISIS DE DATOS</b>	<b>70</b>
9.1. SELECCIÓN DE MEZCLAS	70
9.2. OBTENCIÓN DE LOS DATOS DE PERMEABILIDAD.	72
9.3. DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN	75
9.4. PREPARACIÓN DE LA TORTA	78
<b>10. DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b>	<b>81</b>
10.1. COMPARACIÓN DE MODELOS DE PERMEABILIDAD	82
10.2. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE PERMEABILIDAD Y POROSIDAD	84
10.1.1. EFECTO DE LA FORMA DE LAS PARTÍCULAS	90

10.1.2. EFECTO DE LA SUPERFICIE DE PORO _____	93
10.1.3. efecto de la estructura de la torta _____	95
10.1.4. definición del parámetro $\square$ SV _____	98
10.3. PREDICCIÓN DE LA POROSIDAD _____	100
10.4. DESACOPAMIENTO DE VARIABLES _____	104
 <b>11. CONCLUSIONES</b> _____	 107
 <b>12. RECOMENDACIONES</b> _____	 109
 <b>13. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> _____	 110
 <b>14. APÉNDICES</b> _____	 114
APÉNDICE A: CÁLCULOS TÍPICOS _____	114
APÉNDICE A-1: CÁLCULO DE LA PERMEABILIDAD _____	114
APÉNDICE A-2: CÁLCULO DE LA POROSIDAD EXPERIMENTAL _____	118
APÉNDICE A-3: CÁLCULO DEL TÉRMINO $K \cdot C \cdot \phi(\varepsilon)$ _____	119
APÉNDICE A-4: CÁLCULO DEL FACTOR DE FORMA PARTÍCULA – PORO _____	120
APÉNDICE A-5: CÁLCULO DE LA POROSIDAD POR EL MÉTODO DE YU-STANDISH _____	121
APÉNDICE B: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO _____	126
APÉNDICE B-1: MEZCLAS SELECCIONADAS _____	126



APÉNDICE B-2: CORTES DE TORTAS SEDIMENTADAS Y TORTAS POR CAPAS _____	128
APÉNDICE C: DATOS EXPERIMENTALES _____	130
APÉNDICE C-1: DATOS INICIALES _____	130
APÉNDICE C-2: MASA Y ALTURA DE TORTAS FORMADAS POR SEDIMENTACIÓN Y POR CAPAS _____	131
APÉNDICE C-3: MASA DE FILTRADO A TRAVÉS LAS TORTAS _____	135
APÉNDICE D: RESULTADOS _____	149
APÉNDICE D-1: _____	149
APÉNDICE D-2: RESULTADOS DE PERMEABILIDAD _____	149
APÉNDICE D-3: RESULTADOS DE POROSIDAD EXPERIMENTAL _____	153
APÉNDICE D-4: RESULTADOS DE POROSIDAD CALCULADA POR EL METODO DE YU-STANDISH _____	156
APÉNDICE D-5: DIAGRAMAS DE PREDICCIÓN DE LA PERMEABILIDAD _____	161

## ÍNDICE DE TABLAS

---

CONTENIDO	PÁGINA
Tabla N°1: Modelos para el cálculo de la permeabilidad _____	28
Tabla N°2: Diámetros de esfera equivalente _____	36
Tabla N°3: Diámetros de círculo equivalente _____	37
Tabla N°4: Lista de diámetros estadísticos _____	37
Tabla N°5: Tipos de distribución de tamaño _____	40
Tabla N°6: Tipos de medias _____	42
Tabla N°7: Mezclas de trabajo seleccionadas _____	66
Tabla N°8: Esquema de pruebas de permeabilidad _____	67
Tabla N°9: Condiciones de operación _____	78
Tabla N°10: Resultados de permeabilidad-porosidad para diferentes mecanismos de formación de la torta _____	86
Tabla N°11: Valores obtenidos del parámetro $\square_{SV}$ _____	99
Tabla N°12: Parámetros de ajuste del Modelo de Yu-Standish _____	100

Tabla N°13:Pseudo componentes definidos para mezclas de carbonato _____	101
Tabla N°14:Porosidad calculada por el método de Yu-Standish _____	102
Tabla N° 15:Características de la DTP de las mezclas de carbonato de calcio seleccionadas _____	126
Tabla N°16:Características de la DTP de las mezclas de esferas de vidrio seleccionadas _____	127
Tabla N°17:Características de la DTP de los cortes de tortas sedimentadas (mezcla de carbonato C-3000) _____	128
Tabla N°18:Características de la DTP de los cortes de tortas formadas por capas (mezcla de carbonato C-3000 _____	129
Tabla N°19:Datos teóricos _____	130
Tabla N°20:Masa de muestra y de líquido para formar las tortas _____	130
Tabla N°21:Masa y altura de cada torta de carbonato _____	131
Tabla N°22:Masa y altura de cada torta de esferas de vidrio _____	133
Tabla N°23:Masa de filtrado a través de tortas de carbonato: C-9000 ____	135
Tabla N°24:Masa de filtrado a través de tortas de carbonato: C-4500 ____	137
Tabla N°25:Masa de filtrado a través de tortas de carbonato: C-3000 ____	139
Tabla N°26:Masa de filtrado a través de tortas de carbonato: C-45-53 ____	141
Tabla N°27:Masa de filtrado a través de tortas de carbonato: C-75-90 ____	142
Tabla N°28: _____ a de filtrado a través de tortas de esferas de vidrio: V-40-70	Mas 143
Tabla N°29:Masa de filtrado a través de tortas de esferas de vidrio: V-40-70 utilizando un medio filtrante diferente (SK009) _____	145
Tabla N°30:Masa de filtrado a través de tortas de esferas de vidrio: V-63	147
Tabla N°31:Masa de filtrado a través de tortas de esferas de vidrio: V-70-110 _____	148
Tabla N°32:Comparación de los modelos de permeabilidad _____	149

Tabla N°33:Resultados intermedios involucrados en el cálculo de la permeabilidad_____	150
Tabla N°34:Resultados intermedios involucrados en el cálculo de la porosidad experimental _____	153
Tabla N°35:Porosidades y volúmenes específicos de cada pseudo componente de la mezcla de carbonato: C-9000 _____	156
Tabla N°36:Porosidades y volúmenes específicos de cada pseudo componente de la mezcla de carbonato: C-4500 _____	157
Tabla N°37:Porosidades y volúmenes específicos de cada pseudo componente de la mezcla de carbonato: C-3000 _____	158
Tabla N°38:Porosidades y volúmenes específicos de cada pseudo componente de la mezcla de carbonato: C-45-53 _____	159
Tabla N°39:Porosidades y volúmenes específicos de cada pseudo componente de la mezcla de carbonato: C-75-90 _____	160

## *ÍNDICE DE FIGURAS*

---

<b>CONTENIDO</b>	<b>PÁGINA</b>
Figura N°1: Distribución de masas en el proceso de filtración _____	8
Figura N°2: Arreglo de partículas en tortas _____	9
Figura N°3: Método de volumen de filtrado – tiempo _____	17
Figura N°4: Método de altura de torta - tiempo _____	19
Figura N°5: Método de permeación _____	20
Figura N°6: Modelo de flujo a través de arreglos capilares _____	21
Figura N°7: Modelo de flujo alrededor de objetos sumergidos _____	26
Figura N°8: Diagrama permeabilidad–porosidad _____	29
Figura N°9: Porosidad experimental y calculada para cada par de mezclas del modelo de Yu-Standish _____	34
Figura N°10: Ajuste de $r_{ij}$ vs. $R_{ij}$ , para obtener el parámetro P en condiciones de lecho poco denso (poured packing) _____	34
Figura N°11: Densidad de distribución _____	38
Figura N°12: Distribución acumulada _____	39
Figura N°13: Estimación del factor de forma y cociente de forma para Carbonato y Esferas de Vidrio (Bachmann,.2001) _____	46

Figura N°14: Filtratest-UCV _____	56
Figura N°15: Diagrama del Filtratest-UCV _____	56
Figura N°16: Sistema de piezas de la celda del Filtratest-UCV _____	57
Figura N°17: Tornillo sin fin _____	58
Figura N°18: Balanza con desecador infrarojo _____	58
Figura N°19: Micrómetro _____	59
Figura N°20: Divisor de Muestras PT 1000 _____	60
Figura N°21: Mastersizer 2000 _____	60
Figura N°22: Unidad de Dispersión _____	61
Figura N°23: Forma de las partículas _____	70
Figura N°24: Distribución de tamaño de partículas de las muestras de carbonato de calcio seleccionadas _____	71
Figura N°25: Distribución de tamaño de partículas de las mezclas de esferas de vidrio seleccionadas _____	72
Figura N°26: Ajuste de datos con el punto de altura cero para determinar la resistencia de total de la torta _____	74
Figura N°27: Ajuste de datos con el punto de capa de 0,1 cm para determinar la resistencia de total de la torta _____	75
Figura N°28: Caudal de líquido filtrado _____	76
Figura N°29: Efecto de la resistencia del medio sobre la determinación de la permeabilidad _____	77

Figura N°30: Distribución acumulada de los cortes obtenidos en la torta de sedimentación _____	79
Figura N°31: Distribución acumulada de los cortes obtenidos en la torta formada por capas _____	80
Figura N°32: Comparación de las funciones de porosidad de los modelos de permeabilidad _____	83
Figura N°33: Comparación de modelos de permeabilidad en el diagrama permeabilidad-porosidad _____	84
Figura N°34: Diagrama permeabilidad-porosidad para diferentes mecanismos de formación de tortas de carbonato de calcio _____	88
Figura N°35: Diagrama permeabilidad-porosidad para diferentes forma mecanismos de formación de tortas de esferas de vidrio ____	89
Figura N°36: Diagrama permeabilidad-porosidad incluyendo el factor forma para el mecanismo de capas sueltas _____	91
Figura N°37: Diagrama permeabilidad-porosidad incluyendo el factor de forma para diferentes mecanismos de formación de torta ____	92
Figura N°38: Superficie de poro formado con partículas esféricas y partículas irregulares _____	93
Figura N°39: Comparación de los valores de porosidades experimentales y calculadas por el modelo de Yu-Standish _____	103
Figura N°40: Predicción de la permeabilidad para tortas de carbonato formadas por sedimentación, variando la porosidad $\varepsilon$ _____	105

Figura N°41: Predicción de la permeabilidad para tortas de carbonato formadas por sedimentación, variando el diámetro $D_{3,2}$ ____	105
Figura N°42: Predicción de la permeabilidad para tortas de esferas de vidrio formadas por sedimentación, variando la porosidad _____	106
Figura N°43: Predicción de la permeabilidad para tortas de esferas de vidrio formadas por sedimentación, variando el diámetro $D_{3,2}$ _____	106
Figura N°44: Flujo másico de líquido filtrado a través de tortas sedimentadas de carbonato C-3000 _____	115
Figura N°45: Resistencia específica de la torta y resistencia del medio filtrante _____	117
Figura N°46: Ajuste de datos para determinar el factor de forma partícula – poro _____	120
Figura N°47: Pseudo componentes para la mezcla de carbonato C-3000 _____	121
Figura N°48: Predicción de la permeabilidad para tortas de carbonato formadas por capas compactas variando la porosidad $\varepsilon$ ____	161
Figura N°49: Predicción de la permeabilidad para tortas de carbonato formadas por capas compactas, variando el diámetro $D_{3,2}$ _	162
Figura N°50: Predicción de la permeabilidad para tortas de esferas de vidrio formadas por capas compactas, variando la porosidad $\varepsilon$ ____	162



Figura N°51: Predicción de la permeabilidad para tortas de esferas de vidrio formadas por capas compactas, variando el diámetro $D_{3,2}$ _____	163
Figura N°52: Predicción de la permeabilidad para tortas de carbonato formadas por capas sueltas, variando la porosidad $\varepsilon$ _____	164
Figura N°53: Predicción de la permeabilidad para tortas de carbonato formadas por capas sueltas, variando el diámetro $D_{3,2}$ _____	164
Figura N°54: Predicción de la permeabilidad para tortas de esferas de Vidrio formadas por capas sueltas, variando la porosidad $\varepsilon$ _____	165
Figura N°55: Predicción de la permeabilidad para tortas de esferas de vidrio formadas por capas sueltas, variando el diámetro $D_{3,2}$ _____	165

## *LISTA DE SÍMBOLOS*

---

### ▪ SÍMBOLOS LATINOS

$a$	: Constante del modelo de Yu-Standish (adim)
$a_h$	: Constante para el cálculo de la resistencia específica de la torta por el método de altura de torta ( $s.m^{-2}$ )
$a_v$	: Constante para el cálculo de la resistencia específica de la torta por el método de formación de torta ( $s.m^{-6}$ )
$A_F$	: Área de sección transversal de la torta o área de filtrado ( $m^2$ )
$A_S$	: Área de sección transversal del poro ( $m^2$ )
$B$	: Constante del modelo de Yu-Standish (adim)
$b_h$	: Constante para el cálculo de la resistencia del medio filtrante por el método de altura de torta ( $s.m^{-1}$ )
$b_v$	: Constante para el cálculo de la resistencia del medio filtrante por el método de formación de torta ( $s.m^{-3}$ )
$C$	: Constante de la ecuación de Carman-Kozeny (adim)
$C_D$	: Coeficiente de arrastre del modelo de Molerus-Rumpf-Pahl (adim)
$d_K$	: Diámetro de un tubo cilíndrico de la ecuación de Hagen-Poiseuille (m)
$d_H$	: Diámetro hidráulico (m)
$D_{3,2}$	: Media armónica del diámetro de las partículas asumiendo que son de forma esférica ( $\mu m$ )
$f_p$	: Factor de fricción para lechos empacados (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 ( $\mu m$ )
$g(r_{i,j})$	: 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)
$I/I_0$	: Intensidad de luz recibida en el detector del equipo fotométrico (adim),
$k_E$	: Coeficiente de extinción del equipo fotométrico (adim)
$k_0$	: Constante de aspecto de poro (adim)
$K$	: Permeabilidad ( $\mu m^2$ )
$K_D$	: Coeficiente de proporcionalidad de la ecuación de Darcy (adim)
$L$	: Longitud de un tubo cilíndrico de la ecuación de Hagen-Poiseuille o longitud de un lecho (m)
$L_C$	: Longitud de la celda fotométrica (m)
$L_P$	: Longitud del poro (m)

---



---

$\bar{m}$	: Pendiente de flujo másico (gr/l)
$m_i$	: Masa de muestra inicial para formar las tortas (gr)
$m_L$	: Masa de líquido para formar las tortas (gr)
$m_{LF}$	: Masa de líquido filtrado (gr)
$m_S$	: Masa de torta seca (gr)
$m_{SP}$	: Masa de la torta seca y masa del plato juntas (gr)
$m_P$	: Masa del plato (gr)
$M_D$	: Moda ( $\mu m$ ) de una distribución de tamaño de partículas ( $\mu m$ )
$P$	: Exponente constante del modelo de Yu-Standish (adim)
$P_M$	: Perímetro mojado del poro (m)
$q$	: Velocidad superficial del líquido que atraviesa la torta ( $m^3/s \cdot m^2$ )
$Q$	: Caudal del filtrado ( $m^3/s$ )
$r_C$	: Resistencia específica de la torta ( $m^{-2}$ )
$r_H$	: Radio hidráulico (m)
$r_{i,j}$	: Razón de tamaño de empaque equivalente (adim)
$Re$	: Número de Reynolds
$R_C$	: Resistencia total de la torta ( $m^{-1}$ )
$R_{i,j}$	: Razón de tamaño volumétrico (adim)
$R_M$	: Resistencia del medio filtrante ( $m^{-1}$ )
$R_T$	: Resistencia total (que incluye la resistencia de la torta y la resistencia del medio filtrante) ( $m^{-1}$ )
$S$	: Superficie de la partícula ( $m^2$ )
$S_P$	: Superficie mojada del poro ( $m^2$ )
$S_V$	: Superficie específica ( $m^2/m^3$ )
$[S_V]_{Por.}$	: Superficie específica del poro ( $m^2/m^3$ )
$[S_V]_{Part.}$	: Superficie específica de las partículas ( $m^2/m^3$ )
$S_V^{Ph}$	: Superficie específica de las partículas obtenida por la técnica de fotometría ( $m^2/m^3$ )
$t$	: Tiempo de filtración (s)

$v_H$	: Velocidad superficial del fluido dentro de cada poro o capilar ( $m^3/s \cdot m^2$ )
$V$	: Volumen de la partícula ( $m^3$ )
$V_e$	: Volumen específico de empaque de la mezcla ( $m^3/m^3$ )
$V_i^T$	: Volumen específico de empaque individual cada pseudo componente ( $m^3/m^3$ )
$V_i$	: Volumen específico individual de cada pseudo componente ( $m^3/m^3$ )
$V_L$	: Volumen de filtrado ( $m^3$ )
$V_P$	: 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 ( $m^3$ )
$V_P$	: Volumen del poro ( $m^3$ )
$x$	: Tamaño de partícula ( $\mu m$ )
$x_a$	: Diámetro de Área proyectada ( $\mu m$ )
$x_A$	: Media Aritmética de tamaño de partícula ( $\mu m$ )
$x_c$	: Diámetro Perimetral ( $\mu m$ )
$x_C$	: Media Cúbica de tamaño de partícula ( $\mu m$ )
$x_{CH}$	: Diámetro de máximo contorno ( $\mu m$ )
$x_d$	: Diámetro de Arrastre ( $\mu m$ )
$x_f$	: Diámetro de Caída libre ( $\mu m$ )
$x_F$	: Diámetro de Feret`s ( $\mu m$ )
$x_g$	: Media geométrica de tamaño de partícula ( $\mu m$ )
$x_h$	: Media armónica de tamaño de partícula ( $\mu m$ )
$x_N$	: Diámetro de Martin`s ( $\mu m$ )
$x_p$	: Diámetro de área proyectada ( $\mu m$ )
$x_q$	: Media cuadrática de tamaño de partícula ( $\mu m$ )
$x_s$	: Diámetro superficial ( $\mu m$ )

$x_{SH}$	: Diámetro de corte ( $\mu m$ )
$x_{st}$	Diámetro de Stoke ( $\mu m$ )
$x_{SV}$	: Diámetro de Sauter o diámetro superficie-volumen ( $\mu m$ )
$x_v$	: Diámetro volumétrico ( $\mu m$ )
$x_A$	: Diámetro de Tamiz ( $\mu m$ )
$x_{50}$	: Mediana de una distribución de tamaño de partículas ( $\mu m$ )
$\bar{x}$	: Media de una distribución de tamaño de partículas ( $\mu m$ )

## ▪ SÍMBOLOS GRIEGOS

$\beta$	: Relación entre la tortuosidad real del poro y tortuosidad estimada en el modelo de Carman-Kozeny (adim)
$\Delta P$	: Diferencia de presión total (Pa)
$\Delta P_m$	: Diferencia de presión aplicada al medio filtrante (Pa)
$\varepsilon$	: Porosidad (adim)
$\varepsilon_i$	: Porosidad individual de cada pseudo componente (adim)
$\varepsilon_0$	: Constante del modelo de Yu-Standish (adim)
$\varepsilon_s$	: Solidosidad (adim)
$\phi_s$	: Concentración volumétrica de la suspensión ( $m^3$ de sólidos / $m^3$ de suspensión)
$\eta_{SV}$	: Parámetro de corrección de la ecuación de Carman-Kozeny (adim)
$\varphi(\varepsilon)$	: Función de la porosidad (adim)
$\kappa$	: Parámetro asociado a la suspensión (adim)
$\lambda$	: Fracción de superficie específica (adim)
$\lambda_E$	: Espesor de la capa esférica de líquido que rodea las partículas (m)
$\mu_L$	: Viscosidad dinámica del filtrado (Pa.s)
$\rho_s$	: Densidad del sólido ( $Kg/m^3$ )

- $\sigma$  : Desviación estándar (adim)
- $\tau$  : Tortuosidad (adim)
- $\psi_{i,j}$  : Factor de forma entre dos diámetros equivalentes (adim)
- $\psi_{SV}$  : Factor de forma entre el diámetro promedio superficie-volumen real de las partículas ( $x_{SV}$ ), con el suministrado por los equipos comerciales para obtener la DTP ( $D_{3,2}$ )

# 1. INTRODUCCIÓN

---

Las mezclas de sólidos y líquidos en la industria química frecuentemente son separadas mediante de procesos mecánicos como la filtración y la sedimentación. Tales procesos dependen no solo de sus condiciones de operación sino también de las características del líquido y de las partículas sólidas que constituyen la suspensión a tratar.

En la predicción del comportamiento del proceso de filtración, investigaciones previas, han determinado que uno de los factores que tienen mayor influencia en el comportamiento del proceso es la presencia de distintos tamaños de partículas que se distribuyen desigualmente a lo largo de la torta de filtración, este fenómeno conocido como segregación está presente en aplicaciones industriales, razón por la cual, este trabajo está orientado a estudiar el comportamiento de las características de las tortas de filtración para diferentes arreglos de partículas.

Para promover que las partículas que constituyen la torta de filtración se depositen de distintas maneras al formar el lecho, en este trabajo se producen tortas por dos mecanismos diferentes, denominados sedimentación y por capas, los cuales conducen a obtener los lechos con características de segregación y homogeneidad respectivamente.

Las pruebas que se realizan, son experiencias de permeación que permiten determinar experimentalmente las variables de interés en este trabajo, es decir, la permeabilidad y porosidad.

El análisis de los resultados se realiza a través del diagrama permeabilidad-porosidad, desarrollado en el Laboratorio de Separaciones Mecánicas de la Universidad Central de Venezuela (LSM-UCV), el cual es una representación gráfica del modelo de permeabilidad propuesto por Carman-Kozeny



Por otra parte, en función de obtener un método de predicción de la porosidad de mezclas a partir de la información de distribución de tamaño de partícula, se aplica el modelo planteado por Yu-Standish, para las mezclas de carbonato.

## 2. *PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA*

---

Los procesos mecánicos de filtración y sedimentación en el ámbito industrial, frecuentemente son analizados a través del estudio de tortas y sedimentos con características homogéneas; sin embargo, no se ha profundizado en uno de los aspectos más importantes que genera variaciones en las características de la separación: la falta de homogeneidad de la torta (segregación).

Las tortas obtenidas en estos procesos, tienen diferentes estructuras de acuerdo a la forma como se hayan depositado las partículas contenidas en la mezcla sólido-líquido que se separa. Si en cualquier parte de la masa porosa, las partículas presentes poseen la misma granulometría que la alimentación, se dice que la masa porosa es homogénea. Si por el contrario, los distintos tamaños de partícula se distribuyen desigualmente a lo largo de la torta, se dice que la misma presenta segregación.

La segregación es una situación muy común en aquellos casos donde las velocidades de los procesos de filtración y sedimentación son parecidas (debido a la alta densidad o tamaño de sólidos), y en los procesos de filtración de suspensiones con amplio rango de tamaño de partícula.

En el Laboratorio de Separaciones Mecánicas de la Universidad Central de Venezuela (LSM-UCV), se han llevado a cabo algunos estudios acerca de la influencia de la distribución de tamaño de partícula (DTP) y de la falta de homogeneidad o segregación de tortas, sobre las características del proceso de filtración (resistencia específica de la torta, resistencia del medio, cinética de deslicorización, curva de presión capilar y porosidad de la torta).

Derivado de estas investigaciones, en el LSM se ha desarrollado una estrategia de reducción de datos, que consiste en la predicción del comportamiento de los distintos parámetros que rigen el proceso a partir de

la acumulación de información de una determinada sustancia. Por consiguiente, actualmente se cuenta con una serie de resultados con los que se han obtenido modelos de correlación que permiten establecer:

- La influencia de la distribución de tamaño de partículas (DTP) y el factor de forma ( $\psi_{SV}$ ), sobre la permeabilidad ( $K$ ) y la porosidad ( $\varepsilon$ ) de la torta (diagrama permeabilidad-porosidad).
- La variación de la saturación en el tiempo ( $S(t)$ ), en función del tamaño de partícula, forma de las partículas ( $\psi_{SV}$ ), porosidad ( $\varepsilon$ ) y presión capilar ( $P_K$ ).

Es de destacar que las correlaciones obtenidas hasta ahora, han sido planteadas principalmente para tortas homogéneas pero aún no se ha determinado concretamente su ajuste para tortas segregadas.

Por lo tanto, este trabajo está orientado a tratar de incorporar el diagrama de permeabilidad-porosidad alcanzado en la estrategia de reducción de datos, al análisis de tortas segregadas; estableciendo para ello dos casos límite en la formación de la torta: el lecho denso (dense packing) y el lecho suelto (loose packing).

Por otra parte, al revisar las ecuaciones planteadas en trabajos anteriores, se pone en evidencia que es necesario conocer previamente el término de porosidad, ya que este parámetro está presente en todos los grupos adimensionales obtenidos en los modelos propuestos. Consecuentemente, en esta investigación se pretende desacoplar la porosidad de las otras variables, introduciendo para ello modelos mediante los cuales se pueda estimar directamente la porosidad a partir de la distribución de tamaño de partícula (DTP). En particular, se utilizará el modelo de Yu y Standish que ha sido probado recientemente en el LSM-UCV con relativo éxito.

### 3. OBJETIVOS

---

Los objetivos alcanzados para concretar la realización de este trabajo, son los siguientes:

#### 3.1. OBJETIVO GENERAL

Estudiar el efecto de la forma en que se prepara la torta que se obtiene durante el proceso de filtración, sobre su permeabilidad y porosidad.

#### 3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer diferentes formas de preparación de la torta para lograr condiciones de homogeneidad y segregación según el arreglo de partículas en el lecho formado, utilizando diferentes sustancias (de partículas esféricas y de partículas irregulares).
- Determinar experimentalmente la variación de la permeabilidad ( $K$ ) y la porosidad ( $\varepsilon$ ), para las diferentes estructuras de la torta y para mezclas de diferentes granulometrías.
- Incorporar la información obtenida en la evaluación de  $K$  y  $\varepsilon$ , al diagrama permeabilidad - porosidad producto de la estrategia de manejo de datos desarrollada el LSM-UCV, para comparar el comportamiento de dichas variables en sistemas segregados y sistemas homogéneos.

- Además del modelo Carman-Kozeny utilizado hasta ahora para estudiar la relación permeabilidad, porosidad y distribución de tamaño de partículas (diagrama permeabilidad - porosidad), aplicar los modelos de Rumpf-Gupte, Molerus-Rumpf-Pahl y Happel-Brenner para comparar los diferentes enfoques que describen el comportamiento de sistemas de fluidos en lechos de sólidos.
- Emplear el modelo de Yu-Standish para establecer correlaciones entre la porosidad, la información granulométrica y las diferentes estructuras de la torta, y así desacoplar la porosidad de las demás variables del proceso.

## 4. MARCO TEÓRICO

---

Para la separación de sistemas sólido-líquido, se cuenta con diversos procesos mecánicos, siendo los más aplicados en el ámbito industrial la filtración y la sedimentación. Estos mecanismos difieren entre sí, según el origen de la fuerza impulsora que da lugar a la separación de las fases. Cuando la cantidad de sólido es relativamente pequeña comparada con la del líquido, se realiza un proceso de filtración, por el contrario, cuando aumenta la proporción de sólidos en la mezcla, se llevan a cabo procesos de sedimentación<sup>(5)</sup>.

El proceso de filtración, está constituido básicamente por el filtro, es decir, el equipo utilizado para realizar el proceso de filtración; el medio filtrante, que es el límite o barrera que permite el paso de fluido y retiene la mayor parte de los sólidos; la suspensión a tratar, que está formada por dos fases, una continua (formada por el líquido) y otra dispersa (formada por las partículas sólidas en suspensión); y finalmente los productos del proceso filtrado y torta<sup>(17)</sup>.

Durante este proceso la mezcla de sólido y líquido se desplaza en una misma dirección hacia el medio filtrante, donde quedan retenidas la mayor parte de las partículas sólidas contenidas en la mezcla. Como resultado de este proceso se obtiene un remanente sólido o torta de filtración, que está conformada principalmente por las partículas sólidas retenidas y un líquido clarificado o filtrado que es el fluido que logra pasar a través del medio poroso<sup>(20)</sup>.

La filtración por formación de torta, es el proceso de filtración más común de los usados en la industria química. Consta de tres etapas básicas: la formación de la torta, la deslicorización y el lavado. Particularmente en este trabajo se enfoca la atención en la etapa de formación de torta.

#### 4.1. FORMACIÓN DE LA TORTA

En esta etapa del proceso es donde se forma la torta, debido a la deposición de las partículas sólidas contenidas en la mezcla sólido-líquido a separar; para ello debe aplicarse una fuerza impulsora o presión diferencial sobre el medio filtrante y el lecho que se forma<sup>(29)</sup>.

Al inicio de la filtración, las partículas forman puentes sobre los poros del medio filtrante, y una vez que los sólidos son atrapados dentro de la membrana, se acumulan en una capa sobre su superficie formándose la torta, la cual actúa como verdadero medio filtrante. A medida que transcurre el proceso, la torta aumenta su espesor y al mismo tiempo, el fluido pasa a través del lecho de sólidos y de la membrana de retención.

En el estudio de la etapa de formación de torta, se considera que durante el proceso de filtración, no hay efectos de sedimentación, es decir, todos los sólidos contenidos en la suspensión pasan a constituir la torta, tal como se ilustra en la figura N°1<sup>(18)</sup>.

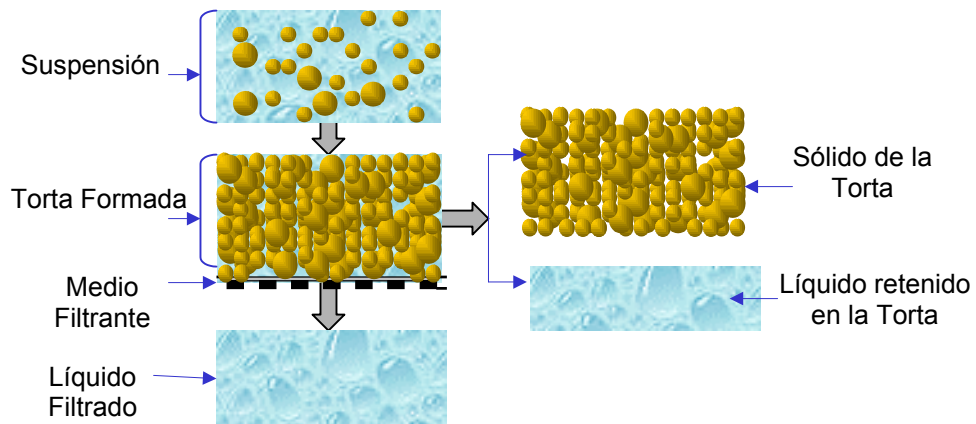


Figura N°1: Distribución de masas en el proceso de filtración

De acuerdo a la forma como se depositen los sólidos de la mezcla durante el proceso, se puede obtener diferentes tipos de tortas basados en la

distribución del tamaño de las partículas a lo largo de la torta. En este sentido, se logra diferenciar dos condiciones extremas del arreglo de las partículas en la torta formada: homogeneidad y segregación.

Las tortas se consideran de condición homogénea, cuando las partículas de diferentes tamaños quedan uniformemente distribuidas a lo largo del lecho tal como se ilustra en la figura N°2-a. Por otra parte, las tortas de condición segregada o no homogénea ocurren cuando las partículas sólidas se acomodan de forma tal, que quedan distribuidas desigualmente en la torta, depositándose por ejemplo, primero las partículas más gruesas y por último las partículas más finas; este arreglo de las partículas se ilustra en la figura N°2-b<sup>(4)</sup>.

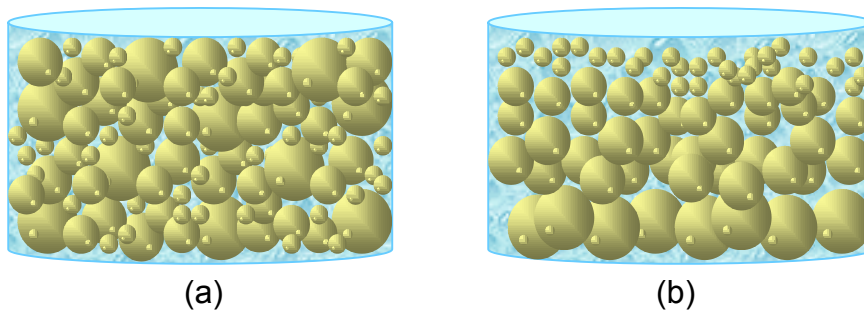


Figura N°2: Arreglo de partículas en tortas: (a) condición homogénea  
(b) condición segregada

La ecuación matemática que permite modelar el proceso de formación de la torta por filtración, se obtiene a partir del balance de masa realizado en un diferencial de la torta obtenida y de la Ley de Darcy.

## 4.2. BALANCE DE MASA

La altura ( $h_c$ ) que alcanza la torta, se debe a la acumulación de partículas que son retenidas sobre el medio poroso y va aumentando a medida que transcurre el proceso de filtración.



Para obtener la variación de la altura de la torta, se realiza el balance de masa en un elemento diferencial de altura  $dh_c$ , expresado en la ecuación (4.1). Para este balance se considera que: el área de sección transversal de la torta o área de filtrado ( $A_F$ ), permanece constante; y se asume que todos los sólidos contenidos en la suspensión pasan a constituir la torta, tal como se ilustra en la figura N°1<sup>(18)</sup>

$$dh_c = \kappa \frac{dV_L}{A_F} \quad (4.1)$$

El coeficiente  $\kappa$ , es un parámetro asociado a la suspensión y a la torta, el cual, relaciona la concentración volumétrica de la suspensión ( $\phi_s$ ) y la porosidad del lecho ( $\varepsilon$ ):

$$\kappa = \frac{\phi_s}{\varepsilon - \phi_s} \quad (4.2)$$

Asumiendo que la porosidad es constante a lo largo de toda la torta de filtrado e integrando la ecuación (4.1), se tiene:

$$h_c = \kappa \frac{V_L}{A_f} \quad (4.3)$$

### 4.3. LEY DE DARCY

La fuerza impulsora necesaria para la filtración por formación de torta, corresponde a la caída de presión que debe aplicarse durante el proceso para que los sólidos de la suspensión a tratar se depositen en el medio filtrante. La relación entre este gradiente de presión y la altura de la torta formada fue demostrada por Darcy<sup>(3)</sup>, quien en su postulado, ecuación (4.1), expresó que el volumen de líquido que atraviesa un lecho poroso en un tiempo dado ( $Q$ ), es proporcional al gradiente de

presión aplicado ( $\Delta P$ ) y al área de filtrado ( $A_F$ ), e inversamente proporcional a su espesor o altura de torta ( $h_C$ ). El coeficiente de proporcionalidad en la ecuación Darcy, se expresa como  $K_D$ :

$$Q = K_D \cdot \frac{A_F \cdot \Delta P}{h_C} \quad (4.4)$$

Para aplicar la ecuación de Darcy al estudio de la filtración por formación de torta, se supone que:

- El régimen de flujo es laminar
- El fluido fluye perpendicular a la sección transversal del filtro, y en dirección inversa a la dirección en que crece la torta.
- Solo existe gradiente de presión en la dirección del flujo, y se deprecia la fuerza impulsora debida a la columna de líquido frente al gradiente de presión.

Las investigaciones realizadas por Darcy, demuestran que el coeficiente de proporcionalidad ( $K_D$ ) que relaciona la caída de presión y el flujo de líquido que pasa a través de un lecho empacado de sólidos, depende de: la naturaleza del lecho, representada por la permeabilidad ( $K$ ), que indica la facilidad con que un líquido pasa a través del lecho poroso y de la naturaleza del fluido, por lo que involucra el efecto de la viscosidad del fluido ( $\mu_L$ ). De esta forma, la ecuación del caudal específico del líquido ( $q$ ) se expresa como<sup>(3)</sup>:

$$q = \frac{1}{A_F} \cdot \frac{dV_L}{dt} = \frac{K}{\mu_L} \cdot \frac{\Delta P}{h_C} \quad (4.5)$$

Para obtener la ecuación general de la formación de la torta, se sustituye la ecuación (4.2) en la ecuación (4.5):

$$\frac{dV_L}{dt} = \frac{K \cdot A_F^2 \cdot \Delta P}{\mu_L \cdot \kappa \cdot V_L} \quad (4.6)$$

Al paso del líquido a través del lecho que se forma durante el proceso, se oponen dos resistencias, la resistencia del medio filtrante ( $R_M$ ) y la resistencia específica de la torta formada ( $r_C$ ), que se expresa como el inverso de la permeabilidad ( $K$ ). Al incluir el efecto de ambas resistencias en la ecuación (4.6), se obtiene:

$$\frac{dV_L}{dt} = \frac{A_F^2 \cdot \Delta p}{\mu_L \cdot (\kappa \cdot r_C \cdot V_L + A_F \cdot R_M)} \quad (4.7)$$

Al realizar las pruebas de filtración en equipos industriales, normalmente resulta más sencillo medir la altura que ha alcanzado la torta cuando ha transcurrido un tiempo de filtración previamente establecido. Por lo tanto, es conveniente expresar la ecuación (4.7) en función de la altura del lecho:

$$\frac{dh_C}{dt} = \frac{\Delta P}{\mu_L \cdot (\kappa \cdot h_C \cdot r_C + R_M)} \quad (4.8)$$

#### 4.4. PARÁMETROS DE LA FILTRACIÓN POR FORMACIÓN DE TORTA

El estudio de la formación de la torta se basa en el comportamiento de los parámetros que rigen esta etapa del proceso de filtración, tales como la resistencia del medio ( $R_M$ ), la resistencia específica de la torta ( $r_C$ ), la porosidad ( $\varepsilon$ ) y la permeabilidad ( $K$ ).

##### 4.4.1. RESISTENCIA DEL MEDIO FILTRANTE

La resistencia del medio filtrante ( $R_M$ ), es la resistencia que ofrece el medio o membrana porosa al paso de un fluido. Esta resistencia,

normalmente es constante, pero puede ir variando con el tiempo como resultado de la penetración de sólidos en la membrana; algunas veces puede también cambiar con la presión aplicada debido a la compresión del material fibroso que constituye el medio. Tomando la caída de presión que hay a través del medio filtrante, la resistencia del medio puede expresarse como:

$$R_M = \frac{\Delta p_m}{\mu_L \cdot q} \quad (4.9)$$

#### 4.4.2. RESISTENCIA ESPECÍFICA DE LA TORTA

Así como el medio filtrante ofrece cierta resistencia al paso del fluido, la torta que se forma durante el proceso de filtración también presenta una fuerza que se opone a la salida del líquido filtrado. Esta resistencia depende de la diferencia de presión de la filtración, del grado de consistencia de la torta y del contenido de sólido en la alimentación<sup>(16)</sup>.

En lechos incompresibles, la resistencia total de la torta ( $R_C$ ) es constante y por lo tanto, es directamente proporcional a la resistencia que ofrece cada metro de torta depositada, la cual se define como resistencia específica de la torta ( $r_C$ )<sup>(18)</sup>.

$$r_C = \frac{R_C}{h_C} \quad (4.10)$$

#### 4.4.3. PERMEABILIDAD

La permeabilidad ( $K$ ) de un medio poroso, es definida como la facilidad con que un fluido fluye a través de la red de poros que lo conforman, por lo tanto, depende de la estructura de dicho medio poroso<sup>(2)</sup>.

Para los procesos de filtración, la permeabilidad de la torta está definida en la Ley de Darcy (ecuación 4.6). y se relaciona con la resistencia específica de la torta ( $r_C$ ) mediante la siguiente ecuación:

$$K = \frac{1}{r_C} \quad (4.11)$$

#### 4.4.4. POROSIDAD

Durante el proceso de filtración, el fluido no dispone de todo el espacio para circular en el medio poroso, porque una parte del mismo se encuentra ocupada por el sólido. Por consiguiente, se define el término de porosidad, que es la relación existente entre el volumen vacío de la torta o volumen de poros ( $V_P$ ) y el volumen total ( $V_T$ ) de la misma,

$$\varepsilon = \frac{V_P}{V_T} \quad (4.12)$$

El volumen vacío o volumen de poros ( $V_P$ ), es la diferencia del volumen total de la torta ( $V_T$ ) y el volumen del sólido ( $V_S$ ), es decir:

$$V_P = V_T - V_S \quad (4.13)$$

Por lo tanto, la ecuación de porosidad puede expresarse como:

$$\varepsilon = \frac{V_T - V_S}{V_T} \quad (4.14)$$

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 ( $V_T$ ).

El volumen del sólido ( $V_s$ ). puede calcularse según la relación entre la masa de la torta seca y la densidad del sólido:

$$V_s = \frac{m_s}{\rho_s} \quad (4.15)$$

Para procesos en los que el área de filtrado ( $A_F$ ) es constante, el volumen total de la torta puede obtenerse midiendo experimentalmente la altura de la torta obtenida durante la filtración:

$$V_T = A_F \cdot h_C \quad (4.16)$$

De esta forma, al sustituir las ecuaciones (4.15) y (4.16) en la ecuación (4.14), se obtiene el cálculo de la porosidad:

$$\varepsilon = 1 - \frac{m_s}{\rho_s \cdot A_F \cdot h_C} \quad (4.17)$$

#### 4.4.5. SOLIDOSIDAD

Análogo a la porosidad, el término de solidosidad ( $\varepsilon_s$ ) es definido como la fracción del volumen ocupada por el sólido en la torta formada:

$$\varepsilon_s = \frac{V_s}{V_T} \quad (4.18)$$

A partir de las ecuaciones (4.14) y (4.18), se establece que:

$$\varepsilon + \varepsilon_s = 1 \quad (4.19)$$

#### 4.5. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA ESPECÍFICA Y RESISTENCIA DEL MEDIO FILTRANTE

La resistencia específica y del medio filtrante, no pueden predecirse mediante las ecuaciones teóricas partiendo solo de las características de la suspensión y de las condiciones de operación, sino que deben obtenerse experimentalmente.

Para obtener tanto la resistencia específica de torta ( $r_C$ ) como la del medio filtrante empleado ( $R_M$ ), es necesario evaluar la diferencia de presión a ambos lados de la torta; pero debido a la dificultad de realizar esta medición, en la práctica se prefiere medir la caída de presión entre la alimentación y la descarga del filtro. Conociendo este gradiente de presión, la resistencia específica de la torta y resistencia del medio filtrante, pueden obtenerse ya sea a partir de la determinación experimental del volumen de filtrado, o de la altura de torta en función del tiempo para una filtración efectuada a presión constante. Otra alternativa es hacer uso del método conocido como permeación, en el cual se trabaja con un flujo de líquido constante a través de la torta<sup>(18)</sup>.

##### 4.5.1. MÉTODO DE VOLUMEN DE FILTRADO - TIEMPO

Este método involucra la formación de la torta por medio de filtración a presión constante, utilizando un equipo que permita realizar experiencias de filtración en los que se pueda medir el volumen de filtrado como función del tiempo.

Al integrarse la ecuación (4.7), entre las condiciones para  $t=0$ ,  $V_L = 0$  y para  $t=t$ ,  $V_L=V_L$ , se tiene que:

$$t = \frac{r_C \cdot K \cdot \mu_L}{2 \cdot A_F^2 \cdot \Delta p} \cdot V_L^2 + \frac{\mu_L \cdot R_M}{A_F \cdot \Delta p} \cdot V_L \quad (4.20)$$

Para simplificar, se agrupan los términos de la ecuación (4.20) en  $a_v$  y  $b_v$ :

$$a_v = \frac{r_c \cdot K \cdot \mu_L}{2 \cdot A_F^2 \cdot \Delta p} \quad (4.21)$$

$$b_v = \frac{\mu_L \cdot R_M}{A_F \cdot \Delta p} \quad (4.22)$$

$$t = a_v \cdot V_L^2 + b_v \cdot V_L \quad (4.23)$$

Realizando un ajuste por mínimos cuadrados de los datos experimentales se obtiene  $a_v$  y  $b_v$ , y con estos valores puede determinarse la resistencia del medio ( $R_M$ ) y la resistencia específica de la torta ( $r_c$ ).

Otra forma de obtener  $a_v$  y  $b_v$ , es trazar la gráfica de la ecuación (4.23) linealizada, utilizando los valores experimentales de filtración.

$$\frac{t}{V_L} = a_v \cdot V_L + b_v \quad (4.24)$$

Esta recta  $t/V_L$  vs.  $V_L$ , ilustrada en la figura N°3, tiene como pendiente  $a_v$  y punto de corte  $b_v$  que permiten calcular los valores de  $r_c$  y  $R_M$  respectivamente.

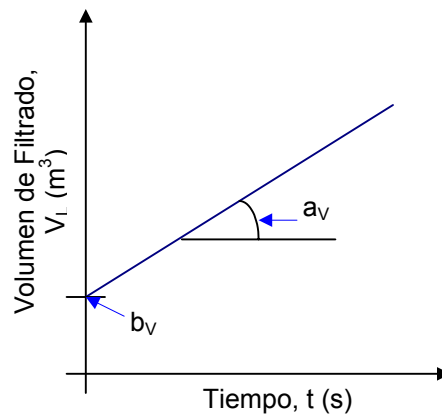


Figura N°3: Método de volumen de filtrado – tiempo



#### 4.5.2. MÉTODO DE ALTURA DE TORTA - TIEMPO

Las pruebas de filtración que deben ser realizadas en un equipo industrial, normalmente no permiten la medición de volumen filtrado en función del tiempo de crecimiento de la torta. En estos casos resulta mucho más sencillo hacer experimentos en los que se mide la altura que ha alcanzado la torta cuando ha transcurrido un tiempo de filtrado previamente establecido. La diferencia de presión debe mantenerse constante durante la filtración.

Al integrar la ecuación (4.8) entre los límites: para  $t=0$ ,  $h_c=0$ , y  $t=t$ ,  $h_c=h_c$ , se obtiene.

$$t = \frac{r_c \cdot \mu_L}{2 \cdot \kappa \cdot \Delta p} \cdot h_c^2 + \frac{R_M \cdot \mu_L}{\kappa \cdot \Delta p} \cdot h_c \quad (4.25)$$

Similar al método de volumen de filtrado tiempo, se agrupan los términos de la ecuación (4.25) en  $a_h$  y  $b_h$ , para simplificar:

$$a_h = \frac{r_c \cdot \mu_L}{2 \cdot \kappa \cdot \Delta p} \quad (4.26)$$

$$b_h = \frac{\mu_L \cdot R_M}{\kappa \cdot \Delta p} \quad (4.27)$$

$$t = a_h \cdot h_c^2 + b_h \cdot h_c \quad (4.28)$$

La ecuación (4.28), se divide entre  $h_c$  y se obtiene la recta:

$$\frac{t}{h_c} = a_h \cdot h_c + b_h \quad (4.29)$$

A partir de datos experimentales de altura de torta en función del tiempo requerido se obtiene una línea recta de pendiente ( $a_h$ ) y punto de corte ( $b_h$ ), los cuales permiten calcular la resistencia específica de la torta ( $r_c$ ) y la resistencia del medio ( $R_M$ ), tal como se ilustra en la figura N°4.

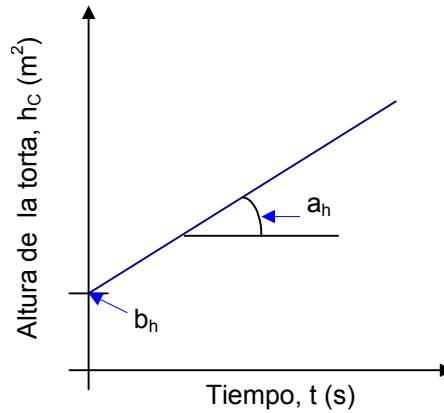


Figura N°4: Método de altura de torta - tiempo

#### 4.5.3. MÉTODO DE PERMEACIÓN DE TORTA

Este método consiste en reproducir el experimento de Darcy. Una vez que es formada la torta de espesor conocido, se hace circular un volumen determinado de líquido claro (sin sólido). Dado que la torta ya está formada y que el fluido que se hace circular no es suspensión sino filtrado, el caudal permanecerá constante a lo largo del tiempo. A partir de la ley de Darcy, el proceso puede ser descrito como:

$$\Delta p \cdot A_F = (r_C \cdot h_C + R_M) \cdot \mu_L \cdot Q \quad (4.30)$$

Arreglando la ecuación (4.30) se obtiene la siguiente expresión, para la resistencia total ( $R_T$ ).

$$R_T = \frac{\Delta p \cdot A_F}{\mu_L \cdot Q} = r_C \cdot h_C + R_M \quad (4.31)$$

Al evaluar datos experimentales de diferentes alturas de torta ( $h_C$ ) y el caudal de líquido ( $Q$ ), se puede obtener la recta de la ecuación (4.31) representada en el gráfico  $(\Delta p \cdot A_F)/(\mu_L \cdot Q)$  contra  $h_C$ . La pendiente de esta recta, que se ilustra en la figura N°6, corresponde a  $r_C$  y punto de corte a  $R_M$ .

El término  $(\Delta p \cdot A_F)/(\mu_L \cdot Q)$ , representa la resistencia total que está constituida por la resistencia de la torta y la resistencia del medio.

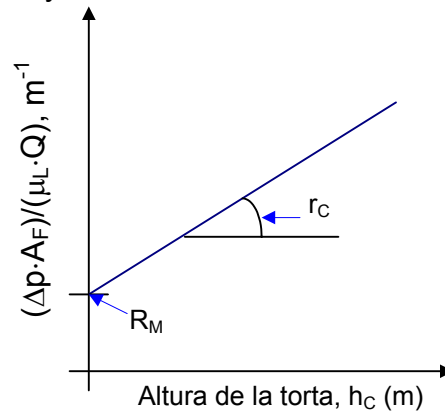


Figura N°5: Método de permeación

#### 4.6. MODELOS DE PERMEABILIDAD

Para describir el comportamiento de sistemas de fluidos en lechos de sólidos mediante sus propiedades, se han desarrollado modelos basados en dos enfoques: uno en el que el flujo es conducido a través de diferentes arreglos capilares y otro, en el que se considera el flujo que pasa alrededor de objetos sumergidos.

Entre los modelos basados en arreglos capilares para determinar la permeabilidad ( $K$ ) de la torta, se tiene el modelo de Carman-Kozeny<sup>(7)</sup> que es uno de los más utilizados, por lo que se describe detalladamente en esta sección. También se cuenta con los modelos de Rumpf-Gupte<sup>(19)</sup> y Molerus-Rumpf-Palhl<sup>(26)</sup>.

Por otra parte, de los modelos que utilizan el enfoque del flujo que pasa alrededor de objetos sumergidos, se estudia en este trabajo el modelo propuesto por Happel-Brenner<sup>(12)</sup>.

#### 4.6.1. MODELOS DE ARREGLOS CAPILARES

Estos modelos consisten en representar los poros que forman las partículas sólidas en el lecho, como un haz de capilares de igual tamaño, por donde pasa el líquido que es filtrado en el proceso<sup>(26)</sup>, tal como se ilustra en la figura N°6.

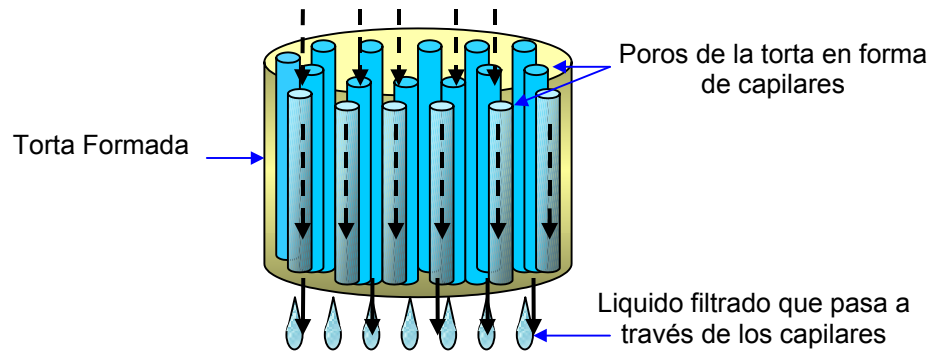


Figura N°6: Modelo de flujo a través de arreglos capilares

Los modelos de arreglos capilares, se basan en la ecuación de Hagen-Poiseuille<sup>(26)</sup>, la cual describe el flujo laminar de un fluido newtoniano dentro de un tubo cilíndrico de diámetro  $d_k$ , y de longitud  $L$ .

$$v_H = \frac{d_k^2}{32 \cdot \mu_L} \cdot \frac{\Delta P}{L} \quad (4.32)$$

Asumiendo que la fracción de área disponible para el paso del fluido es igual a la fracción vacía del lecho, es decir a la porosidad ( $\varepsilon$ ), se puede establecer la relación entre la velocidad superficial del líquido que atraviesa la torta ( $q$ ), y la velocidad superficial del fluido dentro de cada poro o capilar ( $v_H$ )<sup>(26)</sup>.

$$v_H = \frac{q}{\varepsilon} \quad (4.33)$$

Esta relación, permite obtener una expresión análoga a la ecuación de Darcy:

$$q = \frac{1}{\mu_L} \cdot \left[ \frac{\varepsilon \cdot d_k^2}{32} \right] \cdot \frac{\Delta P}{L} \quad (4.34)$$

#### 4.6.1.1. Modelo de Carman-Kozeny

Para describir el flujo de fluidos a través de lechos empacados, Kozeny<sup>(7)</sup> se basa en la ecuación de Hagen-Poiseuille, pero asume que la velocidad superficial del fluido dentro del poro ( $v_H$ ) es mayor que la velocidad superficial ( $q$ ) de líquido que atraviesa el lecho, debido a que la longitud del poro ( $L_P$ ) que recorre el fluido, es mayor que la altura del lecho ( $L$ ). Bajo este análisis, se introduce el concepto de tortuosidad ( $\tau$ ), que es determinada por la relación entre estas longitudes.

La tortuosidad ( $\tau$ ), indica cuan desplazado está el recorrido real que sigue el fluido a través del poro, de su condición ideal, es decir, del recorrido que seguiría si verdaderamente el poro fuese un capilar<sup>(7)</sup>.

$$\tau = \frac{L_P}{L} \quad (4.35)$$

La relación de Dupuit es corregida al incluir el término de tortuosidad.

$$v_H = \frac{q}{\varepsilon} \cdot \frac{L_P}{L} = \frac{q}{\varepsilon} \cdot \tau \quad (4.36)$$

En este modelo se consideran los poros del lecho, como un conjunto de capilares de igual tamaño que tienen un área de sección transversal difícil de determinar, pero que sin embargo permanece constante, en consecuencia se introduce el término constante  $k_0$ .

$$v_H = \frac{d_k^2}{(16 \cdot k_0) \cdot \mu_L} \cdot \frac{\Delta P}{L_P} \quad (4.37)$$

El diámetro del poro ( $d_k$ ), se estima mediante el radio hidráulico ( $d_H$ ) o el radio hidráulico ( $r_H$ ), es decir, mediante la relación entre el área transversal ( $A_s$ ) y el perímetro mojado del poro ( $P_M$ )<sup>(26)</sup>.

$$d_H = 4 \cdot r_H = 4 \cdot \frac{A_s}{P_M} = 4 \cdot \frac{V_p}{S_p} \quad (4.38)$$

En términos de la fracción vacía del lecho, es decir, la porosidad ( $\varepsilon$ ) y de la superficie específica del poro ( $S_v$ , definida por unidad de volumen del sólido<sup>(26)</sup>), se tiene que:

$$d_H = 4 \cdot \frac{V_p}{S_p} = 4 \cdot \frac{\varepsilon \cdot V_T}{S_v \cdot (1 - \varepsilon) \cdot V_T} = 4 \cdot \frac{1}{S_v} \cdot \frac{\varepsilon}{(1 - \varepsilon)} \quad (4.39)$$

A partir de las ecuaciones anteriores (ecuaciones 4.36, 4.37 y 4.39); se obtiene la expresión que describe el flujo a través de lechos empacados.

$$q = \frac{1}{\mu_L} \cdot \left[ \frac{1}{(k_0 \cdot \tau^2)} \cdot \frac{\varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)^2} \cdot \frac{1}{S_v^2} \right] \cdot \frac{\Delta P}{L} \quad (4.40)$$

Al hacer la equivalencia con la ecuación de Darcy, se obtiene la ecuación general que describe el modelo de Carman-Kozeny para el cálculo de la permeabilidad ( $K$ ).

$$K = \frac{1}{(k_0 \cdot \tau^2)} \cdot \frac{\varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)^2} \cdot \frac{1}{S_v^2} \quad (4.41)$$

Este modelo fue avalado experimentalmente por Carman<sup>(7)</sup>, quien estimó el valor de la tortuosidad ( $\tau = \sqrt{2}$ ). Para arreglos de capilares cilíndricos, la constante original  $k_0$  es igual a 2, pero en trabajo realizado por Carman<sup>(7)</sup>, se ajustó su valor de para empaques dispuestos al azar, y se obtuvo que  $k_0$  es igual a 2,5.

De esta forma, se tiene una ecuación simplificada del modelo ya que el valor para el grupo  $(k_0 \cdot \tau^2)$  es 5:

$$K = \frac{1}{5} \cdot \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} \cdot \frac{1}{S_V^2} \quad (4.42)$$

Para determinar la permeabilidad mediante el modelo de Carman-Kozeny, puede asumirse que todas las partículas están disponibles para constituir la superficie de los poros ( $S_V$ ). Por lo tanto, la superficie específica de poro puede ser relacionado al tamaño medio superficie-volumen ( $x_{SV}$ ) (definido más adelante en la sección 4.8.2).

$$[S_V]_{\text{poro}} = [S_V]_{\text{particulas}} \quad (4.43)$$

$$S_V = \frac{6}{x_{SV}} \quad (4.44)$$

De esta forma, se obtiene la ecuación modificada de Carman-Kozeny.

$$K = \frac{1}{180} \cdot \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} \cdot x_{SV}^2 \quad (4.45)$$

#### 4.6.1.2. Modelo de Rumpf-Gupte

El modelo presentado por Rumpf y Gupta<sup>(19)</sup>, se basa en el estudio de un amplio rango de porosidad. Mediante este trabajo, se logra redefinir el factor de fricción para lechos empacados ( $f_p$ ), involucrado en la ecuación original de Darcy<sup>(26)</sup> relacionándolo con el número de reynolds ( $Re$ ) y la porosidad ( $\varepsilon$ ):

$$f_p = \frac{5.6}{Re} \varepsilon^{-5.5} \quad (4.46)$$

La analogía a la ecuación de Darcy, conduce a una expresión para la permeabilidad que define el modelo de Rumpf-Gupte<sup>(26)</sup>.

$$K = \frac{1}{5,6} \cdot \varepsilon^{5,5} \cdot x_{SV}^2 \quad (4.47)$$

#### 4.6.1.3. Modelo de Molerus-Rumpf-Pahl

Este modelo se desarrolla evaluando las condiciones límites que deben cumplirse para que represente también la condición de lecho fluidizado, tal como altas fracciones vacías. En este modelo se basa en el análisis del concepto de un coeficiente de arrastre ( $C_D$ ) definido por la ecuación (4.48), y se introduce la fuerza de arrastre como una función de la caída de presión a partir de un balance de fuerzas en la suspensión<sup>(26)</sup>.

$$C_D = \frac{4}{3} \cdot \frac{1}{1-\varepsilon} \cdot \frac{C}{Re} \quad (4.48)$$

El modelo de Molerus-Rumpf-Pahl, para el cálculo de la permeabilidad, conduce a la siguiente expresión:

$$K = \frac{1}{22,4} \cdot \frac{\varepsilon^{4,55}}{1-\varepsilon} \cdot x_{SV}^2 \quad (4.49)$$

#### 4.6.2. MODELOS DE FLUJO ALREDEDOR DE OBJETOS

Un enfoque fundamentalmente diferente al arreglo capilar, consiste en considerar que el flujo pasa alrededor de las partículas sumergidas en él. <sup>(26)</sup>.

Inicialmente, el flujo pasa alrededor de las partículas presentes en una suspensión muy diluida, pero a medida que transcurre el proceso, las partículas se aglomeran y el flujo que pasa alrededor de estos aglomerados



se incrementa<sup>(26)</sup>. En la figura N°7, se ilustra el flujo alrededor de las partículas contenidas en la suspensión.

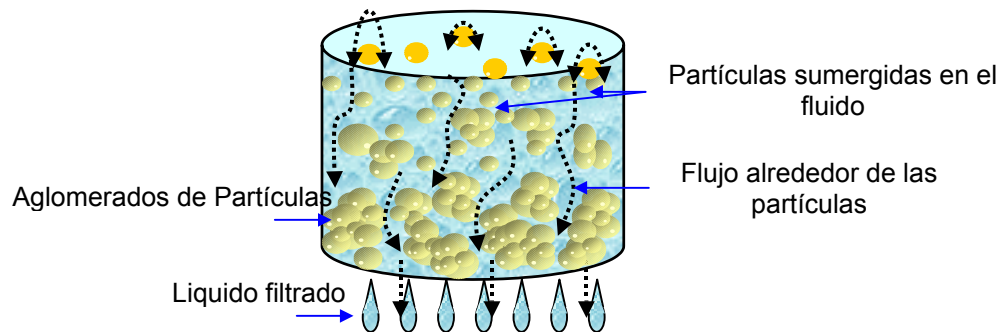


Figura N°7: Modelo de flujo alrededor de objetos sumergidos

#### 4.6.2.1. Modelo de Happel-Brenner

El modelo desarrollado por Happel y Brenner<sup>(12)</sup>, se basa en el fenómeno involucrado en el crecimiento del flujo sobre las partículas, en el que las mismas se presentan como altas concentraciones de conglomerados.

Basados en el arrastre de Stokes<sup>(12)</sup>, para el cual  $Re=0.1$ , Happel y Brenner calcularon la caída de presión para una suspensión diluida de esferas idénticas; de donde se deriva que la permeabilidad para el lecho infinitamente diluido de esferas idénticas es:

$$K = \frac{x^2}{18 \cdot (1 - \varepsilon)} \quad (4.50)$$

El concepto es extendido a suspensiones concentradas asumiendo un conglomerado tridimensional de celdas idénticas, constituidas por una esfera de diámetro  $x$ , rodeada por una capa esférica de líquido, de espesor  $\lambda_E$ , que hace que la fracción vacía de la celda sea igual a la del conglomerado. Por

lo tanto, la fracción sólida ( $\varepsilon_s$ ), esta relacionada con el tamaño de la partícula envuelta.

$$\varepsilon_s = \left[ \frac{x}{x + 2 \cdot \lambda_E} \right]^3 \quad (4.51)$$

El modelo de Happel-Brenner presentado de manera análoga a la ecuación de Darcy, se expresa como:

$$q = \frac{1}{\mu} \cdot \left[ \frac{3 - 4,5 \cdot \varepsilon_s^{1/3} + 4,5 \cdot \varepsilon_s^{5/3} - 3 \cdot \varepsilon_s^2}{3 + 2 \cdot \varepsilon_s^{5/3}} \cdot \frac{x^2}{18 \cdot \varepsilon_s} \right] \cdot x^2 \quad (4.52)$$

En términos de porosidad ( $\varepsilon$ ), en lugar de solidosidad ( $\varepsilon_s$ ), la ecuación de la permeabilidad obtenida a partir del modelo de Happel-Brenner es:

$$K = \frac{1}{18} \cdot \left[ \frac{3 - 4,5 \cdot (1 - \varepsilon)^{1/3} + 4,5 \cdot (1 - \varepsilon)^{5/3} - 3 \cdot (1 - \varepsilon)^3}{3 + 2 \cdot (1 - \varepsilon)^{5/3}} \cdot \frac{1}{(1 - \varepsilon)} \right] \cdot x^2 \quad (4.53)$$

#### 4.6.3. COMPARACIÓN DE MODELOS DE PERMEABILIDAD

En función de comparar los distintos modelos propuestos para el cálculo de la permeabilidad (K) Sorrentino<sup>(26)</sup>, ha organizado las ecuaciones de cada modelo de tal forma que puedan expresarse de una manera general.

La ecuación general de la permeabilidad (K), expresa que ésta es proporcional al cuadrado del diámetro superficie-volumen ( $x_{sv}$ ), e inversa a una función de porosidad  $\varphi(\varepsilon)$ <sup>(26)</sup>.

$$K = \frac{x_{sv}^2}{C \cdot \varphi(\varepsilon)} \quad (4.54)$$

Las constantes C y las funciones de porosidad  $\varphi(\varepsilon)$ , correspondientes a cada modelo de permeabilidad estudiado, se sintetizan en la tabla N°1.

**Tabla N°1: Modelos para el cálculo de la permeabilidad<sup>(26)</sup>**

Enfoque	Modelo	Función de Porosidad $\varphi(\varepsilon)$	Constante de Proporción (C)
Flujo a través de arreglos cilindros capilares	Kozeny-Carman	$\frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3}$	180
	Rumpf-Gupte	$\frac{1}{\varepsilon^{5.5}}$	5.6
	Molerus-Rumpf-Pahl	$\frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^{4.55}}$	22.4
Flujo alrededor de objetos sumergidos	Happel-Brenner	$\frac{3 + 2 \cdot (1-\varepsilon)^{5/3}}{3 - 4.5 \cdot (1-\varepsilon)^{1/3} + 4.5 \cdot (1-\varepsilon)^{5/3} - 3 \cdot (1-\varepsilon)^3} \cdot (1-\varepsilon)$	18

La ecuación general de permeabilidad (ec. 4.54), puede representarse gráficamente en el diagrama permeabilidad-porosidad propuesto por Sorrentino y Anlauf<sup>(22)</sup> (figura N°8). Este gráfico de coordenadas logarítmicas, permite relacionar las propiedades de la torta, representadas por la permeabilidad (K) y la porosidad ( $\varepsilon$ ), con las características de las partículas dadas por el diámetro medio ( $x_{SV}$ ).

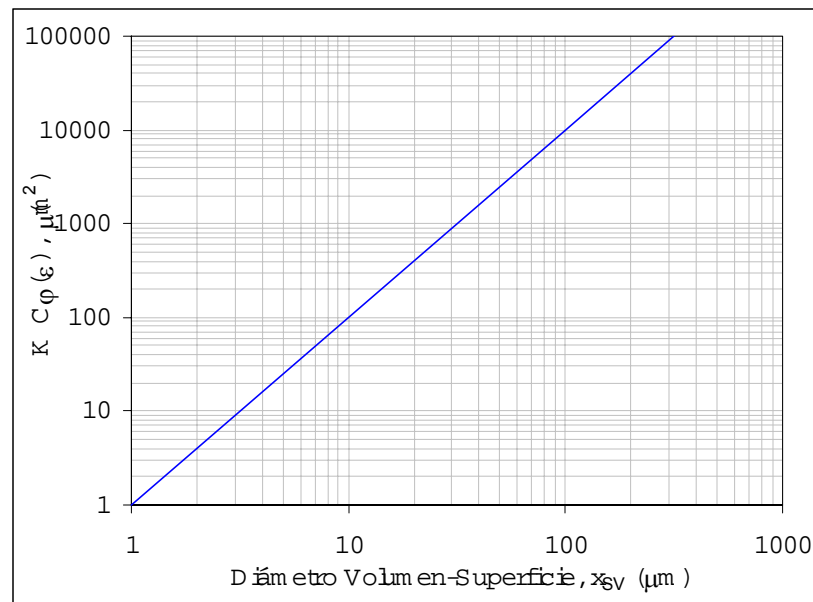


Figura N°8: Diagrama permeabilidad–porosidad<sup>(22)</sup>

#### 4.7. MODELOS DE POROSIDAD

La porosidad es el parámetro más simple para caracterizar el empaquetamiento de las partículas, es decir, la forma como se depositan dichas partículas en el lecho.

Es conocido, el hecho de 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; lo que afecta considerablemente la forma como se disponen en el lecho<sup>(14)</sup>. Sin embargo, este comportamiento no había sido tratado propiamente en modelos que relacionaran la porosidad y la distribución de tamaño de partículas; en este sentido Yu y Standish<sup>(30)</sup>, han desarrollado un modelo de correlación para estimar el término de porosidad a partir de los datos de las fracciones estrechas que componen una mezcla el cual es

válido no solo para partículas esféricas sino también para partículas de forma irregular.

#### 4.7.1. MODELO DE YU-STANDISH

El modelo Yu–Standish<sup>(30)</sup>, postula que el efecto del tamaño de las partículas sobre la forma como éstas se depositan en el lecho, puede ser modelado usando:

- Una porosidad inicial que toma en cuenta la forma como se empaican partículas de un mismo tamaño.
- El concepto de tamaño de empaque, determinado por la interacción entre las partículas que forman un lecho.

Para estimar la porosidad de un lecho formado por una mezcla determinada, debe asumirse que dicha mezcla está conformada por un sistema de  $n$  componentes que interactúan entre sí.

Los componentes que se definen para la mezcla, deben tener un solo tamaño de partícula, de esta forma, la porosidad ( $\varepsilon$ ) dependerá de: la forma de empaque de las partículas, es decir, de las porosidades individuales ( $\varepsilon_i$ ) de cada componente; de sus respectivos diámetros promedio de partículas ( $x_i$ ); y de la fracción volumétrica que ocupa cada uno dentro de la mezcla ( $F_{Vi}$ ), (donde  $i = 1, 2, \dots, n$ ).

$$\varepsilon = f(F_{V1}, F_{V2}, \dots, F_{Vn}, x_1, x_2, \dots, x_n, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n) \quad (4.55)$$

##### 4.7.1.1. Planteamiento Teórico del Modelo de Yu-Standish

En el modelo lineal de empaque de Yu y Standish<sup>(30)</sup>, se define el volumen específico de empaque de la mezcla ( $V_e$ ), como el recíproco de la

densidad de empaque (solidosidad), a partir del cual puede deducirse la expresión para estimar la porosidad:

$$V_e = \frac{1}{1 - \varepsilon} \quad (4.56)$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{1}{V_e} \quad (4.57)$$

Este volumen específico de empaque ( $V_e$ ), puede determinarse calculando todos los volúmenes específicos de empaque individuales ( $V_i^T$ ) y estableciendo el máximo para la mezcla, según la siguiente ecuación:

$$V_e = \max.(V_1^T, V_2^T, \dots, V_3^T) \quad (4.58)$$

Cada volumen individual ( $V_i^T$ ), se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$V_i^T = \sum_{j=1}^{i-1} [V_j - (V_j - 1) \cdot g(r_{i,j})] \cdot F_{V_j} + V_i \cdot F_{V_i} + \sum_{j=i+1}^n V_j \cdot [1 - f(r_{i,j})] \cdot F_{V_j} \quad (4.59)$$

En la ecuación (4.58),  $F_{V_i}$ , corresponde a las fracciones volumétricas de cada componente dentro de la mezcla;  $V_i$ , definen los volúmenes específicos individuales, calculados a partir de sus respectivas porosidades.

$$V_i = \frac{1}{1 - \varepsilon_i} \quad (4.60)$$

La interacción de los n-componentes que constituyen la mezcla, se considera en las funciones iteración,  $f(r_{i,j})$  y  $g(r_{i,j})$  de la ecuación (4.59), las cuales solo dependen del término  $r_{i,j}$ .

Si se considera  $x_1 > x_2 > \dots > x_n$ , para valores de  $i$  menores que el componente  $j$  se utiliza la función  $f(r_{i,j})$ :

$$f(r_{i,j}) = (1 - r_{i,j})^{3.33} + 2.81 \cdot r_{i,j} \cdot (1 - r_{i,j})^{2.77} \quad (4.61)$$

Para valores mayores que el componente j, se utiliza la función  $g(r_{i,j})$

$$g(r_{i,j}) = (1 - r_{i,j})^{1,97} + 0,36 \cdot r_{i,j} \cdot (1 - r_{i,j})^{3,67} \quad (4.62)$$

El término  $r_{i,j}$ , se define como la razón de tamaño de empaque equivalente, entre los componentes i y j y se determina por la siguiente ecuación potencial.

$$r_{i,j} = R_{i,j}^P \quad (4.63)$$

El exponente (P) es un valor constante, el cual es particular para tipo de torta formada. El término  $R_{i,j}$ , es la razón de tamaño volumétrico, definida como la relación entre el tamaño de las partículas del componente más pequeño (i), y el tamaño de las partículas del componente más grande (j).

$$R_{i,j} = \frac{x_i}{x_j} \quad (4.64)$$

#### 4.7.1.2. Parámetros del modelo de Yu-Standish

Para aplicar las ecuaciones involucradas en el modelo de Yu-Standish se debe conocerse cierta información previa, tal como: el tamaño promedio de las partículas de cada fracción ( $x_i$ ), que viene dado por la granulometría de cada componente; y el parámetro (P) que relaciona la razón de tamaño de empaque ( $r_{i,j}$ ) con la razón de tamaño volumétrico ( $R_{i,j}$ ).

El modelo planteado por Yu-Standish, fue avalado experimentalmente por Yu<sup>(30)</sup>, utilizando alúmina para realizar experiencias con dos tipos de tortas formadas, denominadas lecho denso (tapped packing) y lecho suelto (poured packing), es decir, una clase de torta menos densa que la anterior

- **Determinación de la porosidad individual ( $\varepsilon_i$ ):**

La porosidad individual de cada componente, puede determinarse experimentalmente o bien, mediante alguna ecuación empírica previamente establecida. Yu<sup>(30)</sup>, propone una relación para estimar la porosidad individual que depende del tamaño medio de las partículas ( $x_i$ ).

$$\varepsilon_i = \varepsilon_0 + (1 - \varepsilon_0) \cdot \exp(-a \cdot x_i^b) \quad (4.65)$$

Esta ecuación es particular para cada tipo de lecho, es decir, para cada forma de preparar la torta. Las constantes  $\varepsilon_0$ ,  $a$  y  $b$ , se obtienen a partir del ajuste de mínimos cuadrados de datos de porosidad obtenidos experimentalmente.

- **Determinación de la razón de tamaño de empaque ( $r_{i,j}$ ):**

La razón de tamaño de empaque ( $r_{i,j}$ ), se determina mediante la ecuación (4.63), la cual, tiene dos parámetros: la razón de tamaño volumétrico ( $R_{i,j}$ ), que se obtiene a partir de la ecuación (4.64), y el exponente ( $P$ ), que es particular para cada tipo de torta.

Para estimar el exponente ( $P$ ), en el trabajo realizado por Yu<sup>(30)</sup> para cada tipo de formación de torta, se realizaron una serie de mezclas binarias a partir de fracciones estrechas combinadas en distintas proporciones, abarcando un rango desde 0% de la fracción de mayor tamaño hasta 100% de la misma. A cada par, se le determinó la porosidad experimentalmente. Con estos valores experimentales de porosidad, el valor de  $\varepsilon_i$  respectivo  $R_{i,j}$  (proveniente de la distribución de tamaño de partículas), y las ecuaciones de iteración (4.61) y (4.62) se determinó por ajuste de mínimos cuadrados los valores de  $r_{i,j}$  para cada par; obteniendo así representaciones como la que se muestra en la figura N°9



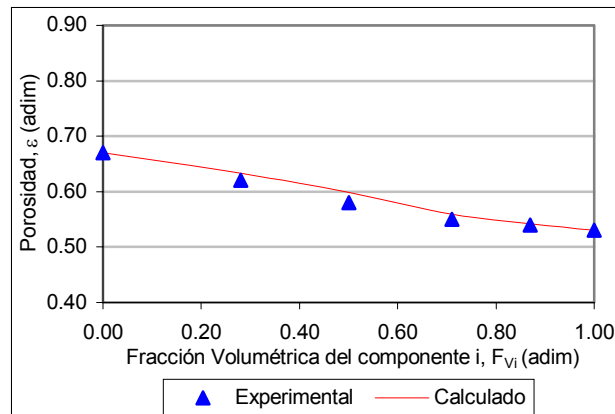


Figura N°9: Porosidad experimental y calculada para cada par de mezclas del modelo de Yu-Standish<sup>(30)</sup>.

Finalmente, el valor del parámetro  $P$ , utilizado en la ecuación (4.63), se obtuvo al hacer un ajuste potencial de los valores de  $R_{i,j}$  y  $r_{i,j}$  calculados. En la figura N°10 se muestra la representación gráfica de  $r_{i,j}$  vs.  $R_{i,j}$  obtenida en trabajo realizado por Yu para empaques poco densos (poured packing), donde el valor de  $P$  estimado fue 0,293<sup>(30)</sup>.

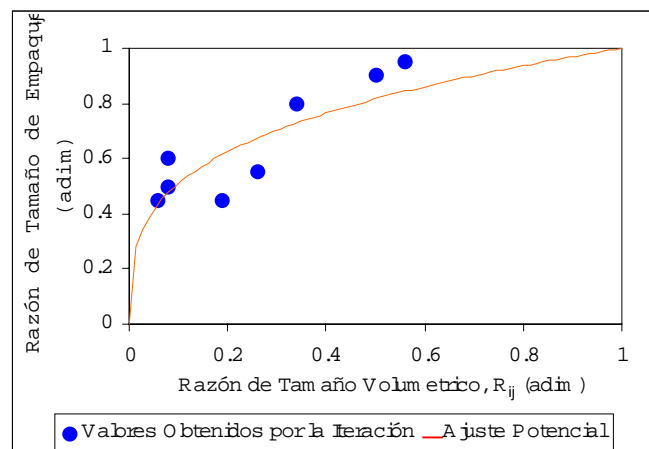


Figura N°10: Ajuste de  $r_{i,j}$  vs.  $R_{i,j}$ , para obtener el parámetro  $P$  en condiciones de lecho poco denso (poured packing)<sup>(30)</sup>.

#### **4.8. CARACTERIZACIÓN DE SISTEMAS DE PARTÍCULAS**

Las variables que determinan el proceso de filtración, como la velocidad de sedimentación de las partículas, la resistencia específica y la permeabilidad de la torta, están influenciadas por las propiedades de la suspensión a separar. Por lo tanto, es necesario caracterizar el sistema disperso sólido-líquido, lo que implica conocer las propiedades básicas del sólido que lo conforman, tales como: tamaño, forma, densidad y propiedades superficiales de las partículas, así como la distribución de tamaño de las mismas en el sistema.

Las partículas que constituyen el sólido del sistema sólido-líquido que se requiere separar, se definen como la unidad individual en la que está dividido un material. La medición del tamaño se refiere generalmente a la partícula individual, y es de suma importancia deshacer los grupos de partículas (aglomerados), con el fin de dispersarlas para así, determinar sus propiedades específicas.

En lo que respecta a la forma de las partículas, éstas se pueden clasificar en regulares e irregulares. Las partículas regulares son aquellas que tienen una forma geométrica conocida y pueden ser definidas por dos parámetros: el tipo de forma y la dimensión principal que la caracteriza; por ejemplo, para una partícula de forma esférica, la medida principal es el diámetro. Por otra parte, las partículas irregulares pueden ser definidas mediante un número de tamaños, dependiendo de cual dimensión o propiedad se esté midiendo.

##### **4.8.1. TAMAÑO DE PARTÍCULAS**

Debido a que la mayoría de los sistemas particulados presentan variaciones de forma entre sus componentes (partículas), no se puede establecer directamente longitudes asociadas para la determinación de su

tamaño, por lo que, se debe definir una base de comparación en función de propiedades geométricas o físicas, obteniéndose así, un tamaño que depende de la dimensión o propiedad medida. En tal sentido existen básicamente tres grupos de tamaños los cuales se basan en la medida de una característica con dimensión de longitud:

#### 4.8.1.1. Diámetro de Esfera Equivalente

Esta longitud, corresponde al diámetro de una esfera que tendría las mismas propiedades que la partícula, tales como: volumen, superficie, área proyectada, caída libre y velocidad de sedimentación. En la tabla N°2 se definen y clasifican los diámetros utilizados para identificar una partícula irregular<sup>(27)</sup>.

**Tabla N°2: Diámetros de esfera equivalente<sup>(27)</sup>**

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

#### 4.8.1.2. Diámetro de Círculo Equivalente

Está representado por el diámetro de un círculo que tendría las mismas propiedades de proyección de contorno de la partícula. Entre estas se tienen: el perímetro, el área proyectada de la partícula en posición estable y con orientación aleatoria (ver tabla N°3)<sup>(27)</sup>.

**Tabla N°3: Diámetros de círculo equivalente<sup>(27)</sup>**

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

#### 4.8.1.3. Diámetros Estadísticos

Estos diámetros, son mediciones de parámetros estadísticos basados en la geometría presentada por la partícula, bajo una proyección bidimensional generalmente proporcionada por un microscopio. En la tabla N°4, se tiene los diámetros estadísticos definidos<sup>(27)</sup>.

**Tabla N°4: Lista de diámetros estadísticos<sup>(27)</sup>**

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

#### 4.8.2. DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA (DTP)

Para representar el 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 (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.

##### 4.8.2.1. Densidad de Distribución

La densidad de distribución ( $f(x)$ ), 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 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. En la figura N°11, se presenta un gráfico típico de distribución de densidad<sup>(27)</sup>.

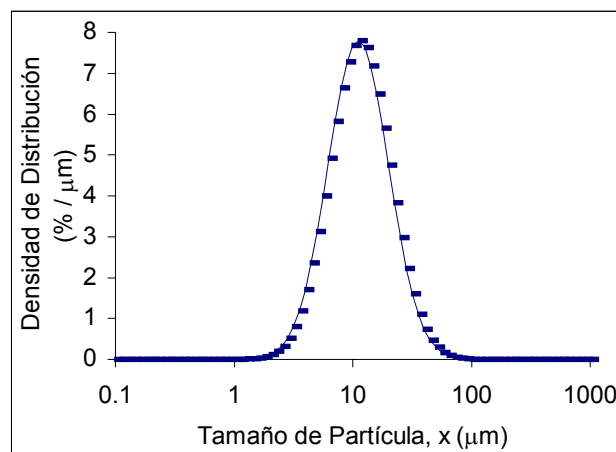


Figura N°11: Densidad de distribución

#### 4.8.2.2. Distribución de Frecuencia Acumulada

La distribución acumulada de tamaños de partículas ( $F(x)$ ), 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<sup>(27)</sup>:

$$F(x) = \int_{x_1}^{x_2} f(x) \cdot dx \quad (4.66)$$

En la figura N°12, se presenta una gráfica típica de la distribución de frecuencia acumulada.

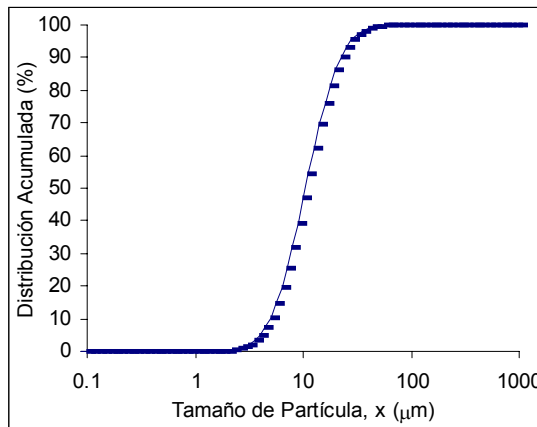


Figura N°12: Distribución acumulada

#### 4.8.2.3. 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 se aplica en función de los requerimientos del análisis; y se representan con una notación de 0,1,2,3. En la tabla N°5 se sintetizan los tipos de distribución utilizados.

Tabla N°5: Tipos de distribución de tamaño<sup>(27)</sup>

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

#### 4.8.2.4. Tamaño promedio

El tamaño promedio, permite tener una idea global del tamaño de las partículas, reduciendo a un solo número la información de la distribución de las mismas. Este número se estima a partir de una medida de tendencia central que corresponde a un índice de localización central cuyo propósito es representar a la población de partícula. Se pueden definir varios tipos de medidas de tendencia que son aplicadas dependiendo de los resultados que se pretendan obtener de los datos.

▪ **Moda**

La moda ( $M_D$ ) de un conjunto de números, es el valor que más se repite, por tal motivo puede existir más de una moda de distribución de frecuencia, llamándose esta distribución multimodal.

▪ **Mediana**

La mediana ( $x_{50}$ ), 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 iguales.

▪ **Media**

La media ( $\bar{x}$ ), representa un valor promedio basado en la frecuencia que ejerce cada valor o clase dentro de la muestra. Para el estudio de la DTP se define a través de la función de tamaño  $g_k(x)$  y la densidad de distribución  $f(x)$  o la distribución de frecuencia  $F(x)$  de manera integral:

$$\bar{x} = \int_0^{\infty} g_k(x) \cdot f(x) \cdot dx = \int_0^1 g_k(x) \cdot dF(x) \quad (4.67)$$

La función de tamaño  $g_k(x)$  permite definir diferentes tipos de medias, presentadas en la tabla N°6. En el análisis de tamaños de partículas, usualmente se aplica la media armónica denominada  $D_{3,2}$ , para estimar el tamaño medio de partículas de una mezcla dada.



Tabla N°6: Tipos de medias<sup>(27)</sup>

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

#### 4.8.2.5. Medidas de Dispersión

Las medidas de dispersión son un indicador de la variable aleatoria alrededor de un valor representativo de la muestra. Algunas de las medidas de dispersión más usadas son: la varianza y la desviación estándar.

La desviación estándar ( $\sigma$ ), relaciona la desviación de los valores con respecto a una medida y se denomina según la media con la que es calculada (aritmética, geométrica, etc.)<sup>(27)</sup>.

La varianza ( $\sigma^2$ ), es la medida de las desviaciones al cuadrado con relación a la media y se utiliza toda la curva de distribución para definir esta dispersión<sup>(27)</sup>.

#### 4.8.3. SUPERFICIE ESPECÍFICA

La superficie específica ( $S_v$ ), representa la relación entre la superficie de la partícula ( $S$ ) y el volumen de dicha partícula ( $V$ ):

$$S_v = \frac{S}{V} \quad (4.68)$$

Para una partícula esférica, la relación superficie-volumen es:

$$S_v = \frac{\pi \cdot x^2}{\frac{\pi}{6} \cdot x^3} = \frac{6}{x} \quad (4.69)$$

Para partículas no esféricas, se tiene que:

$$S_v = \frac{6}{x_{sv}} \quad (4.70)$$

Una forma de determinar la superficie específica ( $S_v$ ) de las partículas, es por medio de la técnica de fotometría que consiste medir la apertura de ángulo de un rayo láser que se hace pasar a través de suspensión de partículas<sup>(9)</sup>.

Por medio de la ley de Lambert-Beer<sup>(9)</sup>, la superficie específica se relaciona con la intensidad de luz recibida en el detector del equipo fotométrico ( $I/I_0$ ), la concentración volumétrica de sólidos ( $\phi_s$ ), un coeficiente de extinción conocido ( $k_E$ ) y la longitud de la celda en la que se llevan a cabo las experiencias de fotometría.

$$\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = \left(\frac{S_v \cdot k_E \cdot L}{4}\right) \cdot \phi_s \quad (4.71)$$

#### 4.8.4. FACTOR DE FORMA

El factor de forma de las partículas ( $\psi_{i,j}$ ), es un parámetro que permite correlacionar las mediciones de los tamaños de partículas obtenidas por diferentes métodos. De forma general, se suele definir el factor de forma como el cociente entre dos diámetros equivalentes

$$\psi_{i,j} = \left( \frac{x_i}{x_j} \right) \quad (4.72)$$

Para las tortas de filtración, se ha establecido la conveniencia del diámetro promedio superficie-volumen ( $x_{SV}$ )<sup>(22)</sup>, sin embargo esto representa un problema cuando se tratan partículas de forma irregular, ya que los equipos comerciales disponibles usualmente proporcionan medidas basadas en la superficie específica ( $S_V$ ). En este sentido Sorrentino<sup>(26)</sup>, ha definido un factor de forma ( $\psi_{SV}$ ), el cual compara el diámetro promedio superficie-volumen real de las partículas ( $x_{SV}$ ), con el suministrado por los equipos comerciales para obtener la DTP ( $D_{3,2}$ ), el cual se basa en asumir partículas esféricas. Este factor de forma, se expresa como:

$$\psi_{SV} = \frac{x_{SV}}{D_{3,2}} \quad (4.73)$$

En otras palabras, este nuevo factor de forma, compara el diámetro medio superficie-volumen necesario en la ecuación de Carman-Kozeny ( $x_{SV}$ ), con el diámetro medio superficie-volumen calculado asumiendo partículas esféricas ( $D_{3,2}$ , medido en este caso por difracción láser).

Igualmente, la superficie específica ( $S_V$ ), puede relacionarse tanto con el tamaño de las partículas como con su forma.

$$S_V = \frac{6}{x_{SV}} = \frac{6}{\psi_{SV} \cdot D_{3,2}} \quad (4.74)$$

Por lo tanto, la ecuación de Carman-Kozeny se modifica<sup>(26)</sup> al incluir el factor de forma definido:

$$K \cdot 180 \cdot \varphi(\varepsilon) = \psi_{SV}^2 \cdot D_{3,2}^2 \quad (4.75)$$

#### 4.8.4.1. Factor de forma para carbonato y esferas de vidrio

El factor de forma ( $\psi_{SV}$ ), para partículas de esferas de vidrio y partículas de carbonato fue determinado en el trabajo realizado por Bachmann, Richel y Sorrentino<sup>(9)</sup>; a través del valor de la superficie específica ( $S_V$ ) medida por el método de fotometría (sección 4.8.3).

Las experiencias del trabajo de Bachmann et. al.<sup>(9)</sup>, se realizaron en un equipo diseñado especialmente para medir el ángulo de incidencia de un láser que pasa a través de una suspensión. Al realizar esta experiencia con suspensiones de diferentes concentraciones se pudo determinar la superficie específica de cada mezcla ( $S_V^{Ph}$ ).

Utilizando mezclas de diferentes distribuciones de tamaño de partícula, a las cuales se les determinó su superficie específica por fotometría ( $S_V^{Ph}$ ) se pudo estimar el factor de forma de las partículas ( $\psi_{SV}$ ) representando en forma gráfica la ecuación (4.74), que define la superficie específica ( $S_V$ ) en relación al diámetro superficie-volumen ( $D_{3,2}$ ). En este trabajo, el  $D_{3,2}$  se obtuvo por difracción láser en el equipo Mastersizer 2000.

En la figura N°13, se presenta los resultados obtenidos en el trabajo de Bachmann et. al.<sup>(9)</sup>, en donde la pendiente de las gráficas representa el factor de forma ( $\psi_{SV}$ ) de cada sustancia. Para el carbonato de calcio se obtuvo que  $\psi_{SV}=0,59$ ; y para las esferas de vidrio:  $\psi_{SV}=0,93$ .

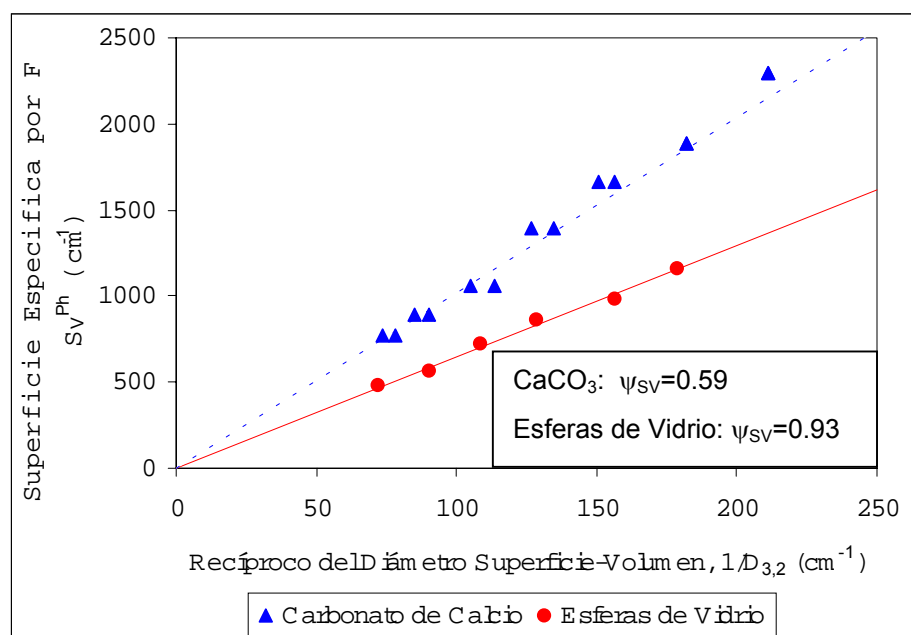


Figura N°13: Estimación del factor de forma y cociente de forma para carbonato y esferas de vidrio<sup>(9)</sup>

## 5. ANTECEDENTES

---

Con la finalidad de profundizar en el estudio de la relación que existe entre la estructura de la torta, sus características y las propiedades del proceso de filtración, en el laboratorio de separaciones mecánicas (LSM-UCV) se han desarrollado diversas investigaciones que han contribuido a comprender el comportamiento de las partículas que forman un lecho por filtración.

De igual forma, se ha venido desarrollado una estrategia de reducción de datos que logra sintetizar en forma simple los parámetros que intervienen en el proceso de filtración, y se han obtenido tendencias que permiten predecir distintas propiedades de las tortas.

Es de especial interés para esta investigación, destacar los trabajos enfocados al estudio de la estructura de la torta, la permeabilidad y la porosidad que han sido desarrollados recientemente en el LSM.

### 5.1. EFECTO DE LA ESTRUCTURA DE LA TORTA EN LAS CARACTERÍSTICAS DE FILTRACIÓN (Bongiovanni, R.)<sup>(4)</sup>

En este trabajo, se estudió el efecto de la segregación sobre los parámetros con los cuales se caracterizan las tortas de filtración (resistencia específica, resistencia del medio filtrante, porosidad, curva de presión capilar). La experiencia se basó en el estudio de tortas de carbonato de calcio segregadas, formadas artificialmente. Se diferenció el mecanismo de formación de torta de según la disposición de las partículas en el lecho, cuando las tortas se prepararon de forma tal que las partículas más grandes quedaban en fondo, se denominó segregación positiva; en el caso contrario,

es decir, cuando las partículas finas sedimentaban primero quedando en el fondo mientras las más grandes quedaban en la parte superior de la torta, se denominó segregación negativa. . Los resultados obtenidos en este estudio indican que resistencia específica de la de la torta varía en un 20% para diferentes tipos de segregación; las tortas segregadas positivamente presentan una deslicorización precoz a bajas presiones y además poseen una presión capilar relativamente superior al resto de las tortas; el valor de la porosidad disminuye para este tipo de tortas con relación a tortas formadas por el mecanismo de segregación negativa por lo que se deduce que hay un efecto migratorio de las partículas finas; la distribución de poro presenta un comportamiento similar al de la porosidad. Se pudo concluir que la segregación negativa en las tortas, favorece la etapa de deslicorización y reduce a un mínimo la saturación remanente.

## **5.2. EFECTO DEL TIPO DE DETERMINACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA EN LA RELACIÓN ENTRE AMPLITUD Y DESLICORIZACIÓN (Finol, C., Santalices, M.)<sup>(11)</sup>.**

Finol y Santalices, probaron una estrategia de reducción de datos introducida por Sorrentino y Anlauf<sup>(20)</sup>, que permite a partir de la información compilada de una sustancia dada, predecir el comportamiento de la cinética de deslicorización, cuando varia la distribución de tamaño de las partículas.

El problema clave de este trabajo fue estudiar el efecto del tipo de determinación de la distribución de tamaño de partículas (DTP) en la deslicorización. Para lograr este objetivo se obtuvieron siete fracciones estrechas de carbonato de calcio, con dichas fracciones se elaboraron tres grupos de mezclas de granulometría controlada manteniendo la desviación estándar constante y variando el tamaño promedio. La distribución de

tamaño de partículas se analizó empleando las técnicas de: difracción de rayos láser, electrozona, fotosedimentación y microscopía óptica.

Para las mezclas obtenidas se determinó la cinética de deslicorización y las curvas de equilibrio o presión capilar. Las curvas de cinética se obtuvieron utilizando un nuevo procedimiento experimental que se basó en obtener las curvas de reducción de humedad puntualmente, es decir, por cada curva se realizaron seis pruebas de cinética a distintos tiempos de deslicorización.

En esta investigación, se utilizó un modelo de adimensionalización que agrupa satisfactoriamente los resultados de cinética de deslicorización de diversas presiones. Dicho modelo incluye como información sobre la distribución de tamaño de partículas, el diámetro medio superficie - volumen,  $x_{sv}$ , lo que permitió agrupar en una misma figura los datos de todas las mezclas estudiadas.

En relación con las mezclas, se obtuvo que al aumentar la desviación estándar a un mismo tamaño promedio, las tortas deslicorizaban más lentamente, lo cual produce saturaciones de equilibrio mayores.

### **5.3. EFECTO DE LA SEGREGACIÓN DE LA TORTA EN SUS CARACTERÍSTICAS DE FILTRACIÓN (López, F., Nuñez, A.)<sup>(13)</sup>**

El objetivo fundamental del trabajo realizado por López y Nuñez, fue estudiar la influencia de la segregación sobre los parámetros que caracterizan las tortas de filtración, tales como: resistencia específica de la torta, resistencia del medio filtrante y porosidad de la torta. Se estudiaron tortas de carbonato de calcio, formadas por sedimentación natural, las cuales fueron clasificadas según la distribución por tamaños de las partículas a lo largo de la torta en: homogéneas y segregadas.



De los resultados obtenidos, se encontraron los siguientes efectos: la resistencia específica de una torta segregada disminuye en un 50% con respecto a la resistencia de una torta homogénea; las suspensiones con concentración de  $\text{CaCO}_3$  mayor a 40% en volumen, al sedimentar forman tortas de filtración homogéneas; las suspensiones que tienen una concentración de  $\text{CaCO}_3$  entre el 20 y 40% en volumen, al sedimentar forman tortas con segregaciones intermedias, las cuales dependen del porcentaje de concentración de la suspensión; las suspensiones con concentraciones menores al 20% en volumen, forman tortas que presentan una misma tendencia de segregación, la cual es independiente de la concentración de la suspensión; la permeabilidad de una torta de filtración es una función creciente con respecto al tamaño de las partículas que la conforman; la porosidad de las tortas que presentan segregación es mayor que la porosidad de las tortas homogéneas.

#### **5.4. MODELO DE CORRELACIÓN DADAS CURVAS DE DESLICORIZACIÓN CON INFORMACIÓN GRANULOMÉTRICA (Calzadilla, H., Mesa, M.)<sup>(6)</sup>.**

En este trabajo se analizó el efecto que produce la asimetría de las mezclas sobre la cinética y el equilibrio de las tortas de filtración. Para ello se prepararon dos grupos de mezclas con mediana constante y desviación estándar variable. La distribución del tamaño de las partículas de las mismas se analizó por dos técnicas diferentes: difracción láser y principio coulter.

Las tortas a deslicorizar se formaron de manera homogénea por capas para evitar la segregación de las partículas. Para cada curva de cinética se realizaron siete pruebas de deslicorización a tiempos diferentes, este procedimiento es llamado reducción de humedad puntual, con estos datos se

consiguieron las curvas de cinética de deslicorización y de equilibrio o presión capilar.

### **5.5. EFECTO DE LA FORMA DE LAS PARTÍCULAS SOBRE LA RELACIÓN ENTRE LA GRANULOMETRÍA Y PERMEABILIDAD (Barrero. N., Goncalves, M.)<sup>(3)</sup>**

El objetivo de este estudio, es determinar el efecto que tiene la forma de las partículas en los parámetros de filtración, como son la permeabilidad y la granulometría y de este modo obtener a partir de la ecuación planteada por Carman-Kozeny, el factor de forma para distintos materiales.

Las pruebas se realizaron con fracciones estrechas y con mezclas de diferentes granulometrías de esferas de vidrio, alúmina, carbonato de calcio y magnesita.

Los resultados obtenidos en este trabajo permitieron concluir que al representar la permeabilidad-porosidad en función del tamaño promedio de partículas ( $D_{3,2}$ ), se confirma la tendencia predicha por la ecuación de Carman-Kozeny, según la cual, la permeabilidad es proporcional al cuadrado del tamaño promedio. Se determinó que el desplazamiento de las rectas que ajustan los datos experimentales de los materiales empleados con respecto a la recta de la ecuación de Carman-Kozeny, es una medida de la forma de las partículas, tal como ha sido planteado por Sorrentino<sup>(22)</sup>.

#### **5.6. EVALUACIÓN DEL USO DEL TAMAÑO PROMEDIO $D_{3,2}$ PARA REPRESENTAR LA INFLUENCIA DE LA GRANULOMETRÍA SOBRE LA PERMEABILIDAD (fajardo, M., Ravelo., M.)<sup>(10)</sup>**

En el trabajo presentado por Fajardo y Ravelo, se sometió a prueba el modelo de reducción de datos conocido como gráfico permeabilidad-porosidad<sup>(22)</sup>, usando diversas características de la DTP de la suspensión, para evaluar el uso del tamaño promedio  $D_{3,2}$  como parámetro.

Para ello, se evaluaron diferentes tipos de mezclas de carbonato de calcio, estrechas de gruesas, estrechas de finos, simétricas, amplias, asimétricas y bimodales.

Los resultados obtenidos por sus experiencias, permiten predecir que la porosidad promedio para tortas homogéneas de carbonato de calcio se encuentra en un rango establecido (entre 0.40 y 0.50), además se observa que ésta disminuye cuando hay presencia de finos; de igual manera se comporta la permeabilidad.

Para correlacionar los datos obtenidos se utilizó el modelo de Carman-Kozeny modificado por Sorrentino<sup>(22)</sup>, y se pudo determinar que el tamaño promedio  $D_{3,2}$  sirve como parámetro de comparación, ya que todos los datos de las distintas mezclas presentan la misma tendencia que el modelo teórico de Carman-Kozeny, una línea recta de pendiente dos, la cual es desplazada hacia la derecha al incluir el efecto de la forma de las partículas.

### **5.7. ESTIMACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LA TORTA DE FILTRACIÓN USANDO MEDICIONES DEL ÁNGULO FOTOMÉTRICO. (Bachmann, C., Richel V., Sorrentino, J. A.)<sup>(9)</sup>**

En el trabajo realizado por Bachmann et. al., se utilizó la técnica de fotometría para determinar propiedades de las partículas, realizando pruebas en un equipo diseñado para medir el ángulo de incidencia de un láser que pasa a través de una suspensión. Se estudiaron dos tipos de sustancias, una de partículas irregulares (carbonato de calcio) y otra de partículas esféricas (esferas de vidrio).

Las experiencias realizadas en este trabajo, permitieron determinar propiedades de las partículas de  $\text{CaCO}_3$  y esferas de vidrio, tales como el factor de forma ( $\psi_{SV}$ ), la superficie específica ( $S_V$ ) y el coeficiente de forma ( $\alpha_{SV}$ ). A partir de estar características de las partículas y del tamaño promedio de las mismas ( $D_{3,2}$ ), se pudo estimar propiedades de la torta, dadas por la relación permeabilidad-porosidad.

### **5.8. POROSIDAD Y CURVA DE PRESIÓN CAPILAR DE MEZCLAS DE DIFERENTE GRANULOMETRÍA. (López, M., Pérez, O.)<sup>(12)</sup>**

El trabajo presentado por López y Pérez, 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 tamaños de partículas y la curva de presión capilar. Así mismo se emplea el modelo propuesto por Yu y Standish 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.

Para el desarrollo de esta investigación se utilizaron mezclas de carbonato de calcio con diferentes granulometrías.

En cuanto a los análisis de porosidad, López y Pérez realizaron importantes avances. Encontraron que existe una marcada diferencia entre la porosidad obtenida en lechos de partículas homogéneas y el lecho de partículas segregadas. Al utilizar el modelo de Yu-Standish comprobaron que el mismo permite predecir con éxito la porosidad de las mezclas a partir de fracciones estrechas, aunque a mezclas muy estrechas está limitada por el hecho de que las mezclas consideradas como “monotamaño”, tienen en realidad una cierta distribución de tamaños que influye en la estimación de los parámetros del modelo. 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.

## 6. DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS

---

Durante el desarrollo de este trabajo se utilizaron diversos equipos; el principal, es el Filtratest-UCV en el cual se llevan a cabo las experiencias de permeación. Otros equipos involucrados en las pruebas experimentales son: el divisor de muestras PT1000, la balanza con desecador infrarrojo y el micrómetro. Para el análisis de las muestras utilizadas en las pruebas de filtración, se utiliza el equipo mastersizer 2000.

### 6.1. FILTRATEST – UCV

El equipo de filtración Filtratest-UCV ilustrado en las figuras N°14 y N°15, se utiliza para realizar las pruebas de formación de torta y permeabilidad. Consta principalmente de un cilindro de filtración a presión (c), que tiene una celda transportable (f); un conjunto de cinco rotámetros (r) de diferentes escalas de medición; dos manómetros ( $m_1$ ,  $m_2$ ); válvulas que permiten el paso del fluido; tuberías y mangueras de conexión.

En este equipo de filtración el cilindro de filtración (c), está conectado a un sistema de aire comprimido en su parte lateral superior, por medio del cual se produce la diferencia de presión necesaria para realizar 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 ( $v_1$ ). El caudal de aire es alimentado a través de la válvula ( $v_2$ ), y puede ser medido en diferentes rangos por el conjunto de rotámetros. La presión de filtración de la celda se determina a través de dos manómetros cuyos rangos de medición son de 0 a 1000 mbar y de 0 a 10 bar respectivamente.

El conjunto descrito, comprende también una balanza (g) que permite pesar el líquido filtrado durante las pruebas, y una computadora (h) conectada al conjunto de rotámetros y a la balanza, en la que pueden registrarse los datos suministrados por estos equipos mediante programas instalados (BalanceLink V.2.2).

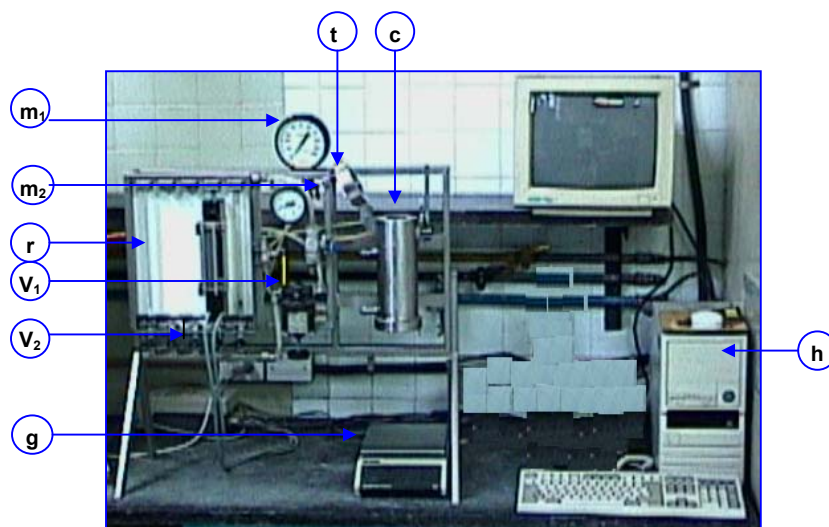


Figura N°14: Filtratest-UCV

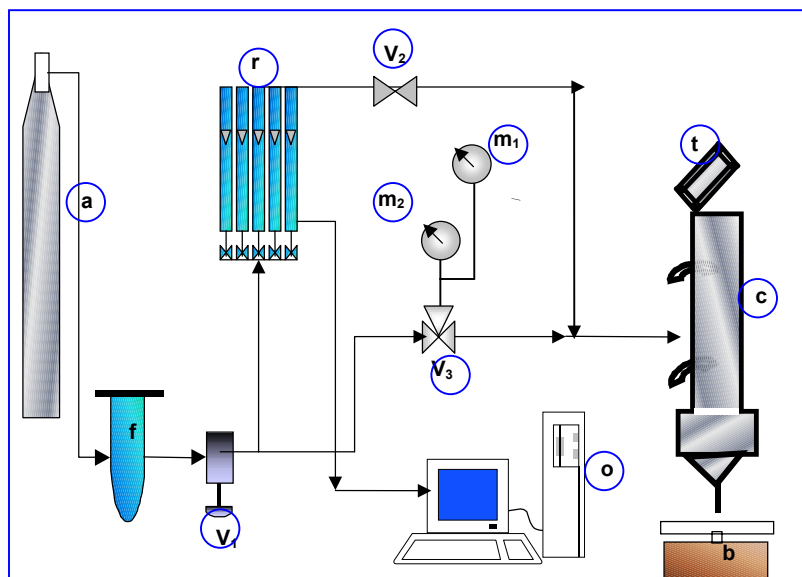


Figura N°15: Diagrama del Filtratest-UCV

La celda de filtración es de acero inoxidable (c), tiene forma cilíndrica y está dispuesta verticalmente; en la parte superior tiene un tapa hermética (t), con un vidrio que permite observar el interior. Tiene una capacidad de 400 ml y un área de filtración de  $19,63 \text{ cm}^2$ ; en este cilindro pueden realizarse pruebas con tortas de hasta 50 mm de espesor. La celda está diseñada de doble pared con la finalidad de trabajar a temperaturas menores de  $120^\circ\text{C}$ , La parte interior de la celda empalma a un soporte móvil ( $e_1$ ), en el que se apoyan, el anillo ( $f_1$ ) donde se forma la torta, una empackadura ( $d_1$ ), el medio filtrante ( $c_1$ ), un plato perforado ( $b_1$ ) que sirve de soporte al medio filtrante y un embudo ( $a_1$ ) por donde sale el filtrado. Como herramienta auxiliar, se dispone de una llave para el desarme de las piezas ( $g_1$ ). En la figura N°16 se ilustra este conjunto de piezas que complementan la celda.

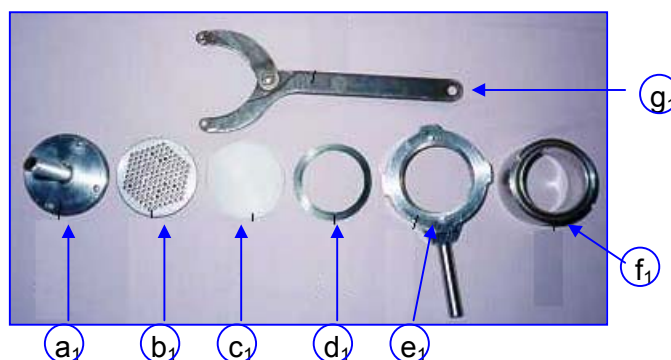


Figura N°16: Sistema de piezas de la Celda del Filtratest-UCV

Adicionalmente, se tiene una herramienta auxiliar que es de gran utilidad al momento de extraer del anillo ( $f_1$ ), las tortas formadas durante las pruebas experimentales. Este instrumento, ilustrado en la Figura N°17, consiste de un tornillo sin fin ( $j$ ), que permite el desplazamiento de una



plataforma (p) que se encuentra dentro de un cilindro (k). Con esta plataforma, se puede empujar cuidadosamente la torta fuera del anillo.

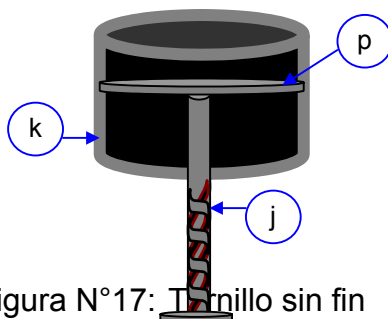


Figura N°17: Tornillo sin fin

## 6.2. BALANZA CON DESECADOR INFRAROJO

Este equipo, ilustrado en la figura N°18, está integrado por una balanza digital (a) en la que se pesan las tortas; una base donde se coloca la torta a secar y pesar (b) y un secador (c) en donde se elimina la humedad remanente en las tortas obtenidas durante la experiencia.

El secador está protegido por una carcasa que impide el paso de aire durante el secado, y también posee una pantalla digital que muestra el desarrollo del secado porcentualmente.

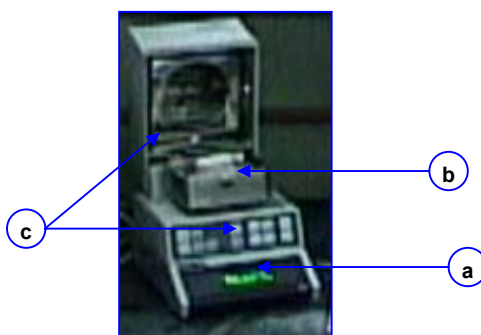


Figura N°18: Balanza con desecador infrarrojo

### 6.3. MICRÓMETRO

El micrómetro, ilustrado en la figura N°19, es el instrumento utilizado para medir la altura de la torta obtenida durante las experiencias de filtración. Este dispositivo consta de un indicador analógico (a) donde se lee en milímetros con una apreciación de  $\pm 0,01$  mm la medida tomada; también, cuenta con un soporte (b) en el que se apoya el objeto a ser medido, y un vástago móvil (c), que se manipula para colocar el objeto en el lugar deseado para tomar la medida.

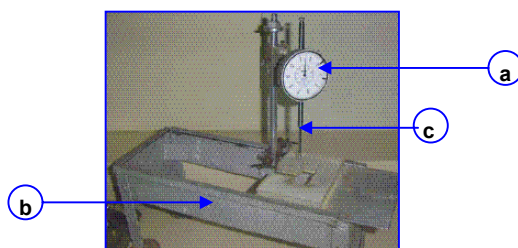


Figura N°19: Micrómetro

### 6.4. DIVISOR DE MUESTRAS

El divisor de muestras PT1000, ilustrado en la figura N°20, permite obtener muestras homogéneas de la mezcla con la cual se realizará la prueba de filtración, dividiéndola cuantitativa y cualitativamente en ocho porciones.

El equipo está constituido por un embudo de alimentación (a) por el cual se introduce la muestra que va a ser dividida; un dosificador (b) que regula la velocidad de entrada a la corona divisora; una corona divisora (c) que gira a 800 rpm que cumple con la función de dividir la muestra. Las

muestras obtenidas, se depositan en los envases recolectores (d) que son recipientes de vidrio de 60 y 250 ml.

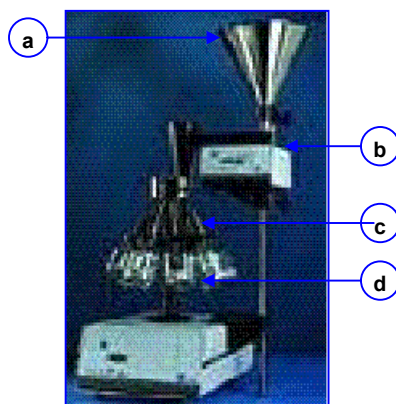


Figura N°20: Divisor de Muestras PT 1000

## 6.5. MASTERSIZER 2000

El mastersizer 2000, se muestra en la figura N°21. Es un equipo que basado en el principio de difracción láser, analiza partículas que se encuentren en el rango comprendido entre 0.2 y 2000  $\mu\text{m}$



Figura N°21: Mastersizer 2000

El equipo está constituido por tres secciones: la unidad óptica, la computadora y la unidad de dispersión.

- La unidad óptica: tiene como función generar y recolectar la información necesaria para el análisis y la medición del tamaño de las partículas.
- Accesorio de dispersión: su objetivo es preparar la muestra y posteriormente llevarla a la unidad óptica para ser medida. Está constituida por protector para el área de la celda (a) que se usa para prevenir que partículas de polvo o sucio contaminen la celda; una ventana de protección (b) que impide que se deterioren los detectores internos, un drenaje (c); una celda de tipo húmeda (d), un indicador de poder (e); y la terminación del panel (f) que contiene todas las salidas digitales de la unidad óptica. Esta unidad se muestra en la figura N°22.
- Computadora: tiene un software especial instalado que cumple dos funciones principales: controlar el sistema durante la medición y procesar la información para producir la distribución de tamaño de partículas.

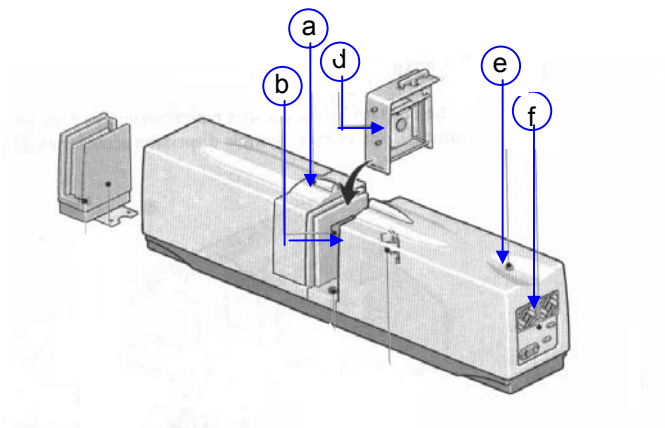


Figura N°22: Unidad de Dispersión

## 7. METODOLOGIA

---

Con el propósito de evaluar el efecto de la estructura de la torta sobre la permeabilidad y porosidad de la misma, en este trabajo de investigación se ha planteado estudiar tortas producidas por tres mecanismos diferentes, que permitan generar condiciones de homogeneidad y segregación de acuerdo al modo cómo se ordenen las partículas formar el lecho.

La metodología establecida para llevar a cabo este estudio, consta de tres etapas, la selección de mezclas, las pruebas de filtración y el análisis de resultados.

### 7.1. SELECCIÓN DE MEZCLAS

Los criterios utilizados para seleccionar las mezclas de trabajo, están relacionados con las características de las partículas, específicamente con su forma y su distribución de tamaño.

En cuanto a la forma, se requería utilizar sustancias que tuvieran partículas de forma esférica ya que, el modelo de permeabilidad aplicado para este estudio (modelo de Karman-Cozeny), está planteado precisamente para partículas esféricas, por esta razón se trabajó con esferas de vidrio. Sin embargo, los avances realizados en el LSM-UCV relacionados con el estudio de las características de la torta, han sido enfocados a involucrar el efecto de la forma de las partículas, motivo por el cual, se utilizó carbonato de calcio cuyas partículas no tienen una forma geométrica definida sino que son irregulares.

Con relación a la distribución de tamaño de partículas (DTP), se realizaron análisis de granulometría en el equipo de difracción láser,

mastersizer 2000, a diferentes muestras de  $\text{CaCO}_3$  y esferas de vidrio disponibles en el LSM-UCV. Según el tamaño promedio de partículas ( $D_{3,2}$ ), se seleccionaron mezclas que estuvieran dentro de un rango 5 a 100  $\mu\text{m}$

## **7.2. PRUEBAS DE FILTRACIÓN**

Las pruebas de filtración se realizaron en el equipo Filtratest-UCV siguiendo el método de permeación de torta descrito en la sección (4.5.3), por lo tanto, se formaron tortas de tres alturas diferentes y en cada caso se hizo circular un volumen determinado de líquido claro (sin sólido). Para asegurar que las tortas de diferentes tamaños preparadas con una mezcla dada tuvieran la misma distribución de partículas, se hizo pasar la totalidad de la mezcla por el divisor de muestras PT 1000.

A una diferencia de presión constante ( $\Delta P$ ) aplicada gracias al paso del aire en la celda del Filtratest, se filtró el líquido a través de la torta, Para determinar este caudal de filtrado. se utilizó el programa BalanceLink instalado en la computadora del Filtratest, en el cual se recogieron los datos de tiempo de filtración y masa de filtrado. Posterior a la filtración, se midió en el micrómetro la altura de la torta obtenida, y luego en la balanza con desecador infrarrojo se retiró la humedad de la torta mediante secado para finalmente determinar su masa.

Las tortas de filtración fueron formadas mediante los mecanismos de sedimentación y por capas, para promover condiciones de segregación y homogeneidad respectivamente. Para formar las tortas por sedimentación, primero se colocó la muestra seca dentro de la celda del Filtratest y luego se agregó el líquido de filtrado (agua saturada), esta mezcla sólido-líquido fue levemente agitada para asegurar que todas las partículas quedaran en suspensión. Finalmente se espero a que todas las partículas sedimentaran para formar el lecho. Con este mecanismo de sedimentación, obtuvo tortas segregadas denominadas lechos de empaque suelto (poured packing)

La condición de homogeneidad se logró al formar las tortas por capas en el anillo del Filtratest (ver sección 6.1), antes de ser introducido dentro de la celda del equipo. Para ello, se dividió la muestra en porciones iguales utilizando el divisor de muestras PT1000; cada porción se dispuso dentro del anillo, al cual se le agregó previamente cierta cantidad de líquido. Al ir depositando cada capa, se aplicó una vibración moderada para ayudar a reacomodar las partículas en el lecho obteniéndose así un empaque denso (dense packing).

Para verificar las condiciones de segregación y homogeneidad, se rebanaron algunas tortas preparadas por los dos mecanismos de formación (sedimentación y capas). Estas rebanadas, de aproximadamente cuatro milímetros, se obtuvieron utilizando la herramienta auxiliar descrita en la sección (6.1), con la cual se puede extraer lentamente la torta del anillo. Finalmente, a cada una de estas porciones de torta se les determinó la distribución de tamaño de partículas (DTP).

### **7.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Los resultados obtenidos de las pruebas experimentales, fueron evaluados a través del diagrama permeabilidad-porosidad desarrollado en los trabajos realizados en el LSM-UCV, cuyo eje “y” representa las propiedades la torta (grupo  $K \cdot C \cdot \phi(\varepsilon)$ ), mientras que en el eje “x” se indica el tamaño de las partículas ( $D_{3,2}$ ).

.Adicional al modelo de Carman-Kozeny empleado normalmente en el diagrama permeabilidad–porosidad, se utilizaron los modelos de permeabilidad descritos en la sección (4.6), para evaluar el grupo ( $K \cdot C \cdot \phi(\varepsilon)$ ).

En la estimación de la porosidad, se aplicó el modelo de Yu-Standish descrito en la sección (4.7).

## 8. *PLAN DE EXPERIENCIAS*

---

Las experiencias realizadas para lograr los objetivos planteados en este trabajo, pueden clasificarse en tres etapas las pruebas exploratorias, la selección de las muestras de trabajo, y las pruebas de filtración.

### 8.1. SELECCIÓN DE MEZCLAS

Para seleccionar las mezclas de trabajo, fue necesario realizar los análisis de granulometría a una serie de muestras las muestras de diferentes fracciones de carbonato de calcio y mezclas de esferas de vidrio disponibles en el LSM-UCV. Para ello, primero se pasaron estas muestras a través del divisor de muestras PT1000, esto se hizo con el fin de homogeneizar las mezclas y asegurar así que cada porción tomada para realizar los análisis fuera realmente representativa de su respectiva mezcla.

Los análisis de granulometría, se realizaron siguiendo el procedimiento descrito en el manual del mastersizer 2000<sup>(15)</sup>, utilizando el software Malver instalado en la computadora del equipo. Los datos reportados por este programa permiten entre otras propiedades, conocer el tamaño promedio de las mismas ( $D_{3,2}$ ) y la distribución de tamaño de partícula, con la cual se puede determinar la desviación estándar de la misma ( $\sigma$ ), dato que indica que tan amplia o estrecha es una mezcla.

Siguiendo los criterios de selección expuestos en la sección (7.1), se tomaron cinco fracciones de carbonato de calcio y tres mezclas de esferas de vidrio, cuyas propiedades de tamaño promedio (diámetro superficie-volumen  $D_{3,2}$ ) y desviación ( $\sigma$ ) se reportan en la tabla N°7.



Tabla N°7: Mezclas de trabajo seleccionadas

Material	Nombre de la muestra	Diámetro superficie-volumen $D_{3,2}$ ( $\mu\text{m}$ )	Desviación Estándar $\sigma$ ( $\mu\text{m}$ )
Carbonato de Calcio ( $\text{CaCO}_3$ )	C-9000	6,73	1,34
	C-4500	14,19	1,45
	C-3000	26,31	1,45
	C-45-53	56,74	1,31
	C-75-90	94,46	1,29
Esferas de Vidrio	V- 40-70	55,67	1,38
	V-63	67.51	1.30
	V- 70-110	76,33	1,31

## 8.2. PRUEBAS EXPLORATORIAS

Se realizaron pruebas de filtración en el equipo Filtratest-UCV con la finalidad de desarrollar destreza en la operación del equipo. De igual forma, se realizaron algunas experiencias con carbonato calcio y esferas de vidrio para determinar las condiciones de operación óptimas para trabajar con cada material, tales como el tipo de medio filtrante a emplear y diferencia de presión a aplicar

## 8.3. PRUEBAS DE PERMEABILIDAD

Las pruebas de Filtración se realizaron en el equipo Filtratest-UCV, utilizando las mezclas seleccionadas. Siguiendo la metodología planteada en la sección (7.2), se realizaron experiencias con cada mezcla formando tortas homogéneas y segregadas.

Para cada experiencia de permeabilidad, se requiere obtener lechos de al menos tres alturas diferentes, para ello, en el divisor de muestras

PT1000, se fraccionó el total de la mezcla de trabajo en 8 lotes, con 1 lote se formó la torta de altura  $h_{C1}$ , con 2 lotes se obtuvo la torta  $h_{C2}$  y finalmente 3 lotes fueron utilizados para formar la torta  $h_{C3}$ .

Adicional a las pruebas con tortas de tres alturas diferentes, se realizó una prueba con una pequeña capa de partículas cuyo espesor fue aproximadamente de 1 milímetro ( $h_{C0}$ ), para mejorar el ajuste de la recta que permite determinar la resistencia específica de la torta ( $r_C$ ), (ver sección 4.5.3).

Para estimar el valor de la resistencia ofrecida por el medio filtrante, ( $R_M$ ), se realizaron experiencias con el medio filtrante sucio pero sin torta ( $h_C=0$ ).

El esquema de pruebas realizadas con cada mezcla para determinar la permeabilidad se presenta en la tabla N°8.

**Tabla N°8: Esquema de pruebas de permeabilidad**

Prueba N°	Nombre de la muestra	Mecanismo de Formación de Torta	Altura de la Torta
1	C-9000	Sedimentada	0
2			$h_{C0}$
3			$h_{C1}$
4			$h_{C2}$
5			$h_{C3}$
6		Por Capas	0
7			$h_{C0}$
8			$h_{C1}$
9			$h_{C2}$
10			$h_{C3}$
11	C-4500	Sedimentada	0
12			$h_{C0}$
13			$h_{C1}$
14			$h_{C2}$
15			$h_{C3}$

Tabla N°8: Esquema de pruebas de permeabilidad (cont.)

Prueba N°	Nombre de la muestra	Mecanismo de Formación de Torta	Altura de la Torta
16	C-4500	Por Capas	0
17			$h_{C0}$
18			$h_{C1}$
19			$h_{C2}$
20			$h_{C3}$
21	C-3000	Sedimentada	0
22			$h_{C0}$
23			$h_{C1}$
24			$h_{C2}$
25			$h_{C3}$
26		Por Capas	0
27			$h_{C0}$
28			$h_{C1}$
29			$h_{C2}$
30			$h_{C3}$
31	C-45-53	Sedimentada	0
32			$h_{C0}$
33			$h_{C1}$
34			$h_{C2}$
35			$h_{C3}$
36		Por Capas	0
37			$h_{C0}$
38			$h_{C1}$
39			$h_{C2}$
40			$h_{C3}$
41	C-75-90	Sedimentada	0
42			$h_{C0}$
43			$h_{C1}$
44			$h_{C2}$
45			$h_{C3}$
46		Por Capas	0
47			$h_{C0}$
48			$h_{C1}$
49			$h_{C2}$
50			$h_{C3}$

Tabla N°8: Esquema de pruebas de permeabilidad (cont.)

Prueba N°	Nombre de la muestra	Mecanismo de Formación de Torta	Altura de la Torta
51	V-40-70	Sedimentada	0
52			$h_{C0}$
53			$h_{C1}$
54			$h_{C2}$
55			$h_{C3}$
56		Por Capas	0
57			$h_{C0}$
58			$h_{C1}$
59			$h_{C2}$
60			$h_{C3}$
61	V-63	Sedimentada	0
62			$h_{C0}$
63			$h_{C1}$
64			$h_{C2}$
65			$h_{C3}$
66		Por Capas	0
67			$h_{C0}$
68			$h_{C1}$
69			$h_{C2}$
70			$h_{C3}$
71	V-70-110	Sedimentada	0
72			$h_{C0}$
73			$h_{C1}$
74			$h_{C2}$
75			$h_{C3}$
76		Por Capas	0
77			$h_{C0}$
78			$h_{C1}$
79			$h_{C2}$
80			$h_{C3}$

## 9. ANALISIS DE DATOS

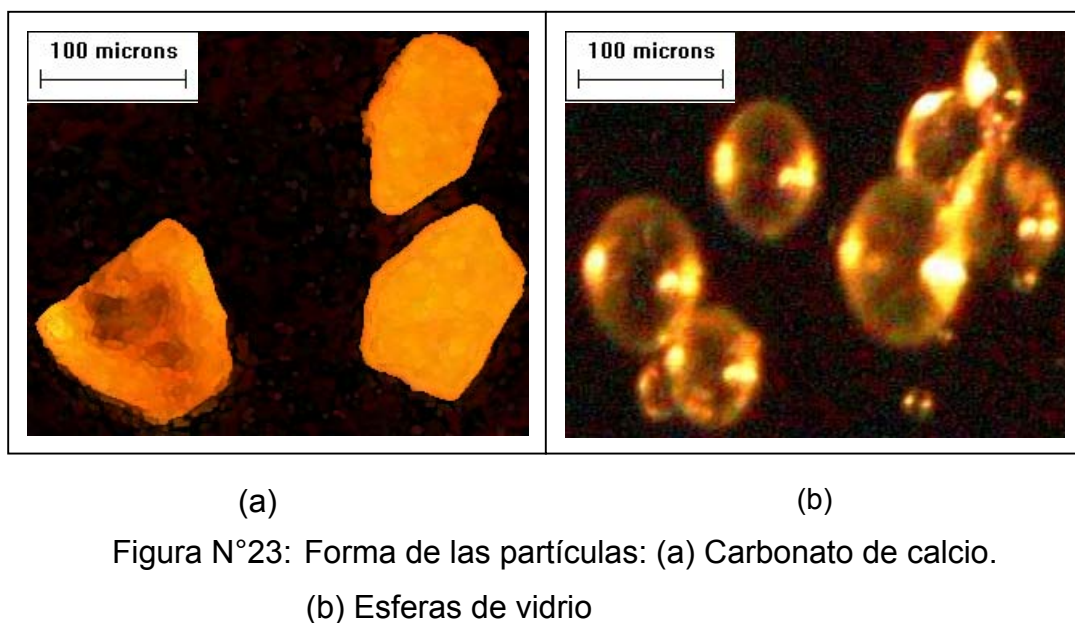
---

Con el fin de establecer la confianza y validez de los resultados obtenidos en este trabajo, se lleva a cabo un análisis de los datos producidos durante las pruebas experimentales.

### 9.1. SELECCIÓN DE MEZCLAS

La selección de las mezclas de trabajo, se realizó siguiendo dos criterios, la forma de las partículas y el tamaño promedio de las mismas.

Con relación a la forma de las partículas, se seleccionaron dos sustancias, una con partículas de forma esféricas (esferas de vidrio) y otra con partículas irregulares (carbonato de calcio). En la figura N°23, se presenta una ilustración de las partículas de ambas sustancias, en la que se evidencia claramente la forma esférica de las partículas de vidrio y la forma irregular de las partículas del carbonato.



Basados en los resultados de Fajardo y Ravelo<sup>(10)</sup> que confirman que tanto mezclas amplias como estrechas pueden ser analizadas con el diagrama permeabilidad – porosidad introducido por Sorrentino<sup>(22)</sup>, se decidió trabajar solamente con fracciones estrechas para el análisis del efecto de la estructura de la torta realizadas en este trabajo.

Para seleccionar las mezclas de trabajo, se realizaron análisis de granulometría, en el equipo mastersizer 2000, a diferentes fracciones de carbonato de calcio y de esferas de vidrio. Cada mezcla antes de ser analizada, se hizo pasar a través del divisor de muestras PT1000, para garantizar que la porción de partículas tomada al hacer los análisis fuera representativa del total de la mezcla.

Los resultados de distribución de tamaño de partículas (DTP), de las mezclas de carbonato de calcio y esferas de vidrio seleccionadas se presentan como distribución de frecuencia acumulada ( $F(x)$ ), en las figuras N°24 y N°25 respectivamente. En las tablas N°15 y N°16 del apéndice B-1, se muestran las características obtenidas en el análisis granulométrico de las mezclas seleccionadas.

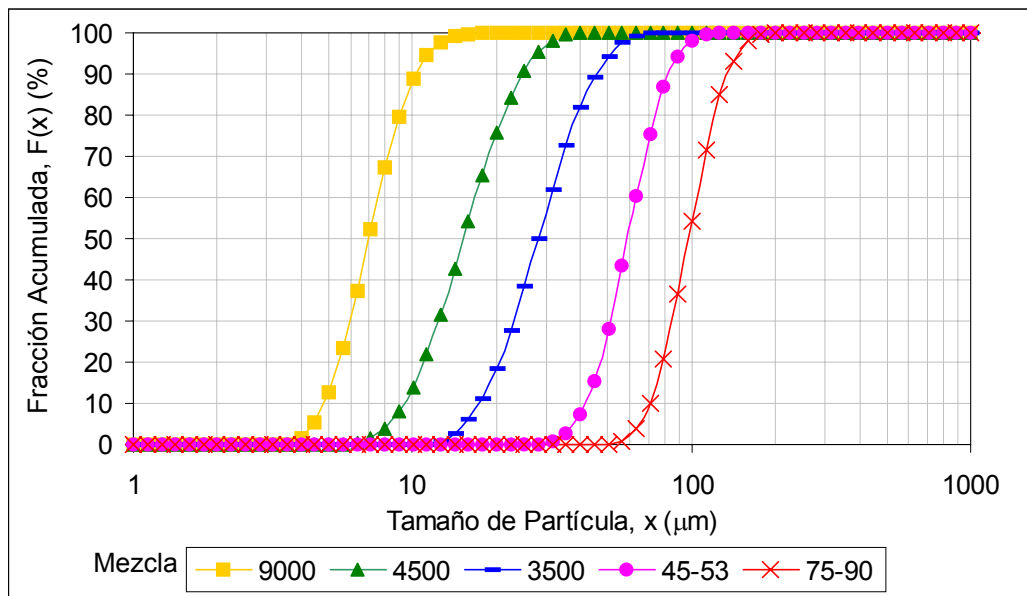


Figura N°24: Distribución de tamaño de partículas de las muestras de carbonato de calcio seleccionadas

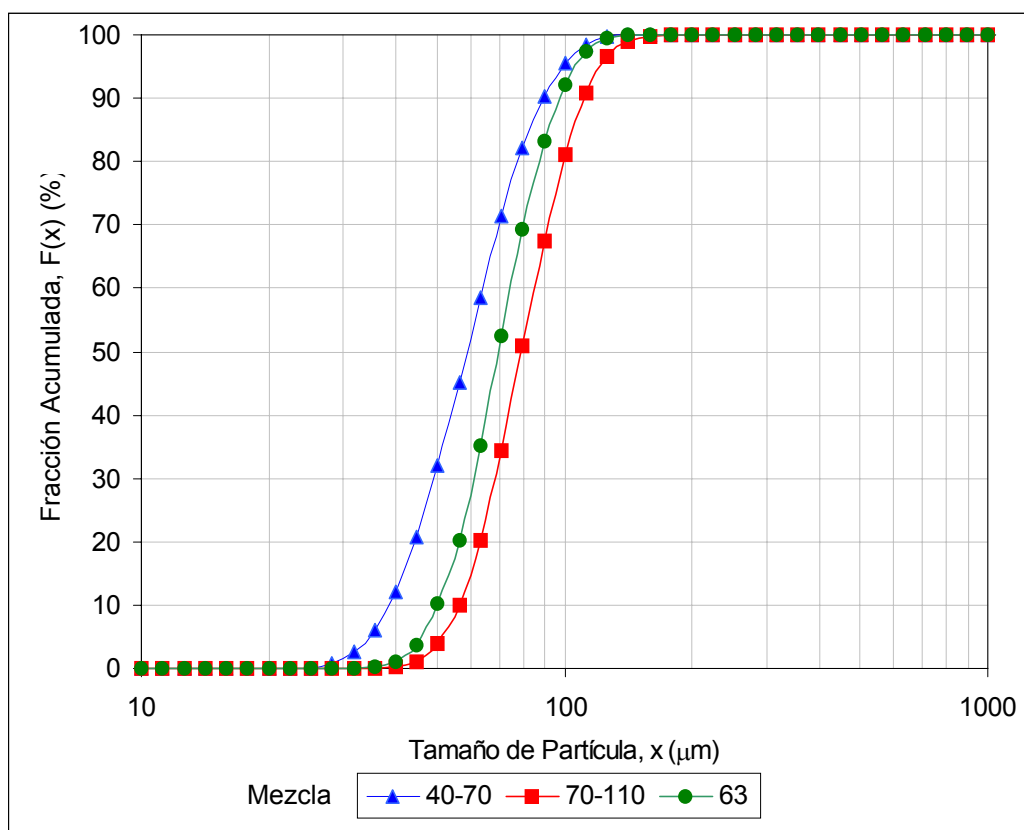


Figura N°25: Distribución de tamaño de partículas de las mezclas de esferas de vidrio seleccionadas

## 9.2. OBTENCIÓN DE LOS DATOS DE PERMEABILIDAD

Para determinar la porosidad y permeabilidad, se utilizó el equipo Filtratest-UCV, detallado en la sección (6.1). Siguiendo el método de permeación que se describe en la sección (4.5.3), se realizaron pruebas con tortas de diferentes alturas, formadas por sedimentación y por capas.

Para producir las tortas por sedimentación se siguió la metodología expuesta en la sección (7.2), se formó dentro de la celda del equipo, una suspensión de baja concentración (10% p/p) y se esperó que las partículas sedimentaran para formar el lecho. Por otra parte, las tortas por capas

fueron formadas depositando una a una las porciones de la muestra; la cantidad de líquido utilizada en cada caso se muestra en la tabla N°20 del apéndice C-1.

Una vez formada la torta, ya sea por el mecanismo de sedimentación o por capas, se hizo circular 100 ml de líquido a través de ella; para determinar su caudal. Se recogieron con el programa Balancelink del Filtratec, datos de masa de líquido filtrado ( $m_{LF}$ ) en intervalos de un segundo. Estos datos, presentados en las tablas N°23 a la N°31 del anexo C-3, fueron ajustados en una recta cuya pendiente representa el caudal constante de filtrado ( $Q$ ).

Una vez finalizada la permeación, se obtuvo la altura de la torta ( $h_C$ ), para ello, estando aún la torta en el soporte móvil de la celda de filtración, se midió con el micrómetro la altura en cinco puntos diferentes de la torta con el objeto de tomar un promedio de la misma. Posteriormente, la torta es secada y pesada en el desecador infrarrojo para obtener el dato de masa de torta seca ( $m_{TS}$ ), estos datos son presentados en las tablas N°21 y N°22 del anexo C-2.

Finalmente, la permeabilidad de la torta se obtuvo al establecer la línea de ajuste del gráfico  $(\Delta P \cdot A_F)(\mu_L Q)$  vs.  $h_C$ , cuya pendiente y punto de corte en el eje de las ordenadas representan la resistencia específica de la torta ( $r_C$ ) y la resistencia del medio filtrante ( $R_M$ ) respectivamente.

Después de cada prueba, el medio filtrante fue lavado y secado para remover todas las partículas que hubieran podido quedar atrapadas dentro de los poros, sin embargo, para optimizar el ajuste de los datos de permeación fue necesario realizar una prueba con el medio sucio ( $h_C=0$ ), es decir, una prueba en la que después de extraer la torta se hace pasar líquido a través del medio filtrante sin ser lavado. Si no se considerara este punto al ajuste de los datos, podría obtenerse valores erróneos e incluso irreales (negativos) de la resistencia del medio ( $R_M$ ), tal como puede observarse en la figura N°26.



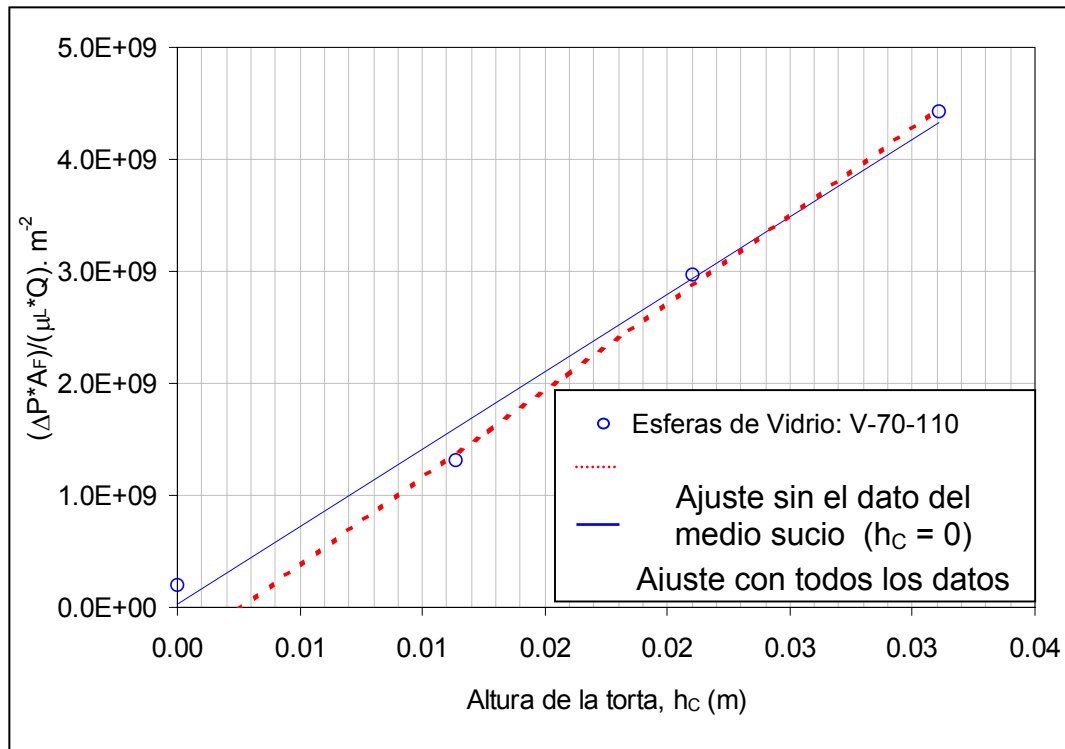


Figura N°26: Ajuste de datos con el punto de altura cero para determinar la resistencia específica de la torta

Aunque el punto obtenido con la prueba del medio sucio, sirve de amarre para evitar valores ilógicos de  $R_M$ , es importante determinar el efecto del medio con la primera capa de torta, ya que, esta primera capa es la que actúa como verdadero medio filtrante para formar la torta<sup>(26)</sup>. Por lo tanto, para mejorar el ajuste de los datos, se incluye una prueba más correspondiente a esta capa delgada (0,1 cm aproximadamente), lo que puede apreciarse en el ejemplo de la figura N°27.

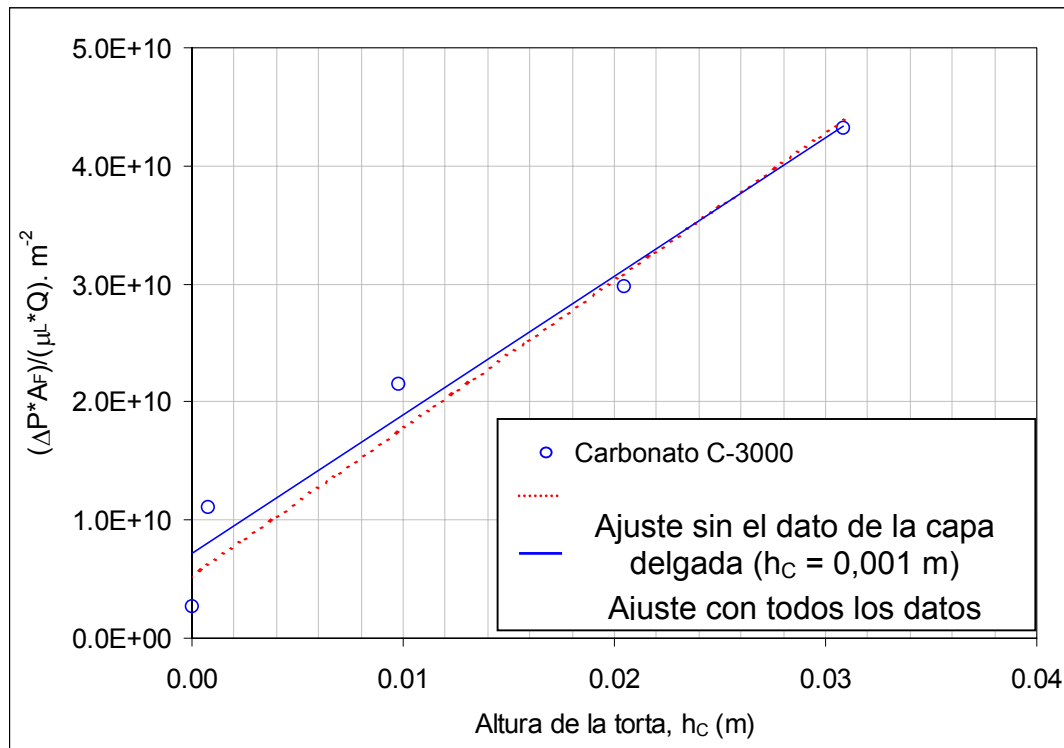


Figura N°27: Ajuste de datos con el punto de capa de 0,1 cm para determinar la resistencia específica de la torta

### 9.3. DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN

Las condiciones óptimas de operación (medio filtrante y diferencia presión aplicada,  $\Delta P$ ) se definieron durante las pruebas exploratorias, realizadas con muestras de carbonato y muestras de esferas de vidrio.

Para determinar la presión de operación, se realizaron pruebas con diferentes presiones y se seleccionaron aquellas para las cuales el caudal de líquido de filtrado a través del lecho fuera constante, es decir, que la gráfica  $V_L$  vs.  $t$ , sea una línea recta, tal como se muestra en la figura N°28. De igual forma, durante las pruebas exploratorias se garantizó la reproducción de los datos.

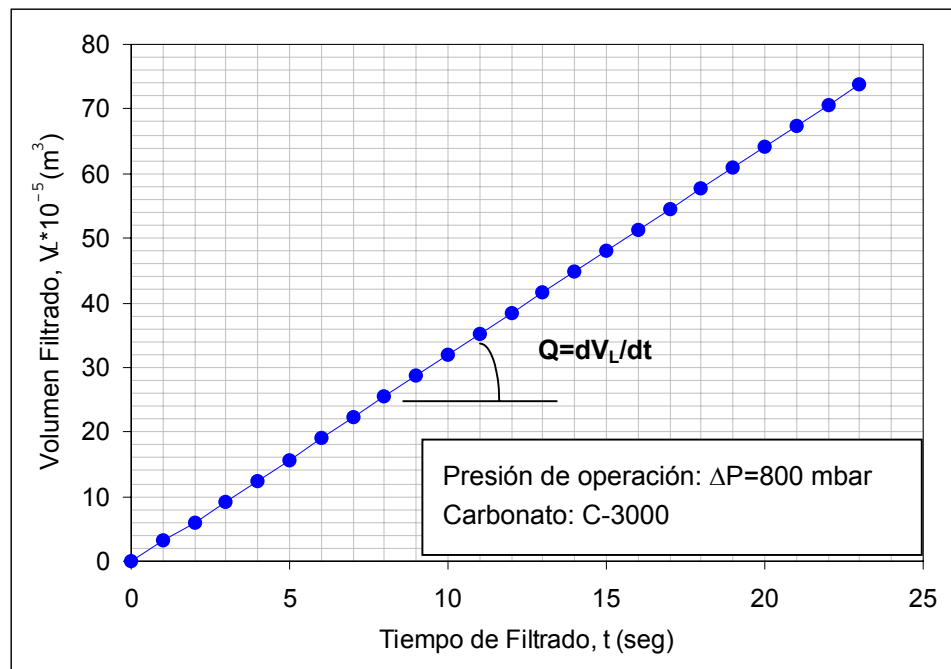


Figura N°28: Caudal de líquido filtrado

Para seleccionar el medio filtrante a utilizar con cada sustancia, se consideró el tamaño de partícula mínimo de trabajo del medio, el cual debe encontrarse por debajo del tamaño mínimo de la granulometría de las mezclas estudiadas. De igual forma, se consideró la resistencia que dicho medio ofrece ( $R_M$ ) no fuera muy elevada, a fin de evitar que la misma tome un valor controlante para el sistema, lo que puede generar gran incertidumbre en la determinación de la resistencia impuesta por la torta.

En la figura N°29, se muestra el gráfico de resistencia para una torta formada con esferas de vidrio, en la que se utilizaron dos medios filtrantes diferentes, el SK-030 y el W-009 (ambos de la Sefar Mesh + Technology). Con este ejemplo, se ilustra claramente que ambas pruebas presentan una tendencia lineal, pero el valor de permeabilidad, que corresponde al recíproco de la pendiente, es diferente, lo cual es incoherente ya que las

partículas son las mismas y por lo tanto la permeabilidad debería ser la misma. Esta diferencia, se debe a la combinación entre la resistencia del medio y la resistencia de la torta, es decir, la resistencia total ( $\Delta P \cdot A_F / \mu_L \cdot Q$ ).

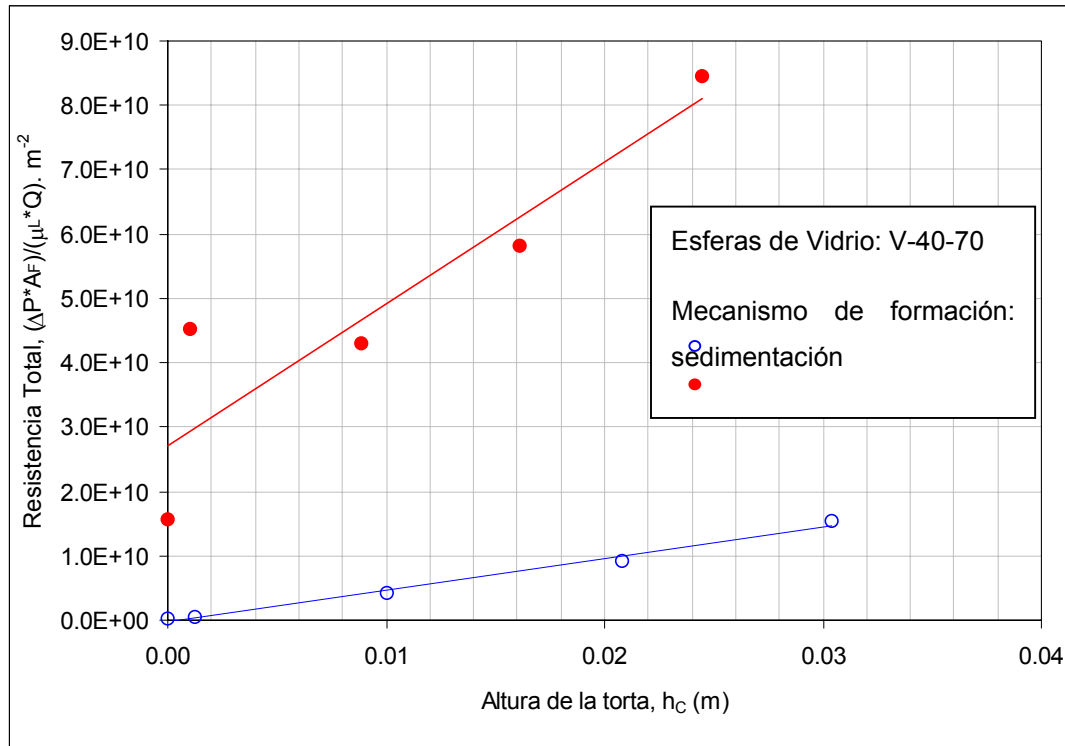


Figura N°29: Efecto de la resistencia del medio sobre la determinación de la permeabilidad.

Finalmente, puedo seleccionarse el medio filtrante adecuado para realizar las pruebas con cada sustancia utilizada en este trabajo. De igual forma se determinó la presión de operación adecuada para cada mezcla de trabajo.

En la tabla N°9 se muestran las condiciones de operación empleadas para cada mezcla, es decir, el medio filtrante utilizado y la presión aplicada mediante el flujo de aire que se hace pasar a través de la celda del Filtratest.

Tabla N°9: Condiciones de operación

Material	Nombre de la Mezcla	Presión de Operación (mbar)	Medio Filtrante
Carbonato	C-9000	800	W-009
	C-4500	800	
	C-3500	500	
	C-45-53	300	
	C-70-90	300	
Esferas de Vidrio	V-40-70	100	SK-030
	V-63	100	
	V-70-110	100	

#### 9.4. PREPARACIÓN DE LA TORTA

Para estudiar el efecto de la estructura de torta sobre su permeabilidad y porosidad, se realizaron pruebas formando la torta mediante dos mecanismos, el de sedimentación, con el cual se obtuvieron tortas segregadas y por capas para obtener tortas homogéneas.

El propósito de formar las tortas por el mecanismo de sedimentación, es permitir que las partículas puedan moverse libremente en la suspensión sólido-líquido formada, para luego ir sedimentando por gravedad y obtener así el lecho.

Como era de esperarse, con este mecanismo, las partículas más gruesas sedimentaron primero que las partículas más finas. Para comprobar esta condición, la torta de 3 cm correspondiente a la mezcla C-3000 formada por sedimentación, estando aún húmeda, fue dividida en ocho rebanadas utilizando para ello el tornillo sin fin descrito en la sección (7.1). Cada corte de torta fue secado en el desecador infrarrojo para luego ser analizada en el equipo de difracción láser mastersizer 2000.

Los cortes fueron enumerados del 1 al 8, siendo el corte N°1 el correspondiente a las partículas que se encontraban en el fondo de la torta, mientras que el corte N°8 corresponde a las partículas del tope de la torta.

Al comparar las curvas de distribución correspondientes a cada porción de torta, (figura N°30), se puede observar que a pesar de que casi todos los cortes presentan una distribución similar, hay una diferencia notable entre los que estaban al fondo de la torta (cortes N°1, 2, 3) y los cortes del tope de la torta (cortes N°7 y N°8), lo que pone en evidencia que la mayor cantidad de las partículas más gruesas se depositaron en el fondo de la torta, mientras que la mayor cantidad de las partículas finas tardaron más en sedimentar. Es de hacer notar, que esto ocurrió a pesar de que la mezcla analizada tiene una distribución de tamaño de partícula no muy amplia.

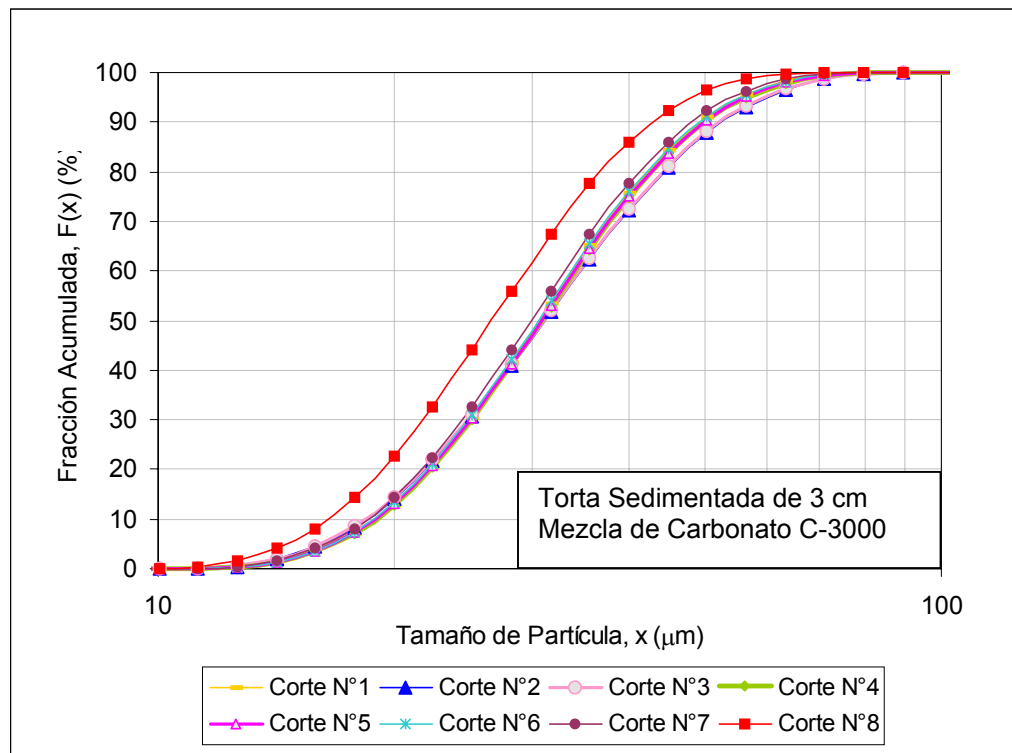


Figura N°30: Distribución acumulada de los cortes obtenidos en la torta de sedimentación

La condición de homogeneidad lograda al formar las tortas por capas siguiendo la metodología descrita en la sección (7.2), fue verificada de igual forma que en el caso de tortas segregadas. Por lo tanto, a una torta de 3 cm formada por capas, se le realizaron ocho cortes, cada uno de los cuales fue analizado en el mastersizer 2000. Las DTP de cada corte, están representadas en la figura N°31.

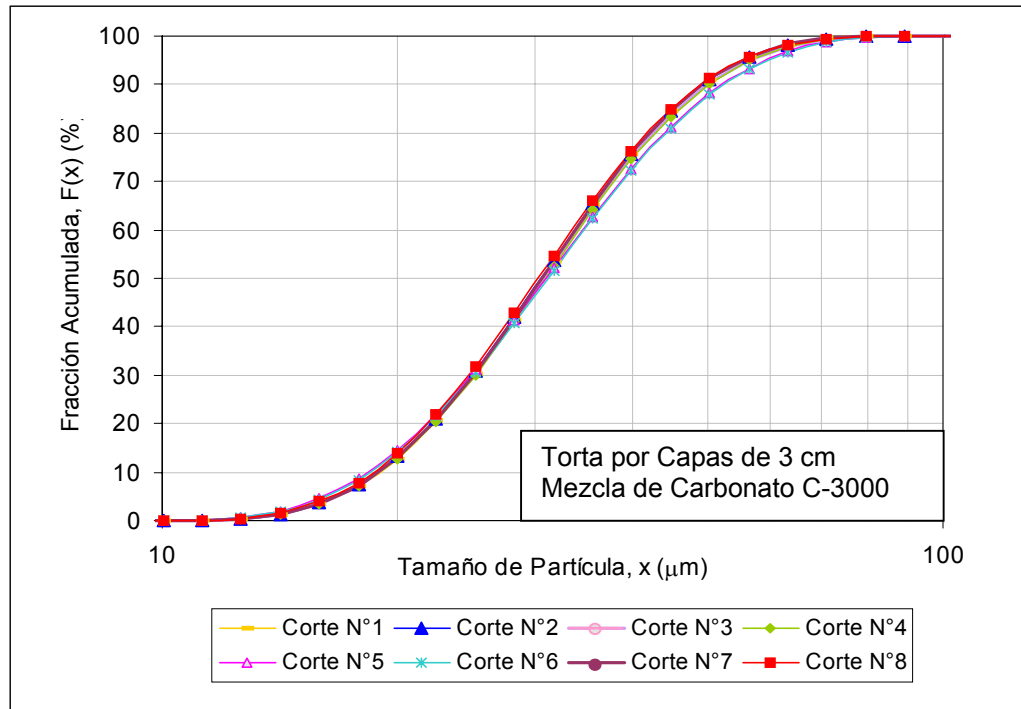


Figura N°31: Distribución acumulada de los cortes obtenidos en la torta formada por capas

Las curvas de distribución correspondientes a los cortes de la torta formada por capas se superponen entre sí, sin que haya mayor desplazamiento entre los primeros y últimos cortes como ocurre en la segregación, lo que indica que las tortas formadas por este mecanismo efectivamente son homogéneas.

En las tablas N°17, y N°18 del apéndice B-2, se presentan las características de las curvas de distribución para cada corte de torta sedimentada y por capas respectivamente.

## 10. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

---

Las propiedades de las tortas obtenidas durante el proceso de filtración, dependen de las características de los sólidos contenidos en la mezcla sólido-líquido a separar. Un modelo que permite correlacionar dichas propiedades con la información del tamaño de las partículas es el planteado por Carman-Kozeny<sup>(7)</sup>, el cual fue obtenido mediante estudios de permeabilidad hechos para partículas regulares de igual tamaño.

Sorrentino y Anlauf<sup>(22)</sup> basados en la ecuación de Carman-Kozeny presentaron el gráfico permeabilidad-porosidad, en el cual, los datos son representados en coordenadas logarítmicas para relacionar las propiedades de la torta, dadas por la permeabilidad ( $K$ ) y la porosidad ( $\varepsilon$ ), con la distribución de tamaño de las partículas.

Según avances realizados recientemente (Sorrentino y Anlauf<sup>(22)</sup>; Barrero y Goncalves<sup>(3)</sup>, Bachmann et. al<sup>(9)</sup>) se demuestra que la permeabilidad de las tortas, no solo es función del tamaño de las partículas como se propone en el modelo original de Carman-Kozeny, sino que también está íntimamente relacionada con su forma.

Los resultados obtenidos en este trabajo, son analizados a través del diagrama permeabilidad-porosidad, con lo cual se pone en evidencia que, además del tamaño y la forma de las partículas, las propiedades de las tortas obtenidas por filtración también dependen de su estructura, en otras palabras, dependen del método de preparación de la torta, tal como se demuestra en la discusión que se expone a continuación.



### **10.1. COMPARACIÓN DE MODELOS DE PERMEABILIDAD**

El comportamiento de sistemas de fluidos en lechos sólidos, ha sido descrito a través diversos modelos, unos basados en el enfoque de arreglos capilares, tales como el de Carman-Kozeny, Rumpf-Gupte y Molerus-Rumpf-Pahl; y otros basados en el enfoque de flujo alrededor de objetos como el de Happel-Brenner.

En los trabajos que se han venido realizando en el LSM-UCV con relación al estudio de propiedades de tortas de filtración, el modelo aplicado ha sido la ecuación de Carman-Kozeny, sin embargo, resulta interesante examinar los otros modelos encontrados en la literatura para verificar, cual predice mejor el comportamiento de las propiedades de las tortas.

Para poder comparar los modelos estudiados en la sección (4.6) y seleccionar el que será aplicado en este trabajo, se utilizó la ecuación general de permeabilidad propuesta por Sorrentino y Anlauf<sup>(23)</sup> (ecuación 4.53), que indica que la permeabilidad ( $K$ ) de un lecho puede relacionarse con su diámetro promedio ( $D_{3,2}$ ) a través de una función de porosidad ( $\phi(\varepsilon)$ ) y una constante propia ( $C$ ) de cada modelo.

Al realizar la simulación de diferentes porosidades de un sistema, puede compararse gráficamente los valores obtenidos del grupo constante - función de porosidad ( $C^*\phi(\varepsilon)$ ) con cada modelo. El rango de porosidad ( $\varepsilon$ ) simulado fue el que usualmente se encuentra en los procesos de filtración industrial<sup>(26)</sup> (aproximadamente entre 0,3 y 0,7). En la tabla N°32 del apéndice D-1, se presentan los valores obtenidos en esta simulación.

En la figura N°32, se observa que los modelos de Carman-Kozeny y Happel-Brenner, aunque tienen dos enfoques diferentes, para describir el flujo que pasa a través de lechos, mantienen la misma tendencia del grupo ( $C^*\phi(\varepsilon)$ ). En este gráfico, también puede verse como se sobreponen los valores de ( $C^*\phi(\varepsilon)$ ) de cada modelo para valores de porosidad cercanos a

0.4; mientras que para porosidades mayores los modelos de Rumpf-Gupte y Molerus-Rumpf-Pahl, se alejan de los valores obtenidos para Carman-Kozeny a pesar de que los tres modelos están basados en arreglos capilares.

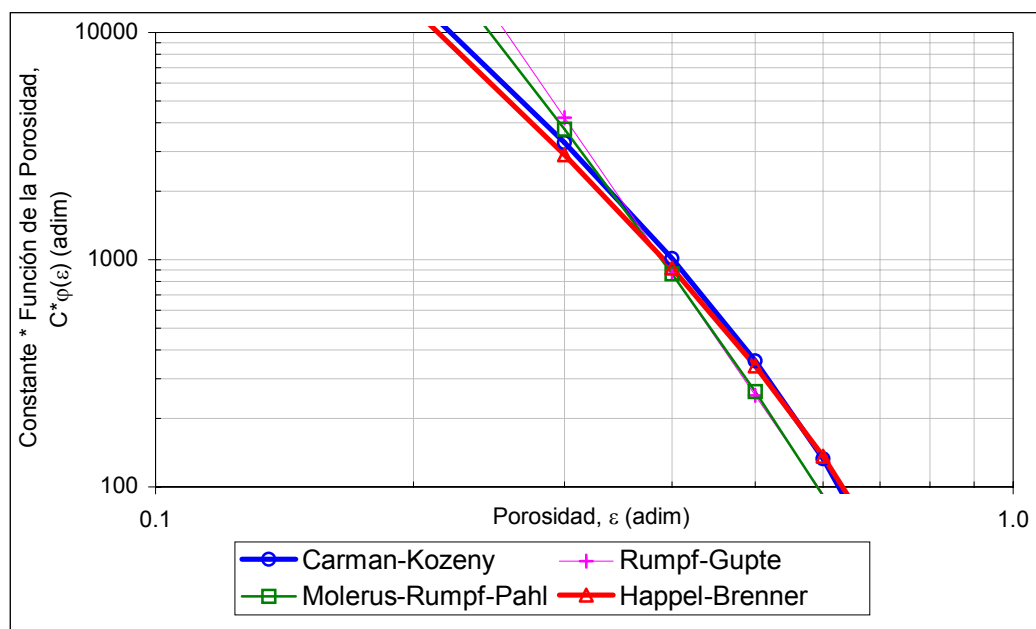


Figura N°32: Comparación de las funciones de porosidad de los modelos de permeabilidad

Al aplicar al diagrama permeabilidad-porosidad las ecuaciones de modelos de Carman-Kozeny, Rumpf-Gupte, Molerus-Rumpf-Pahl y Happel-Brenner, sintetizadas en la tabla N°1<sup>(26)</sup>, se obtienen resultados similares tal como se ilustra en la figura N°33, para el ejemplo particular de tortas de carbonato formadas por sedimentación. Este gráfico indica que, dentro de los rangos y condiciones de trabajo aplicadas este estudio, ambos enfoques de flujo (arreglo capilares y flujo alrededor de objetos), conducen a resultados análogos. Por lo tanto, resulta práctico continuar utilizando el modelo de Carman-Kozeny, pues éste presenta una ecuación sencilla para estudiar el comportamiento de las características de tortas. Otro factor favorable de este modelo, es que la constante (C) de la

ecuación de Carman-Kozeny, puede evaluarse físicamente, a diferencia de los demás modelos estudiados cuyas constantes fueron obtenidas por ajustes de datos empíricos.

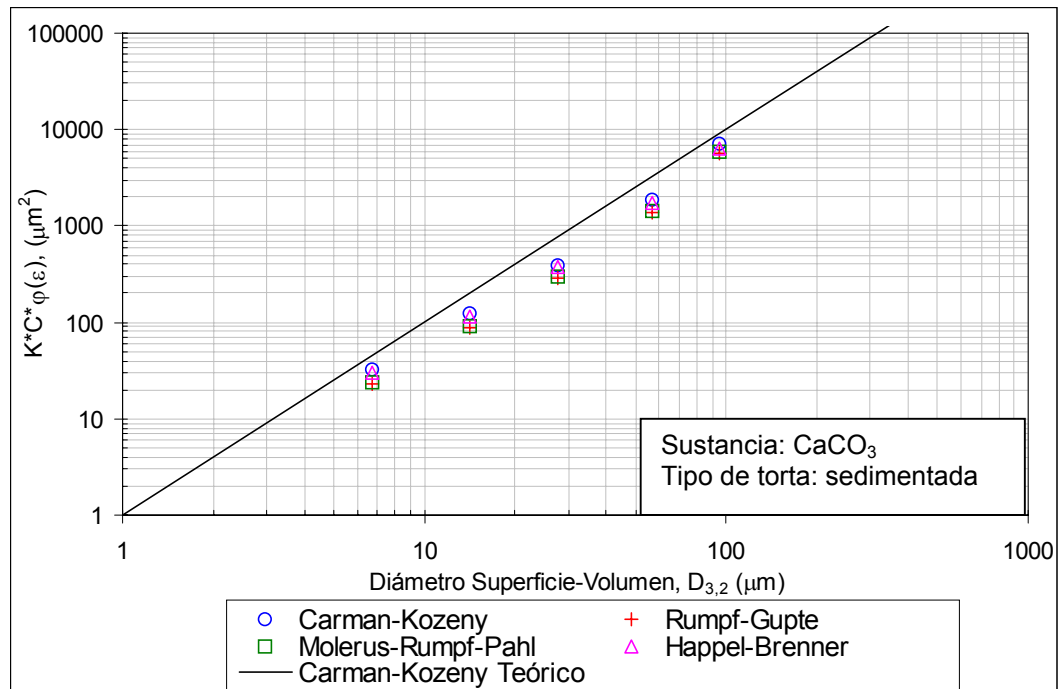


Figura N°33: Comparación de modelos de permeabilidad en el diagrama permeabilidad-porosidad

## 10.2. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE PERMEABILIDAD Y POROSIDAD

Las pruebas de permeabilidad se realizaron en el equipo Filtratest-UCV, siguiendo el método de permeación expuesto en la sección (4.5.3). Los materiales utilizados fueron vidrio, cuyas partículas tienen forma esférica, y carbonato de calcio que tiene partículas con forma irregular. Las tortas de

filtración se formaron procediendo según la metodología descrita en la sección (7.1), para promover condiciones de homogeneidad y segregación.

Para el análisis de los resultados, se consideran tres mecanismos de preparación de torta, dos obtenidos durante las pruebas experimentales realizadas en este trabajo, es decir, el mecanismo de sedimentación, que conduce a tortas segregadas; y la formación de tortas por capas compactas, que conduce a tortas homogéneas de lecho denso. El tercer mecanismo que se incluye en los resultados, es denominado capas sueltas, con el cual también se obtienen tortas homogéneas pero un lecho menos denso que en capas compactas; este mecanismo fue aplicado en el trabajo de Barrero-Goncalves<sup>(3)</sup>, quienes utilizaron diferentes fracciones de carbonato y esferas de vidrio; y por Fajardo-Ravelo<sup>(10)</sup> quienes utilizaron fracciones finas de carbonato.

El mecanismo de capas sueltas, consiste en dividir la muestra en porciones iguales con la ayuda del equipo Divisor PT1000, para luego depositar cuidadosamente cada porción en la celda de filtración, asegurándose así, que en cada punto de la torta exista la misma DTP.

De forma similar al mecanismo de capas sueltas, se procedió para formar las tortas por capas compactas, es decir, las porciones de mezcla obtenidas en el divisor PT1000 se fueron depositando una a una en el anillo de filtración, pero en este caso, al ir colocando cada capa, se aplicó una ligera vibración (golpeando moderadamente el anillo móvil), para ayudar a reacomodar las partículas, obteniéndose así un lecho denso.

La segregación en las tortas fue obtenida mediante el mecanismo de sedimentación, preparando para ello suspensiones de concentración de 20% con cada mezcla y dejándolas sedimentar en forma natural, es decir, sin aplicar ninguna fuerza para promover la deposición de partículas.

En la tabla N°10 se reportan los resultados de porosidad ( $\epsilon$ ) y permeabilidad (K) obtenidos al formar tortas por capas compactas y por sedimentación. De igual forma, se reportan los resultados logrados por

Barrero-Goncalves<sup>(3)</sup> y Fajardo-Ravelo<sup>(10)</sup> con tortas formadas por el mecanismo de capas sueltas.

**Tabla N°10: Resultados de permeabilidad-porosidad para diferentes mecanismos de formación de la torta**

Mecanismo de Formación de Torta	Material	Nombre de la Mezcla	Porosidad $\varepsilon$ (adim)	Permeabilidad K ( $\mu\text{m}^2$ )	K·C· $\phi(\varepsilon)$ ( $\mu\text{m}^2$ )	D <sub>3,2</sub> ( $\mu\text{m}$ )
Sedimentada	Carbonato	C-9000	0,494	0,084	32,00	6,73
		C-4500	0,481	0,282	122,68	14,18
		C-3000	0,475	0,851	394,42	27,71
		C-45-53	0,470	3,802	1857,91	57,07
		C-75-90	0,460	8,697	4672,767	94,46
	Esferas de Vidrio	V- 40-70	0,377	3,400	4437,45	55,74
		V- 40-70 (*)	0,392	0,853	942,35	55,74
		V-63	0,415	9,611	8281,70	67,63
		V- 70-110	0,407	15,463	14528,72	85,76
Por Capas Compactas	Carbonato	C-9000	0,499	0,035	12,61	6,73
		C-4500	0,477	0,108	49,03	14,18
		C-3000	0,471	0,317	152,68	27,71
		C-45-53	0,488	1,910	772,39	57,07
		C-75-90	0,513	6,062	1922,16	94,46
	Esferas de Vidrio	V- 40-70	0,408	2,032	1883,36	55,74
		V-63	0,417	3,833	3179,59	67,63
		V- 70-110	0,430	7,197	5278,74	85,76

(\*) Esta prueba se realizó solamente para determinar el medio filtrante adecuado al llevar a cabo experiencias con esferas de vidrio y se utilizó como medio filtrante el SK009. Los resultados de esta prueba, no están incluidos en el diagrama permeabilidad-porosidad.

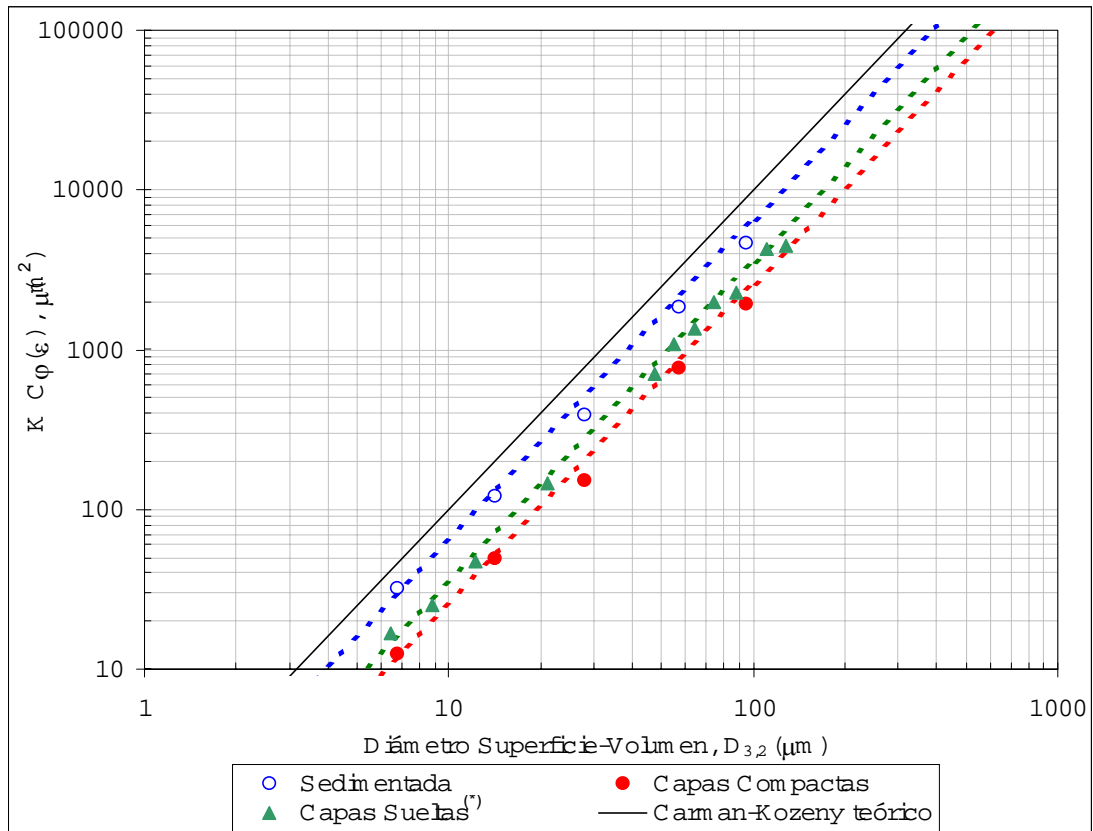
**Tabla N°10: Resultados de permeabilidad-porosidad para diferentes mecanismos de formación de la torta (cont.)**

Mecanismo de Formación de Torta	Material	Nombre de la Mezcla	Porosidad $\varepsilon$ (adim)	Permeabilidad K ( $\mu\text{m}^2$ )	$K \cdot C \cdot \phi(\varepsilon)$ ( $\mu\text{m}^2$ )	$D_{3,2}$ ( $\mu\text{m}$ )
Por Capas Seltas	Carbonato	C-11000 <sup>(**)</sup>	0,473	0,020	9,46	4,65
		C-9000 <sup>(**)</sup>	0,456	0,030	16,87	6,42
		C-7000 <sup>(**)</sup>	0,467	0,050	25,22	8,78
		C-5000 <sup>(**)</sup>	0,474	0,100	46,99	12,23
		C-3000 <sup>(**)</sup>	0,425	0,190	147,23	21,20
		C-38 <sup>(***)</sup>	0,525	2,507	703,62	47,38
		C-45 <sup>(***)</sup>	0,483	2,554	1090,52	54,98
		C-53 <sup>(***)</sup>	0,518	4,526	1361,73	64,03
		C-63 <sup>(***)</sup>	0,496	5,250	1967,20	74,05
		C-75 <sup>(***)</sup>	0,516	7,455	2288,03	88,23
		C-95 <sup>(***)</sup>	0,503	12,236	4274,85	110,71
		C-106 <sup>(***)</sup>	0,519	15,045	4481,80	127,49
	Esferas de Vidrio	V-75-63-75 <sup>(***)</sup>	0,416	7,377	6290,69	70,89
		V-70-110 <sup>(***)</sup>	0,409	10,813	9936,28	85,76
		V-40-70 <sup>(***)</sup>	0,375	2,302	3069,33	55,74
		V-53 <sup>(***)</sup>	0,421	4,653	3762,85	59,32
		V-63 <sup>(***)</sup>	0,431	6,126	4459,05	67,84
		V-75 <sup>(***)</sup>	0,424	8,096	6342,94	81,40
		V-90 <sup>(***)</sup>	0,436	14,328	9898,21	97,66
		V-106 <sup>(***)</sup>	0,421	18,889	15275,39	117,45
		V-125 <sup>(***)</sup>	0,434	31,560	22262,46	146,39

(\*\*) Datos tomados de las pruebas realizadas en el trabajo de Fajardo-Ravelo<sup>(10)</sup>.

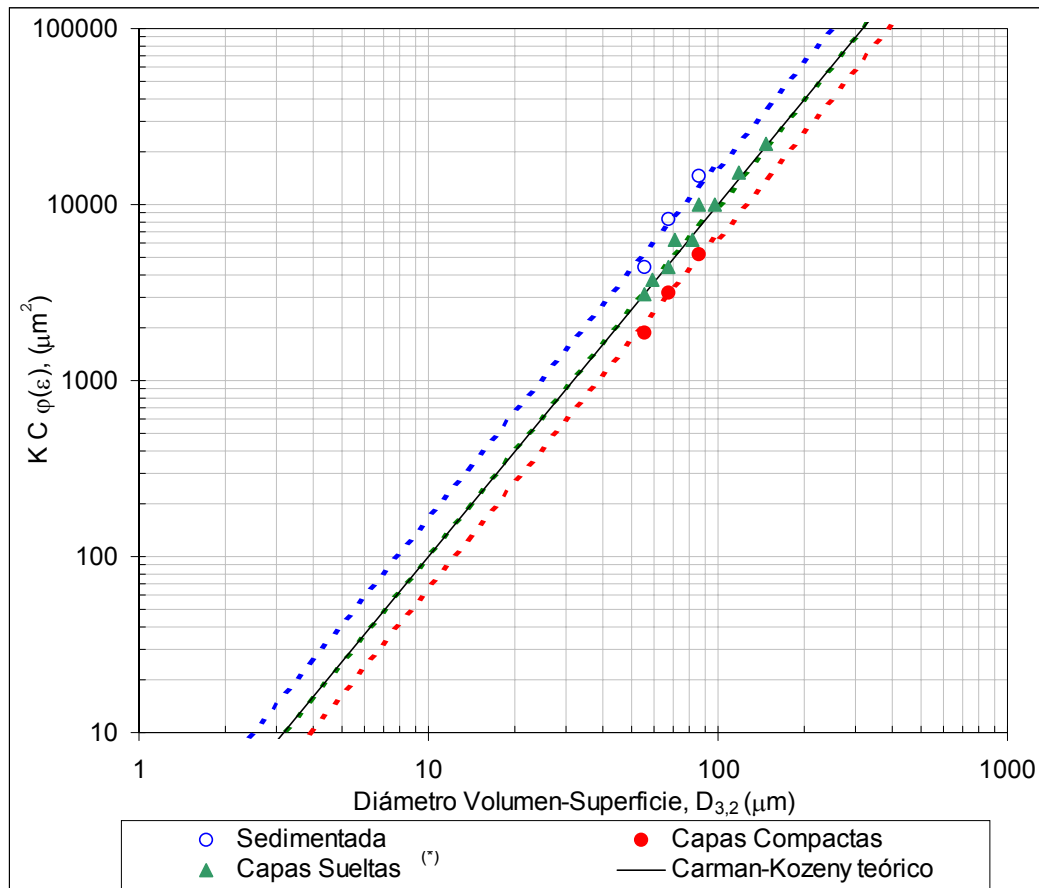
(\*\*\*) Datos tomados de las pruebas realizadas en el trabajo de Barrero-Goncalves<sup>(3)</sup>.

Al representar los resultados obtenidos en el diagrama permeabilidad-porosidad, se observa que para cada estructura de torta formada (sedimentada, capas compactas y capas sueltas), los datos se disponen en líneas paralelas a la recta que representa la ecuación teórica de Carman-Kozeny. En las figuras N°34 y N°35, se presentan los diagramas permeabilidad-porosidad correspondientes a las pruebas realizadas con carbonato de calcio y esferas de vidrio respectivamente.



(\*) Resultados obtenidos de los trabajos de Fajardo-Ravelo y Barrero-Goncalves.

Figura N°34: Diagrama permeabilidad-porosidad para diferentes mecanismos de formación de tortas de carbonato de calcio



(\*) Resultados obtenidos del trabajo de Barrero-Goncalves.

Figura N°35: Diagrama permeabilidad-porosidad para diferentes mecanismos de formación de tortas de esferas de vidrio

Para determinar la razón del desplazamiento de las rectas de  $K C \phi(\varepsilon)$  vs.  $D_{3,2}$  para cada tipo de formación de torta y para cada sustancia, respecto a la recta teórica de Carman-Kozeny, es necesario establecer comparaciones entre las bases experimentales del modelo y las variaciones de forma de las partículas y estructura de las tortas aplicadas en este trabajo, tales como:

- **Forma de las partículas:** El modelo de Carman-Kozeny está planteado para partículas de forma esférica, mientras que en este trabajo se ha estudiado no sólo partículas esféricas (esferas de



vidrio) sino que también se consideraron partículas irregulares (carbonato de calcio).

- **Superficie de los poros:** Dentro de las suposiciones planteadas para la ecuación de Carman-Kozeny, se asume que todas las superficies de partículas están disponibles para formar superficies de poros ( $SV_{[partículas]}=SV_{[poro]}$ ), lo cual no es totalmente cierto para el caso de partículas irregulares.
- **Estructura de la torta:** Los lechos formados en las experiencias realizadas por Carman<sup>(8)</sup>, tienen una estructura tal que el recorrido del fluido a través de los poros tiene una tortuosidad determinada ( $\tau = \sqrt{2}$ ). Sin embargo, esta tortuosidad pudiera ser diferente de acuerdo a la forma como las partículas se hayan empacado dentro del lecho, como en el caso particular de tortas formadas por sedimentación o por capas compactas.

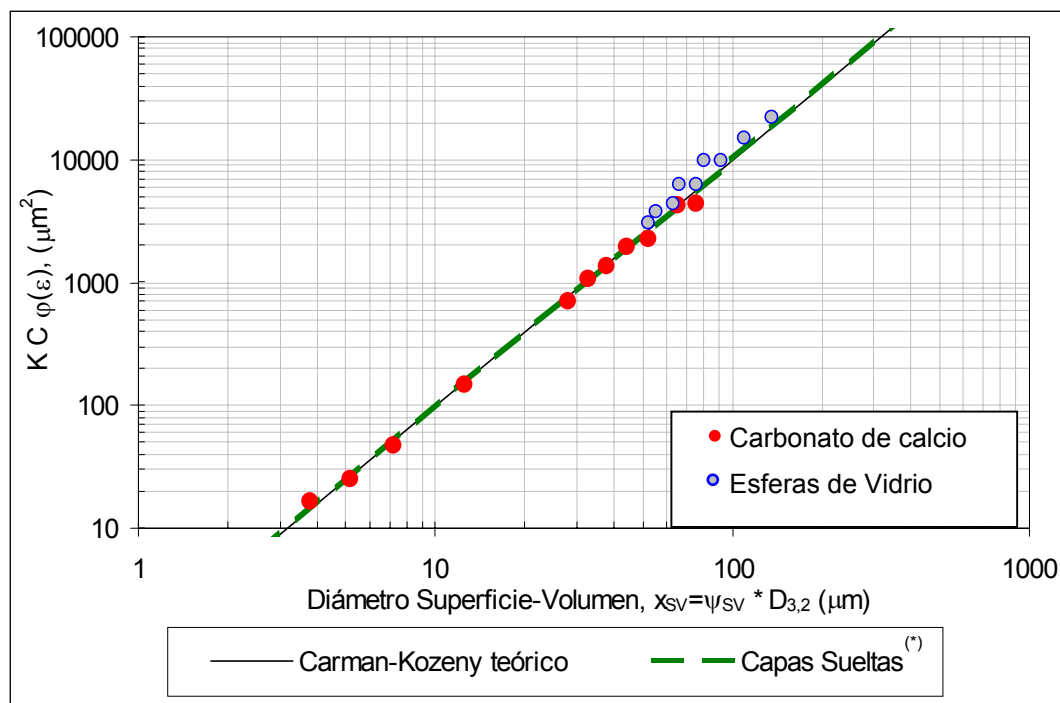
#### 10.1.1. EFECTO DE LA FORMA DE LAS PARTÍCULAS

Al considerar el efecto de forma de partículas, la ecuación de Carman-Kozeny ha sido modificada por Sorrentino y Anlauf<sup>(23)</sup>, introduciendo el factor de forma ( $\psi_{SV}$ ), que corrige el diámetro medio superficie volumen, suministrado por equipos de medición de tamaño medido asumiendo partículas esféricas ( $D_{3,2}$ ), para convertirlo al diámetro medio superficie volumen verdadero de las partículas ( $x_{SV}$ ), (ec. 4.74).

El factor de forma para carbonato y esferas de vidrio, fue determinado en el trabajo realizado por Bachmann et. al<sup>(9)</sup>, donde se obtuvo valores de  $\psi_{SV}=0,59$ ; y  $\psi_{SV}=0,93$  respectivamente.

Los factores de forma ( $\psi_{SV}$ ) encontrados para ambas sustancias fueron incluidos en el análisis de tortas formadas por el mecanismo de capas

suelas obtenidas en los trabajos de Fajardo-Ravelo<sup>(10)</sup> y Barrero-Goncalves<sup>(3)</sup>, y se obtuvo que en el diagrama permeabilidad-porosidad la recta  $K C \phi(\varepsilon)$  vs  $D_{3,2}$ , tanto las tortas formadas con esferas de vidrio como las de carbonato, se alinearon sobre la recta de Carman-Kozeny (ver figura N°36).

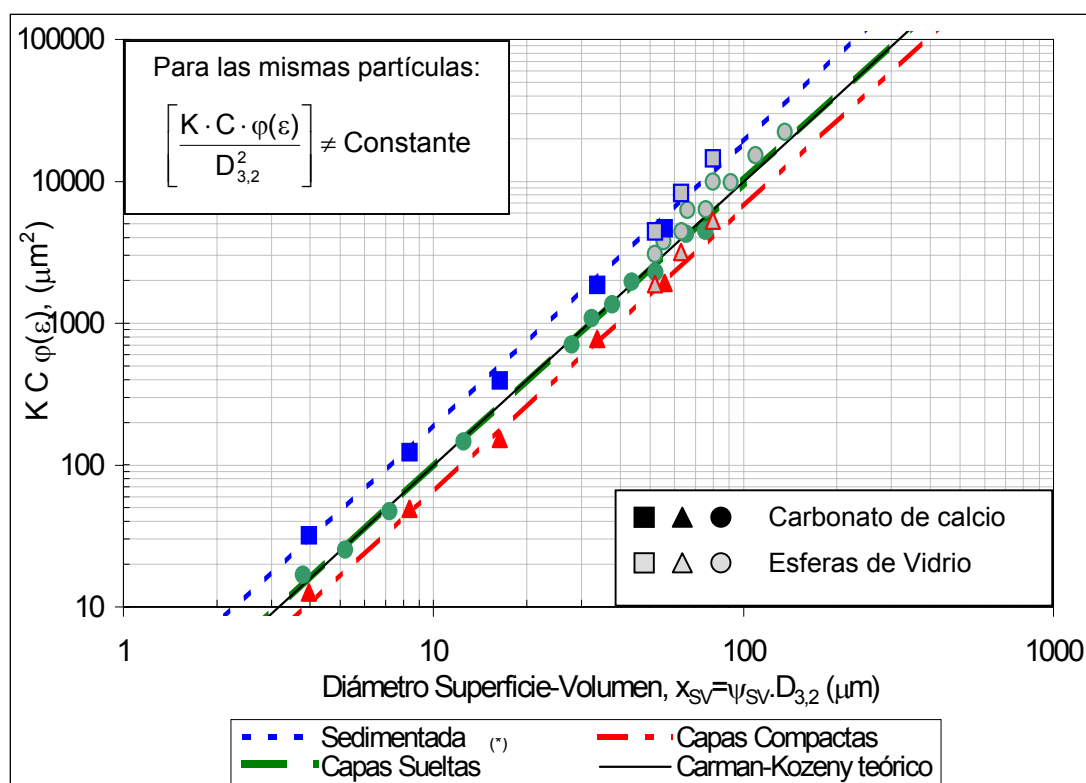


(\*) Resultados obtenidos del trabajo de Barrero-Goncalves<sup>(3)</sup> y Fajardo-Ravelo<sup>(10)</sup>.

Figura N°36: Diagrama permeabilidad-porosidad incluyendo el factor de forma ( $\psi_{SV}$ ), para el mecanismo de capas sueltas

Sin embargo, cuando se aplicó esta misma corrección de forma a las tortas formadas por los mecanismos utilizados en este trabajo (sedimentación y capas compactas), a pesar que los puntos del carbonato quedaron alineados con los de esferas de vidrio, las rectas de la ecuación de permeabilidad continuaron desplazadas respecto a la recta teórica de Carman-Kozeny, tal como se muestra en la figura N°37, esto indica que el

grupo  $K C \phi(\varepsilon) / D_{3,2}^2$  no es constante para partículas de la misma forma, como se había venido pensando hasta ahora en trabajos anteriores<sup>(3,9)</sup>.



(\*) Resultados obtenidos del trabajo de Barrero-Goncalves<sup>(3)</sup> y Fajardo-Ravelo<sup>(10)</sup>.

Figura N°37: Diagrama permeabilidad-porosidad incluyendo el factor de forma ( $\psi_{SV}$ ) para diferentes mecanismos de formación de torta

Con el diagrama permeabilidad-porosidad aplicado a diferentes mecanismos de formación de torta (figura N°37), se pone en evidencia que las propiedades de la torta no sólo dependen de la forma y tamaño de las partículas sino que también están relacionadas con la estructura del lecho. Por consiguiente, es necesario analizar en detalle la constante (C) de la ecuación de Carman-Kozeny, la cual considera la estructura de los poros que se forman en la torta; este análisis será desarrollado en la sección (10.1.3).

### 10.1.2. EFECTO DE LA SUPERFICIE DE PORO

La ecuación original de Carman-Kozeny que relaciona la porosidad y permeabilidad con la superficie específica ( $S_v$ ) (ecuación 4.41), supone que todas las superficies de las partículas están dispuestas para formar la superficie del poro, sin embargo esta suposición puede generar errores en el cálculo de la permeabilidad al aplicarse a partículas irregulares, tales como las de carbonato que se estudian en este trabajo.

En la figura N°38 se ilustra cómo para partículas esféricas, la suposición de Carman puede ser válida puesto que las esferas son formas geométricas que empacan formando lechos en el cual, cada partícula es tangencial a las que están a su alrededor, pero para formas irregulares es posible imaginar la existencia de superficies de contacto.

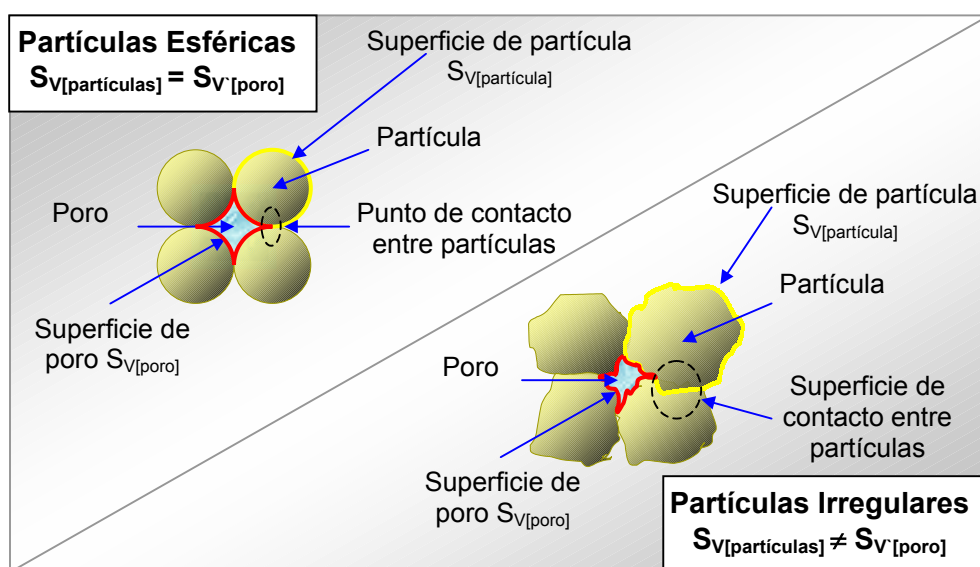


Figura N°38: Superficie de poro formado con partículas esféricas y partículas irregulares

Para tomar en cuenta el posible efecto de la no-esfericidad en la clase de contacto (puntos o superficies) entre las partículas, se define

la fracción de superficie específica de las partículas que realmente toma parte como superficie de poro ( $\lambda$ ), que no es más que la relación entre la superficie específica de los poros y la superficie específica de las partículas.

$$\lambda^2 = \frac{S_{V,\text{poro}}^2}{S_{V,\text{partículas}}^2} \quad (10.1)$$

Para establecer esta relación ( $\lambda$ ), se supone que la superficie específica de poro ( $S_{V[\text{poro}]}$ ) es igual a la superficie específica obtenida a partir de la ecuación de permeabilidad de Carman-Kozeny ( $S_{V[\text{permeametría}]}$ ), lo cual no es totalmente cierto debido a que el valor del grupo ( $k_0 \cdot \tau$ ) utilizado ( $k_0 \cdot \tau = 5$ ) no siempre es correcto, pues depende de la estructura del lecho, es decir, de la forma de preparación de la torta, efecto que será estudiado en la siguiente sección.

$$S_{V,\text{poro}}^2 = [S_V^2]^{\text{permeametría}} = \frac{1}{5 \cdot K \cdot \varphi(\varepsilon)} \quad (10.2)$$

Por otra parte, la superficie de las partículas ( $S_{V[\text{partículas}]}$ ) puede determinarse a partir de la técnica de fotometría como se hizo en el trabajo presentado por Bachmann et. al.<sup>(9)</sup>

$$S_{V,\text{partículas}}^2 = [S_V^2]^{\text{Fotometría}} = \left( \frac{6}{x_{SV}} \right)^2 = \frac{36}{\psi_{SV}^2 \cdot D_{3,2}^2} \quad (10.3)$$

Por lo tanto, fracción de superficie específica  $\lambda$ , matemáticamente queda definida como:

$$\lambda^2 = \frac{S_V^2 [\text{Permeametría}]}{S_V^2 [\text{Fotometría}]} = \frac{1}{\frac{5 \cdot K \cdot \varphi(\varepsilon)}{36}} = \frac{\psi_{SV}^2 \cdot D_{3,2}^2}{180 \cdot K \cdot \varphi(\varepsilon)} \quad (10.4)$$

De esta forma, la ecuación usada hasta ahora para el diagrama permeabilidad-porosidad (ecuación 4.74) queda redefinida para considerar la fracción de la superficie de partícula que realmente toma parte como superficie de poro.

$$K \cdot 180 \cdot \varphi(\varepsilon) = \frac{\psi_{sv}^2}{\lambda^2} \cdot D_{3,2}^2 \quad (10.5)$$

### 10.1.3. EFECTO DE LA ESTRUCTURA DE LA TORTA

Cuando la estructura de la torta cambia, es posible que sus características sean modificadas, lo cual explicaría la diferencia expuesta en el diagrama permeabilidad-porosidad aplicado a diferentes métodos de preparación de la torta (figura N°37).

La ecuación usada en el diagrama  $KC\varphi(\varepsilon)$ , (modelo de Carman-Kozeny), contiene la constante (C) la cual puede deducirse a partir de la ecuación original de Carman-Kozeny (ec. 4.41), tal como se muestra en las ecuaciones (10.6) y (10.7). Esta constante (C), involucra dos características relacionadas con los poros del lecho, el factor de aspecto de poro ( $k_0$ ) y la tortuosidad ( $\tau$ )<sup>(26)</sup>.

$$K = \frac{1}{(k_0 \cdot \tau_0^2)} \cdot \frac{1}{\varphi(\varepsilon)} \cdot \frac{1}{S_{sv}^2} = \frac{1}{(k_0 \cdot \tau_0^2)} \cdot \frac{1}{\varphi(\varepsilon)} \cdot \left( \frac{x_{sv}}{6} \right)^2 = \frac{x_{sv}^2}{[36 \cdot (k_0 \cdot \tau_0^2)] \cdot \varphi(\varepsilon)} \quad (10.6)$$

$$C = [36 \cdot (k_0 \cdot \tau_0^2)] \cdot \quad (10.7)$$

Como se explicó anteriormente en la sección (4.6.1.1), los valores de  $k_0$  y  $\tau_0$  obtenidos por Carman<sup>(7)</sup>, fueron de 2,5 y  $\sqrt{2}$  respectivamente; por lo tanto la constante (C) de la ecuación de Carman-Kozeny tiene un valor de 180. Aplicar este valor de la constante (C), es válido siempre que la

estructura de los lechos estudiados sea similar a estructura los lechos formados por Carman, como ocurrió en las tortas producidas por el mecanismo de capas sueltas aplicado en los trabajos de Barrero-Goncalves y Fajardo-Ravelo.

Sin embargo, al obtener otra estructura en el lecho diferente a la obtenida por Carman, la constante (C) del modelo puede verse afectada ya que la tortuosidad puede variar. Para el método de capas compactas se produce más tortuosidad para el flujo, debido a que las partículas se empaquetan más próximas unas de las otras que para el caso de estructuras menos densas. Por el contrario, cuando la torta se prepara de tal forma que el lecho queda altamente segregado como en el mecanismo de sedimentación, la trayectoria del fluido a través de un punto dado en la torta y el medio filtrante puede ser menos tortuosa.

En consecuencia, el valor para el grupo  $(k_0 \cdot \tau)$ , debe ser particular para cada estructura del lecho, por lo tanto la constante (C), corresponde a un valor modificado ( $C_1$ ), el cual queda definido como:

$$C_1 = [36 \cdot (k_1 \cdot \tau_1^2)]. \quad (10.8)$$

Esto implica que, el grupo permeabilidad-porosidad debe estar representado por  $K \cdot C_1 \cdot \varphi(\varepsilon)$  en lugar  $K \cdot C \cdot \varphi(\varepsilon)$ .

$$K \cdot C_1 \cdot \varphi(\varepsilon) = \frac{\psi_{sv}^2}{\lambda^2} \cdot D_{3,2}^2 \quad (10.9)$$

Para aplicar el diagrama permeabilidad-porosidad a diferentes métodos de preparación de torta, es conveniente involucrar el efecto de la nueva constante encontrada para diferentes estructuras de lechos ( $C_1$ ), en términos de la ecuación modificada de Carman-Kozeny.

$$K \cdot C_1 \cdot \varphi(\varepsilon) = K \cdot C \cdot \varphi(\varepsilon) \cdot \frac{C_1}{C} = \frac{\psi_{sv}^2}{\lambda^2} \cdot D_{3,2}^2 \quad (10.10)$$

Considerando las definiciones de  $C$  y  $C_1$  (ecuaciones 10.7 y 10.8 respectivamente), se obtiene:

$$K \cdot C \cdot \varphi(\varepsilon) = \left[ \frac{C}{C_1} \right] \cdot \frac{\psi_{SV}^2}{\lambda^2} \cdot D_{3,2}^2 = \left[ \frac{k_0 \cdot \tau_0^2}{k_1 \cdot \tau_1^2} \right] \cdot \frac{\psi_{SV}^2}{\lambda^2} \cdot D_{3,2}^2 \quad (10.11)$$

Si se considera que el aspecto de poro ( $k$ ) permanece relativamente constante, se puede definir un nuevo parámetro  $\beta$ , que representa la relación entre la tortuosidad real del lecho ( $\tau_1$ ) y la tortuosidad encontrada por Carman-Kozeny ( $\tau_0$ ) (ec.10.12). La ecuación de permeabilidad por lo tanto, queda modificada al incluir el efecto de estructura de torta (ec. 10.13).

$$\beta^2 = \left[ \frac{k_1 \cdot \tau_1^2}{k_0 \cdot \tau_0^2} \right] \quad (10.12)$$

$$K \cdot C \cdot \varphi(\varepsilon) = \frac{\psi_{SV}^2}{\beta^2 \cdot \lambda^2} \cdot D_{3,2}^2 \quad (10.13)$$

El parámetro  $\beta$  indica que, para tortas cuya tortuosidad es menor que la tortuosidad de Carman-Kozeny ( $\tau_1 < \tau_0$ ), los valores obtenidos del grupo  $K \cdot C \cdot \varphi(\varepsilon)$  quedan desplazados hacia la izquierda respecto a la recta original del modelo, tal como se observa en la figura N°37 para el mecanismo de formación de tortas por capas compactas. Mientras que para tortuosidades mayores, se obtienen líneas desplazadas hacia la derecha, como ocurre en el caso de lechos segregados formados por sedimentación.



#### 10.1.4. DEFINICIÓN DEL PARÁMETRO $\eta_{sv}$

Como se ha explicado anteriormente, la permeabilidad de un lecho depende no solo del tamaño de las partículas que lo conforman sino también de la forma de las partículas y la estructura del lecho. Esta dependencia ha sido sintetizada<sup>(26)</sup> en tres parámetros, el efecto de la forma de las partículas, representado por el factor de forma ( $\psi_{sv}$ ), el efecto de la superficie de los poros ( $\lambda$ ) y el efecto de la estructura de la torta ( $\beta$ ).

Sin embargo, determinar cada uno de estos parámetros puede ser muy complejo, por lo que es conveniente sintetizarlos todos en un solo término que involucre los tres efectos

$$\eta_{sv}^2 = \frac{\psi_{sv}^2}{\beta^2 \cdot \lambda^2} \Rightarrow \eta_{sv} = \frac{\psi_{sv}}{\beta \cdot \lambda} \quad (10.14)$$

Este nuevo parámetro  $\eta_{sv}$ , puede definirse como un factor de forma partícula-poro, el cual representa todo el desplazamiento de las rectas en el diagrama permeabilidad-porosidad para cada estructura del lecho y para cada sustancia, respecto a la recta original de Carman-Kozeny.

Finalmente la ecuación del modelo de Carman-Kozeny, queda modificada al involucrar este nuevo parámetro definido.

$$K \cdot C \cdot \varphi(\varepsilon) = \eta_{sv}^2 \cdot D_{3,2}^2 \quad (10.15)$$

Al realizar un ajuste de los resultados de permeabilidad obtenidos para cada sustancia y tipo de torta, pudo determinarse el desplazamiento de cada recta para cada caso, que corresponde al nuevo factor ( $\eta_{sv}$ ), cuyos valores se muestran en la tabla N°11

**Tabla N°11: Valores obtenidos del parámetro  $\eta_{sv}$**

Mecanismo de formación de Torta	Sustancia	Factor partícula-poro $\eta_{sv}$ (adim)
Sedimentada	Carbonato de calcio	0,727
	Esferas de Vidrio	1,307
Capas compactas	Carbonato de calcio	0,467
	Esferas de Vidrio	0,836
Capas sueltas	Carbonato de calcio	0,590
	Esferas de Vidrio	1,024

Se observa que en las figuras N°34 y N°35, para diferentes mecanismos de formación de torta, las rectas del diagrama permeabilidad-porosidad quedan desplazadas respecto a la recta original que describe el modelo de Carman-Kozeny, debido a que el factor de forma partícula-poro no había sido incluido. Finalmente se tiene que:

- Para Carman-Kozeny original ( $\lambda=1$ ,  $\psi_{sv}=1$ ,  $\beta=1$ ):

$$x_{sv}^2 = D_{3,2}^2 \quad (10.16)$$

- Para Carman-Kozeny modificado al incluir el factor de forma partícula-poro ( $\eta_{sv}$ ):

$$x_{sv}^2 = \eta_{sv}^2 \cdot D_{3,2}^2 \quad (10.17)$$

### 10.3. PREDICCIÓN DE LA POROSIDAD

Para determinar la porosidad ( $\varepsilon$ ) de una mezcla de una forma tal, que dependa solo de su distribución de tamaño de partícula, se utilizó el modelo de Yu-Standish<sup>(30)</sup> descrito en la sección (4.7.1), aplicándolo a las mezclas utilizadas en este trabajo. Posteriormente se compararon los valores de porosidad calculados mediante este modelo con los obtenidos durante las pruebas experimentales.

Para aplicar el modelo de Yu-Standish, se utilizaron los parámetros de ajustes obtenidos en el trabajo realizado por López-Pérez<sup>(14)</sup> para tortas de carbonato de calcio formadas bajo los mecanismos de poured packing, que corresponden a un lecho poco denso como el obtenido por el mecanismo de sedimentación aplicado en este trabajo, y tapped packing que corresponde a lechos más densos tal como el mecanismo de capas compactas utilizado en este estudio. Estos valores de ajuste se presentan en la tabla N°12.

Se debe considerar que en el trabajo realizado por López-Pérez<sup>(14)</sup>, se acota claramente que para mezclas de carbonato estrechas, es decir, de desviación estándar menor a 1,5, tales como las que se utilizaron en este estudio, los valores de porosidad calculados con el modelo de Yu-Standish<sup>(30)</sup> presentan un error de aproximadamente  $\pm 10\%$ , respecto a los valores experimentales.

**Tabla N°12: Parámetros de ajuste del modelo de Yu-Standish  
para tortas formadas con mezclas de carbonato<sup>(14)</sup>**

Tipo de lecho	a	b	$\varepsilon_0$	P
Poured packing	1,3799	0,3487	0,5092	0,52
Tapped packing	1,0864	0,2999	0,4117	0,78

Cada mezcla de carbonato utilizada en este trabajo fue dividida en 20 pseudo componentes, presentados en la tabla N°13, los cuales se

determinaron fraccionando la curva de distribución acumulada de partículas en intervalos del 5%.

**Tabla N°13: Pseudo componentes definidos para mezclas de carbonato**

Pseudo componente i	Fracción volumétrica $F_{vi}$ (%)	Diámetro medio, $x_i(\mu\text{m})$				
		C-9000	C-4500	C-3000	C-45-53	C-75-90
20	5	3,79	6,61	12,14	30,13	52,29
19	5	4,62	8,75	16,36	39,68	67,76
18	5	4,99	9,74	18,17	43,00	72,88
17	5	5,30	10,58	19,69	45,59	76,93
16	5	5,57	11,33	21,08	47,82	80,56
15	5	5,83	12,05	22,39	49,97	83,73
14	5	6,08	12,76	23,67	52,00	86,81
13	5	6,34	13,46	24,94	53,96	89,89
12	5	6,59	14,17	26,23	55,93	92,97
11	5	6,84	14,90	27,55	57,96	96,05
10	5	7,11	15,66	28,94	60,02	99,17
9	5	7,39	16,47	30,40	62,08	102,53
8	5	7,67	17,32	31,97	64,38	106,10
7	5	7,99	18,26	33,69	66,92	109,67
6	5	8,38	19,31	35,60	69,48	113,75
5	5	8,78	20,52	37,79	72,58	118,55
4	5	9,28	21,95	40,44	76,28	123,55
3	5	9,93	23,75	43,75	80,88	130,78
2	5	10,86	25,83	48,54	87,41	141,77
1	5	15,71	38,56	70,41	116,40	186,22

Una vez definidos los pseudo componentes de la mezcla y ordenados de mayor a menor tamaño de diámetro de partícula, se calculó mediante la ecuación (4.65) cada una de las porosidades individuales ( $\varepsilon_i$ ) de los pseudo componentes simulados, utilizando para ello los parámetros de ajuste ( $\varepsilon_0$ , a y b) para cada tipo de lecho (tabla N°12). Cada porosidad individual para mecanismo de capas compactas (tapped packing) y sedimentación (poured packing), se presentan en las tablas N°35 a la N°39 del apéndice D-3.

Posteriormente, se determinó la razón de tamaño volumétrico ( $R_{i,j}$ ) con la relación de tamaños de partícula ( $x_i, x_j$ ) de cada pseudo componente (ec. 4.64), y utilizando el parámetro  $P$  obtenido en el trabajo de López-Pérez<sup>(14)</sup> para cada tipo de tipo de lecho, se calculó la razón de empaque de cada componente ( $r_{i,j}$ ) definida en el modelo de Yu-Standish<sup>(30)</sup> mediante la ecuación (4.63).

Aplicando las funciones  $f(r_{i,j})$  y  $g(r_{i,j})$  (ecuaciones 4.61 y 4.62 respectivamente) se determinó el volumen específico de empaque individual para cada componente ( $V_i^T$ ), (ec. 4.59). De estos valores, se seleccionó el máximo volumen de empaque individual que según el modelo de Yu-Standish<sup>(30)</sup> corresponde al volumen específico de la mezcla ( $V_e$ ) (ec. 4.58), con el cual pudo obtenerse finalmente la porosidad. En las tablas N°35 a la N°39 del apéndice D-3, se presentan los valores de volúmenes específicos individuales obtenidos para cada mezcla. En el apéndice A-5, se presentan los cálculos típicos involucrados en este modelo que conducen a obtener los valores teóricos de porosidad.

En la tabla N°14, se presenta los valores de las porosidades calculadas a partir de la información de tamaño de partícula de cada mezcla, para mecanismos de sedimentación (poured packing) y capas compactas (tapped packing).

**Tabla N°14: Porosidad calculada por el método de Yu-Standish**

Mezcla	Porosidad, $\varepsilon$ (adim)	
	Mecanismo de Sedimentación (poured packing)	Mecanismo de Capas Compactas (tapped packing)
C-9000	0,536	0,483
C-4500	0,514	0,441
C-3000	0,505	0,420
C-45-53	0,505	0,413
C-75-90	0,505	0,408

Al comparar las porosidades calculadas para lechos de tipo poured packing y tapped packing, con los valores obtenidos experimentalmente para tortas formadas por sedimentación y por capas, se observa en el gráfico de la figura N°39, que el porcentaje de diferencia entre ambos valores está alrededor del  $\pm 15\%$ . Este rango de error es mayor que el obtenido en el trabajo de López-Pérez<sup>(14)</sup> ( $\approx \pm 10\%$ ), esto se debe a que experimentalmente puede existir cierta discrepancia en la forma de promover los lechos sedimentados y por capas. Sin embargo, puede considerarse que el modelo probado de Yu-Standish es una herramienta útil para realizar predicciones iniciales de la porosidad de una mezcla a partir de su distribución de tamaño de partícula.

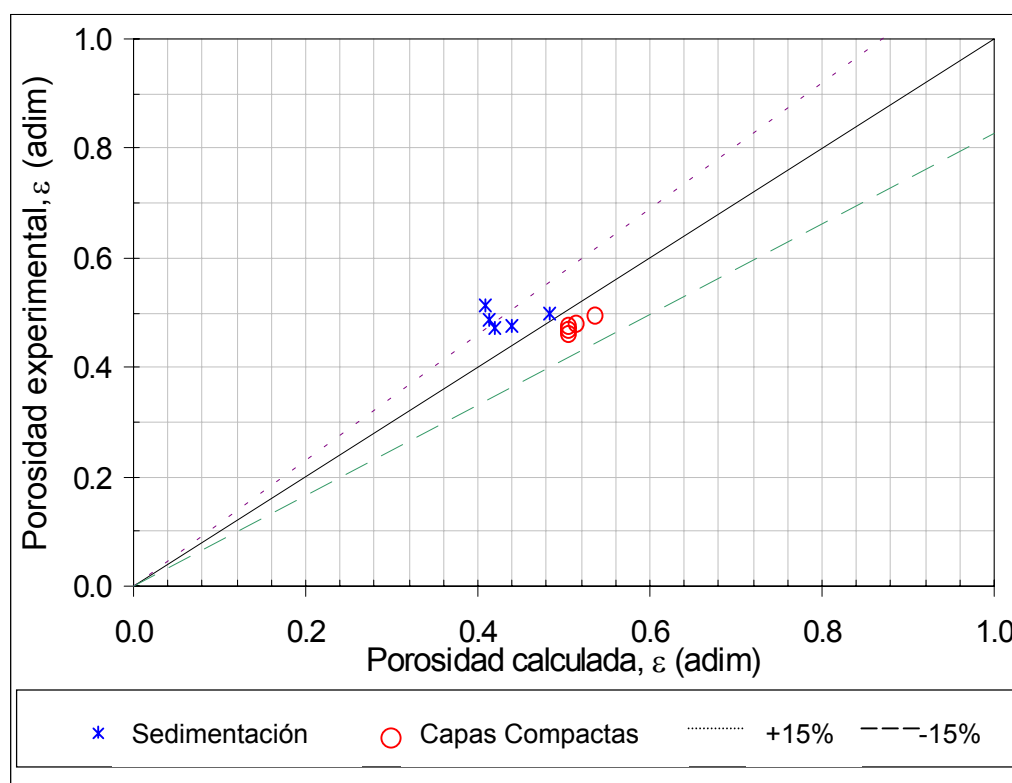


Figura N°39: Comparación de los valores de porosidades experimentales y calculadas por el modelo de Yu-Standish

#### **10.4. DESACOPLAMIENTO DE VARIABLES**

Con los análisis realizados en el estudio de las propiedades de tortas de filtración, se propone sintetizar la información obtenida en cuanto a la forma, tamaño de las partículas y la estructura de la torta, en diagramas que relacionen de forma independiente las variables de permeabilidad ( $K$ ) y porosidad ( $\varepsilon$ ) de la torta con el tamaño de las partículas  $D_{3,2}$ . Estos diagramas pueden ser útiles para ayudar a obtener estimaciones certeras del comportamiento de lechos de filtración obtenidos en el ámbito industrial.

Definiendo un método de preparación de torta, es decir, determinando el factor de forma partícula-poro ( $\eta_{sv}$ ), y conocida la porosidad ( $\varepsilon$ ) mediante algún método de predicción de la misma tal como el modelo de Yu-Standish, puede estimarse fácilmente la permeabilidad para una sustancia dada, sin necesidad de realizar pruebas experimentales.

El diagrama de permeabilidad ( $K$ ) en función del diámetro de partícula ( $D_{3,2}$ ), es un gráfico logarítmico en el que se obtienen diferentes rectas correspondientes a diferentes porosidades ( $\varepsilon$ ). Por otra parte, el diagrama de permeabilidad en función de la porosidad es semi-logarítmico y en él se presentan rectas correspondientes a diferentes tamaños de partícula ( $D_{3,2}$ ).

Para obtener los diagramas generales que permitan obtener de forma directa la permeabilidad, se simulieron diferentes valores de porosidad y tamaño de partículas para tortas de carbonato de calcio y esferas de vidrio formadas por los mecanismos de sedimentación, capas compactas y capas sueltas. Los diagramas de predicción de permeabilidad para tortas de carbonato de calcio y esferas de vidrio, producidas por el mecanismo de sedimentación se presentan en las figuras N°40 a la N°43. Los diagramas correspondientes a los mecanismos de capas compactas y capas sueltas; se presentan en las figuras N°48 a la N°53 del apéndice D-4.

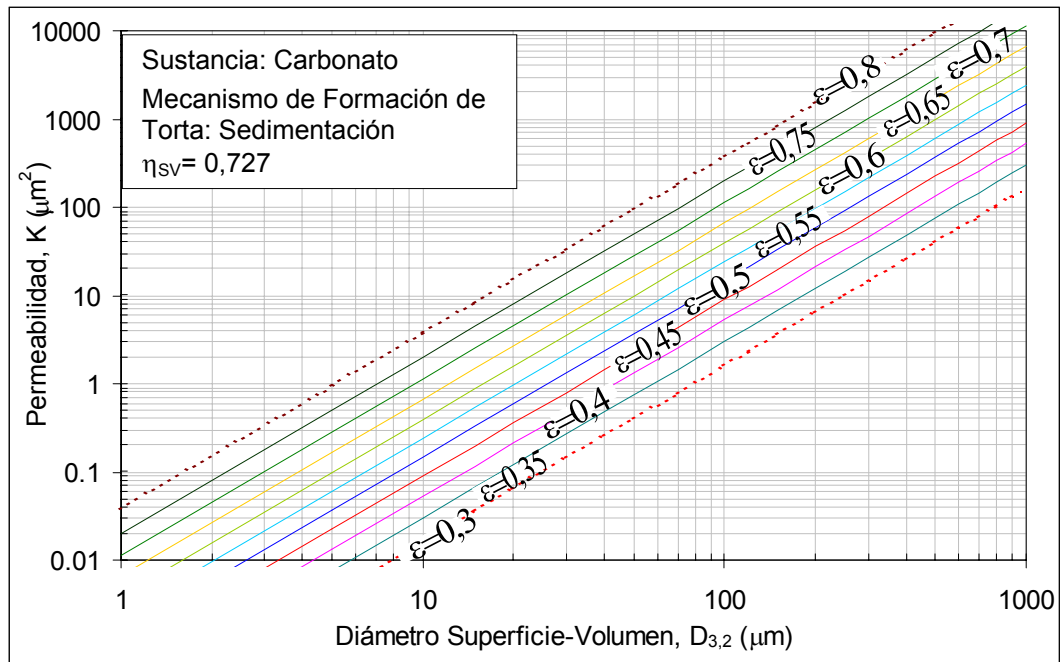


Figura N°40: Predicción de la permeabilidad para tortas de carbonato formadas por sedimentación, variando la porosidad  $\varepsilon$

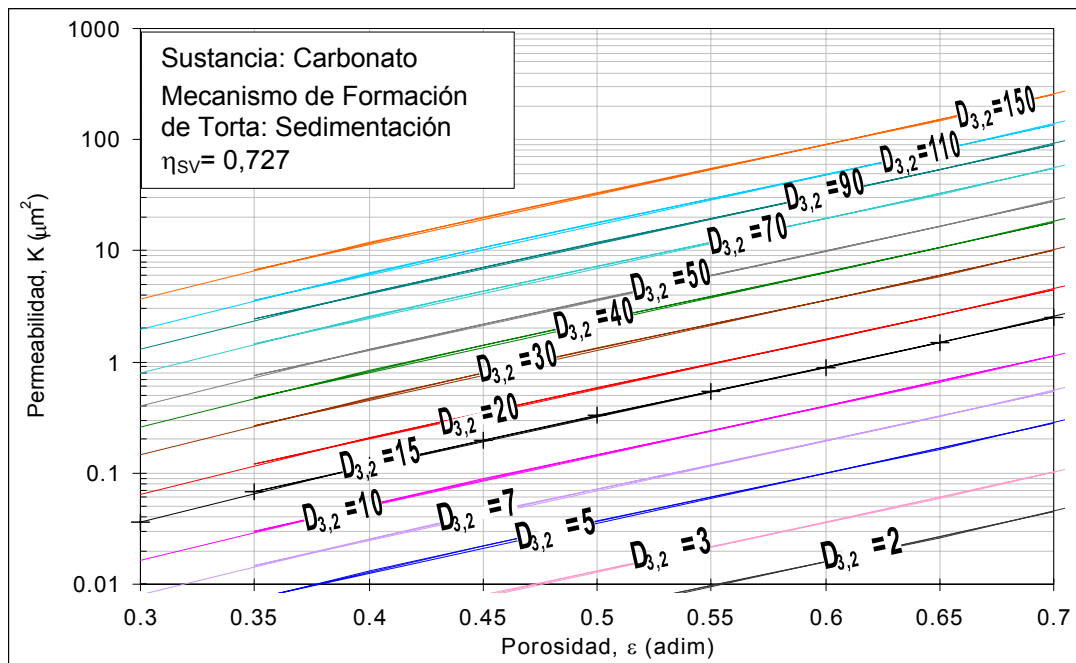


Figura N°41: Predicción de la permeabilidad para tortas de carbonato formadas por sedimentación, variando el diámetro  $D_{3,2}$



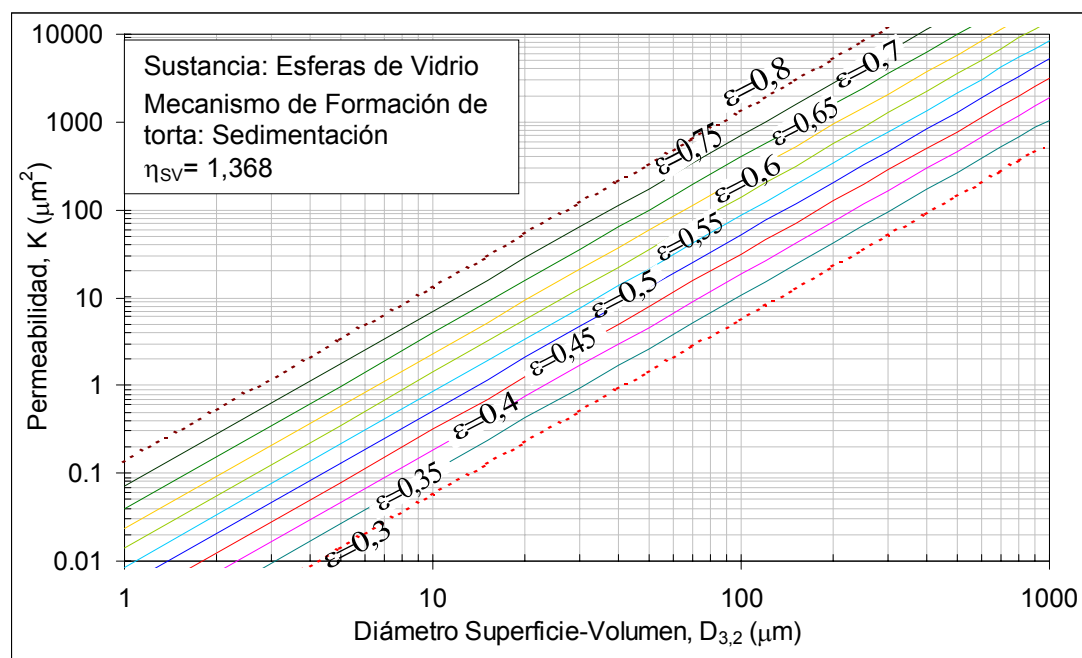


Figura N°42: Predicción de la permeabilidad para tortas de esferas de vidrio formadas por sedimentación, variando la porosidad  $\epsilon$

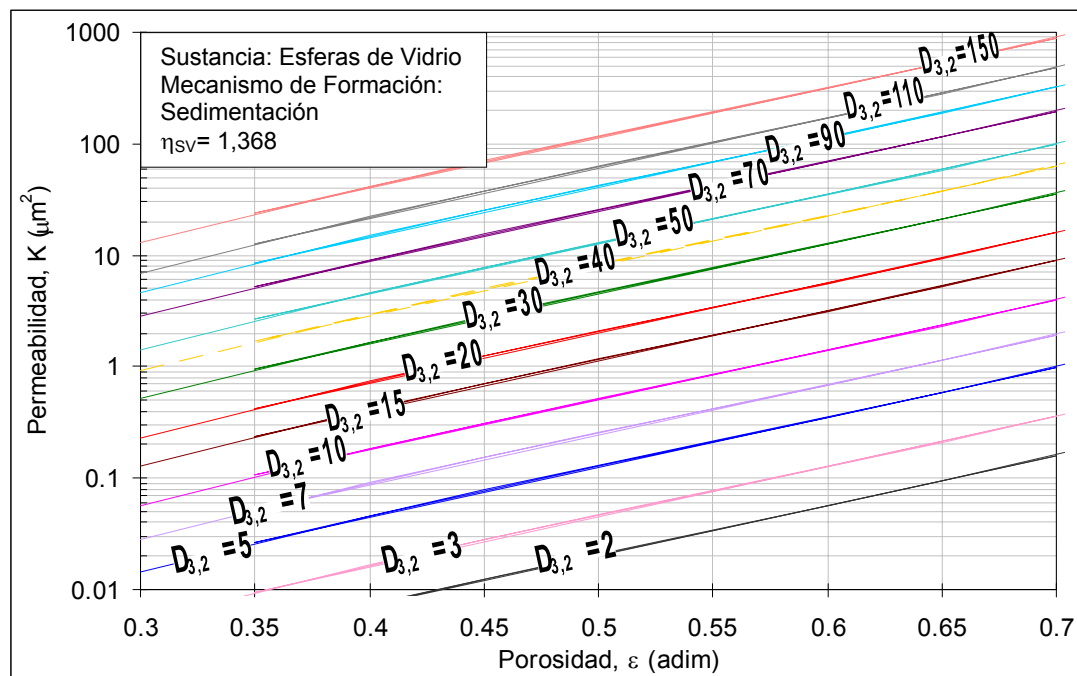


Figura N°43: Predicción de la permeabilidad para tortas de esferas de vidrio formadas por sedimentación, variando el diámetro  $D_{3,2}$

## *11. CONCLUSIONES*

---

El estudio de la permeabilidad y porosidad a través de tortas de filtración formadas por diferentes mecanismos, permitió establecer las siguientes conclusiones:

- De los modelos de permeabilidad propuestos basados en diferentes enfoques del recorrido del flujo, resulta favorable utilizar el modelo de Carman-Kozeny ya que éste presenta una ecuación sencilla para estudiar el comportamiento de las características de tortas, cuya constante (C) ha sido deducida a partir de discernimientos teóricos que pueden ser evaluados experimentalmente.
- Para obtener resultados confiables en el estudio de la permeabilidad, es importante seleccionar un medio filtrante adecuado, cuya interacción con las partículas a tratar, no produzcan una resistencia mayor que la resistencia específica que pueda tener la torta.
- Diferentes mecanismos de formación de torta conducen a resultados de permeabilidad-porosidad que siguen la tendencia establecida por Carman-Kozeny, según la cual, la permeabilidad es proporcional al cuadrado del tamaño promedio de partícula.
- El desplazamiento de las rectas que ajustan los datos experimentales en el gráfico permeabilidad – porosidad, respecto a la recta teórica de Carman-Kozeny, no depende solo de

la forma de las partículas como se pensaba en trabajos previos, sino que también depende de la estructura de la torta, es decir, de su mecanismo de preparación. Las tortas cuya tortuosidad es menor que la estimada por Carman-Kozeny, producen valores del grupo  $K \cdot C \cdot \phi(\varepsilon)$  que quedan desplazados hacia la izquierda respecto a la recta original del modelo de Carman-Kozeny, mientras que para tortas formadas por mecanismos que promuevan lechos más compactos, es decir, de mayor tortuosidad conducen a valores de  $K \cdot C \cdot \phi(\varepsilon)$  desplazados hacia la derecha de la recta de Carman-Kozeny.

- Los efectos de la forma de las partículas y de la estructura de la torta, es decir, de la forma como las partículas se hayan acomodado para formar el lecho, pueden agruparse en un solo factor denominado factor de forma partícula – poro ( $\square_{SV}$ ).
- El factor de forma partícula – poro permite extender la aplicación de la ecuación de Carman-Kozeny para el estudio de la permeabilidad, a cualquier sustancia y mecanismo de formación de torta.
- Para estimar la porosidad de una torta, puede utilizarse modelo de Yu-Standish una vez que se tengan los parámetros de ajustes ( $a$ ,  $b$ ,  $e_0$  y  $P$ ) para el mecanismo de preparación de torta aplicado.
- Una vez conocido el tamaño de las partículas y establecido el factor de forma partícula – poro para el mecanismo de formación torta aplicado, es posible estimar directamente la permeabilidad de tortas para una porosidad dada.

## *12. RECOMENDACIONES*

---

Para realizar trabajos posteriores enfocados a estudiar propiedades de tortas de filtración se propone considerar las siguientes recomendaciones:

- Ampliar el rango de estudio del diámetro superficie-volumen para obtener mejores ajustes del factor de forma partícula – poro encontrado para cada sustancia y mecanismo de formación de torta.
- Utilizar mezclas de características diferentes a las aplicadas en este trabajo, tales como desviación estándar y condiciones de bimodalidad, para verificar la tendencia de las propiedades de las tortas formadas por diferentes mecanismos.
- Realizar investigaciones que permitan verificar qué mecanismos de formación de torta aplicados en los estudios de laboratorio conducen a producir lechos representativos de los obtenidos en la industria.
- Realizar pruebas con otros materiales, de manera que puedan obtenerse diferentes factores de forma partícula – poro.

### *13. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFIAS*

---

1. ANLAUF, H., NICOLAOU, I. y SORRENTINO, J. A. "Cake Filtration Technology for the Process Industry". Caracas, 1996.
2. ANLAUF, H., KELLER, K. y SORRENTINO, J. A. "Solid-Liquid Separations: Fundamentals, Machinery & Strategies". Caracas, 1996.
3. BARRERO, N. y GONCALVES, M. "Efecto de la forma de las partículas sobre la relación entre la granulometría y la permeabilidad". Trabajo Especial de Grado U.C.V. Caracas, 2001.
4. BONGIOVANNI, R. "Efecto de la estructura de la torta en las características de filtración" Trabajo Especial de Grado U.C.V. Caracas, 1998.
5. BROWN, G. "Operaciones básicas de ingeniería química". Editorial Martín. Barcelona, 1965.
6. CALZADILLA, H.y MEZA, M., "Modelo de correlación dadas curvas dedislicorización con información granulométrica" Trabajo Especial de Grado. UCV, 2000.
7. CARMAN, P. C. "Flow of gases through porous media". Editorial Academic Por. Nueva York, 1956.
8. CARMAN, P.C., Trans. Inst. Chem. Engr. V. 15, 150, 1937.
9. BACHMANN, C., RICHEL, V. y SORRENTINO, J. A. "Estimation of filter cake properties using narrow-angle photometer measurements". AFS Meeting. Tampa, Florida, 2001.

10. FAJARDO, I. y RAVELO, M. "Evaluación del uso del tamaño promedio  $D_{3,2}$  para representar la influencia de la granulometría sobre la permeabilidad". Trabajo Especial de Grado U.C.V. Caracas, 2001.
11. FINOL, C. y SANTALICES, M. "Efecto del tipo de determinación de la distribución de tamaño de partícula en la relación entre amplitud y deslicorización". Trabajo Especial de Grado. UCV, 1999.
12. HAPPEL y BRENNER, "Low Reynolds Number Hydronamics", Martinus Nijhoff Pub., 1983.
13. LÓPEZ, F., NUÑEZ, A. "Efecto de la segregación de la torta en sus características de filtración" Trabajo Especial de Grado U.C.V. Caracas, 2000.
14. LÓPEZ, M., PÉREZ, O. "Porosidad y curva de presión capilar de mezclas de diferente granulometría". Trabajo Especial de Grado U.C.V. Caracas, 2001.
15. MANUAL DE USO DEL MASTERZISER 2000. Laboratorio de Separaciones Mecánicas – UCV.
16. Mc CABE, W. y SMITH, J. "Operaciones Básicas en la Ingeniería Química". Editorial Reverté. Barcelona, 1975.
17. PERRY, R. "Manual del Ingeniero Químico". Tomo V. Editorial McGraw Hill. 3ERA Edición. México, 1992.
18. ROCCARO, V. "Filtración de lodo rojo". Trabajo de ascenso a Profesor Titular, Facultad de Ingeniería, UCV. Caracas, 1997.
19. RUMPF, H. y GUPTE, A.R., Chem. Ing. Tech., v. 43, N° 6, 1971, pp. 367-375.

20. RUSHTON, A., WARD, A. y HOLDICH, R., "Solid-Liquid Filtration and Separation Technology", Alemania VCH, 1996.
21. SORRENTINO, J. A. and ANLAUF, H., "Some simple relationship some simple relationships about the influence of particle size distribution on cake permeability", Advances in Filtration and Separation, Vol. 13b, pp. 917-925. Conference held during the Annual Meeting of the American Filtration and Separation Society, Boston, MA, April 6-9, 1999.
22. SORRENTINO, J. A. and ANLAUF, H., "The use of particle size distribution for estimating cake permeability", Advances in Filtration and Separation, Vol. 14, pp. 917-925. Conference held during the Annual Meeting of the American Filtration and Separation Society, Myrtle Beach, SC, Marzo 14-17, 2000.
23. SORRENTINO, J. A. and ANLAUF, H., "Predicting changes in permeability and dewatering behaviour of filter cakes when varying particle size distribution", 6th World Congress of Chemical Engineering. Melbourne, Australia, 2001.
24. 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, Marzo 27-28, 2000.
25. 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, Mayo 1-4, 2001.

26. SORRENTINO, J.A., "Advances in correlative cakes proprieties with particle collective characteristics" Disertación Doctoral, U.C.V., en preparación.
27. SVAROVSKY, L. (Editor): "Solid Liquid Separations", Butterworths (London), 2a. Edición, 1988, pp. 120-161.
28. TILLER, F., Fluid/Particle Separation Journal, V. 4, N°2, Junio 1991, pp. 129-136.
29. WAKEMAN, R. "Filtration post treatment processes". Elsevier, Amsterdam, 1975.
30. YU, A.B., et al. "On the modeling of the packing of fine particles", Powder Technology, Vol. 92, pp. 185-194, 1997.



### ▪ APÉNDICE A: CÁLCULOS TÍPICOS

Los cálculos realizados para obtener las diferentes variables involucradas en este estudio, se presentan en esta sección. Todos los cálculos están referidos a tortas obtenidas por sedimentación con la mezcla de carbonato C-3000.

#### APÉNDICE A-1: CÁLCULO DE LA PERMEABILIDAD

Para determinar la permeabilidad, con cada mezcla es necesario realizar experiencias con tortas de diferentes alturas, en este trabajo, se tomaron cuatro alturas diferentes de 0,1, 1, 2, y 3 cm, aproximadamente, y también se realizó una prueba más sin muestra que corresponde a una torta de altura cero.

#### ▪ Flujo másico de líquido que atraviesa la torta durante la permeación

A partir de los datos de masa de filtrado en función del tiempo, suministrados por el programa Balancelink del Filtratest-UCV, se traza las gráficas mostradas en la figura N°44. Al ajustar estos datos, se obtiene para cada altura de torta una recta cuya pendiente ( $\bar{m} = m_{LF} / t$ ) corresponde al flujo másico del líquido.

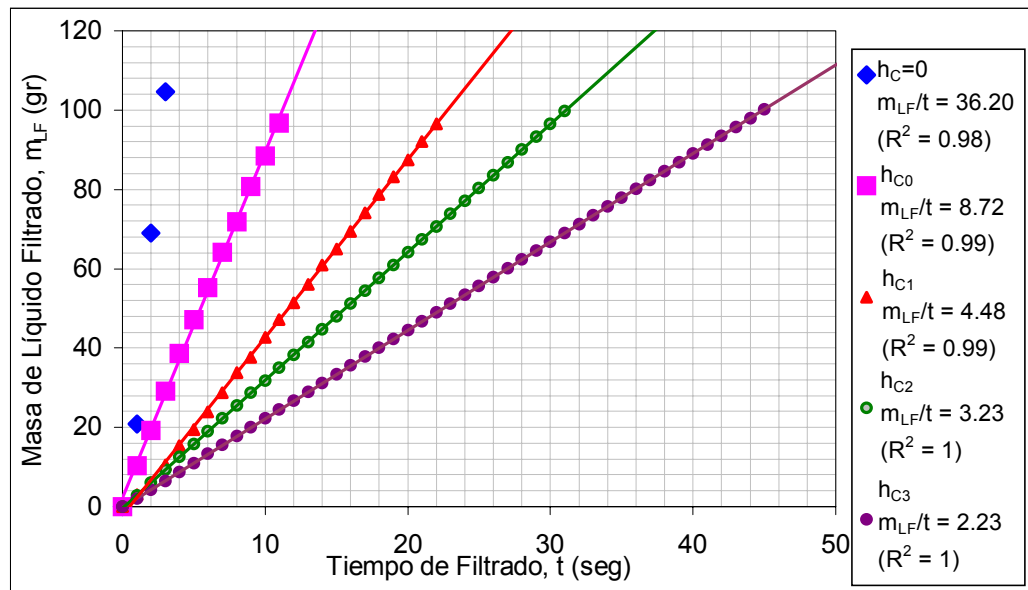


Figura N°44: Flujo másico de líquido filtrado a través de tortas sedimentadas de carbonato C- 3000

- **Caudal de líquido que atraviesa la torta durante la permeación (Q)**

Para la torta de altura  $h_{C3}$ :

$$Q = \frac{\bar{m}}{\rho} = \frac{2,23 \text{ (gr / s)}}{1000 \text{ (Kg/m}^3\text{)}} \cdot 10^{-3} \text{ (gr / Kg)}$$

$$Q = 2,23 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

- **Altura promedio de torta ( $h_C$ )**

A partir de cinco mediciones de la altura en puntos diferentes de la torta, se obtiene una altura promedio.

$$h_{C3} = \frac{h_{C,1} + h_{C,2} + h_{C,3} + h_{C,4} + h_{C,5}}{5}$$

$$\Rightarrow h_{C3} = \frac{(30,53 + 30,99 + 31,43 + 30,93 + 30,45)}{5} (\text{mm}) \cdot 10^{-3} (\text{m/mm})$$

$$h_{C3} = 3.086 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

▪ **Resistencia total ( $R_T$ )**

Por el método de permeación aplicado, puede obtenerse la resistencia total que involucra, la resistencia de la torta y la resistencia del medio.

$$R_T = \frac{\Delta P \cdot A_F}{\mu_L \cdot Q} = \frac{800 (\text{mbar}) \cdot (100 \text{ Pa/mbar}) \cdot 0,001963 (\text{m}^2)}{0,001018 (\text{Pa} \cdot \text{s}) \cdot 2,23 \cdot 10^{-3} (\text{m}^3/\text{s})}$$

$$R_T = \frac{\Delta P \cdot A_F}{\mu_L \cdot Q} = 1.266 \cdot 10^{11} \text{ m}^{-1}$$

▪ **Resistencia específica de la torta ( $r_C$ ) y resistencia del medio ( $R_M$ )**

A partir de los datos de la resistencia total ( $R_T$ ) en función de altura de torta ( $h_C$ ) se obtiene el gráfico mostrado en la figura N°45. Al hallar el mejor ajuste de los datos se obtiene una recta cuya pendiente y punto de corte corresponden a la resistencia específica de la torta ( $r_C$ ) y resistencia del medio ( $R_M$ ) respectivamente.

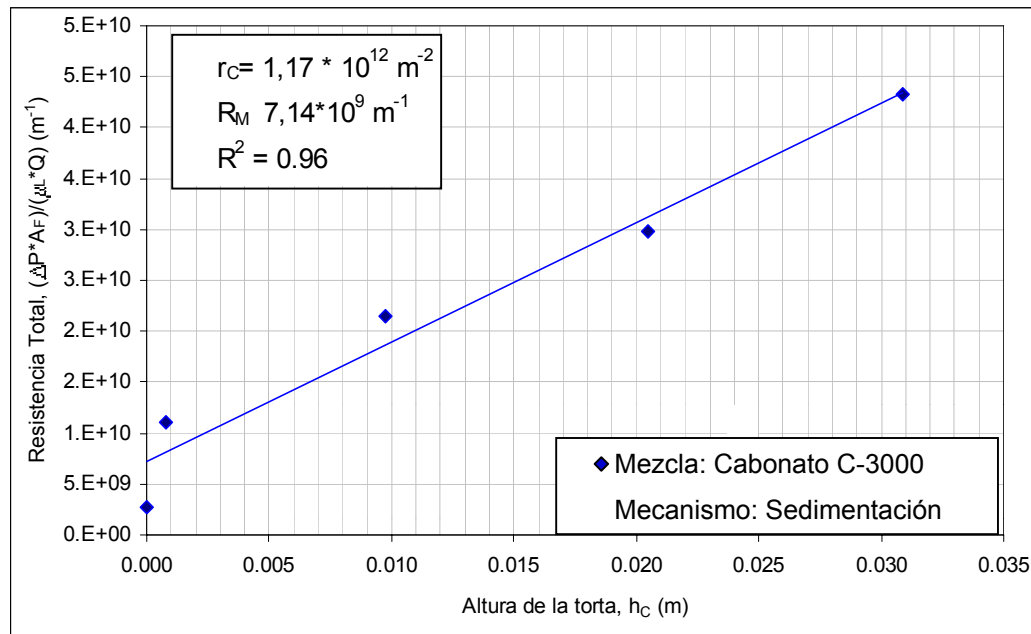


Figura N°45: Resistencia específica de la torta y resistencia del medio filtrante

#### ▪ Permeabilidad de la torta (K)

La permeabilidad se obtiene como el inverso de la resistencia específica de la torta.

$$K = \frac{1}{r_C} = \frac{1}{1,174 \cdot 10^{12} (m^{-2})} \cdot 10^{12} (\mu m^2 / m^2)$$

$$K = 0.852 \mu m^2$$

## APÉNDICE A-2: CÁLCULO DE LA POROSIDAD EXPERIMENTAL

La porosidad de cada torta, se obtiene a partir los valores medidos de altura y masa de torta seca.

### ▪ Masa de la torta seca ( $m_s$ )

Considerando que experimentalmente se toma nota de la masa de la torta seca sobre el plato que la contiene, se estima la masa de la torta seca como:

$$m_s = m_{SP} - m_P = (89,987 - 2,242) (\text{gr}) \cdot 10^{-3} (\text{Kg/gr})$$

$$m_s = 8,775 \cdot 10^{-2} \text{Kg}$$

### ▪ Porosidad de cada torta ( $\varepsilon|_{h_c}$ )

La porosidad de cada torta de altura  $h_c$ , se calcula como:

$$\varepsilon|_{h_c} = 1 - \frac{m_s}{\rho \cdot A_F \cdot h_c} = 1 - \frac{8,775 \cdot 10^{-2} (\text{Kg})}{2930 (\text{Kg/m}^3) \cdot 0,001963 (\text{m}^2) \cdot 3,086 \cdot 10^{-2} (\text{m})}$$

$$\varepsilon|_{h_{c3}} = 0,506$$

### ▪ Porosidad promedio ( $\varepsilon$ )

Con todas las porosidades de cada altura de torta  $h_c$ , se estima un promedio de porosidad para cada mezcla.

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon|_{h_{c0}} + \varepsilon|_{h_{c1}} + \varepsilon|_{h_{c2}} + \varepsilon|_{h_{c4}}}{4} = \frac{0,393 + 0,491 + 0,510 + 0,506}{4}$$

$$\varepsilon = 0,475$$

### APÉNDICE A-3: CÁLCULO DEL TÉRMINO $K \cdot C \cdot \varphi(\varepsilon)$

El término  $K \cdot C \cdot \varphi(\varepsilon)$ , está involucrado en el diagrama permeabilidad - porosidad utilizado para el análisis de los resultados.

#### ▪ Función de la Porosidad ( $\varphi(\varepsilon)$ )

El cálculo que se presenta a continuación se realizó utilizando el modelo de Carman-Kozeny:

$$\varphi(\varepsilon) = \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} = \frac{(1 - 0,475)^2}{0,475^3}$$

$$\varphi(\varepsilon) = 2,574$$

#### ▪ Término $KC(\varphi(\varepsilon))$

Para eje de las “y” del diagrama permeabilidad-porosidad, se calcula:

$$K \cdot C \cdot \varphi(\varepsilon) = 0,852 \cdot 180 \cdot 2,574$$

$$K \cdot C \cdot \varphi(\varepsilon) = 394,418 \mu\text{m}^2$$

## APÉNDICE A-4: CÁLCULO DEL FACTOR DE FORMA

### PARTÍCULA – PORO

El factor de forma partícula-poro ( $\eta_{sv}$ ) definido en este trabajo, se determina a partir del ajuste de los datos en el diagrama permeabilidad-porosidad para cada sustancia y mecanismo de formación de torta.

#### ▪ Ajuste de los datos del diagrama permeabilidad-porosidad

Los datos experimentales del diagrama permeabilidad - porosidad fueron ajustados a una recta paralela a la recta original de Carman-Kozeny, de pendiente es 2, cuyo desplazamiento corresponde al cuadrado del factor de forma partícula - poro.

En la figura N°46, se presenta el factor de forma partícula-poro ( $\eta_{sv}$ ) estimado para tortas de carbonato formadas por el mecanismo de capas compactas

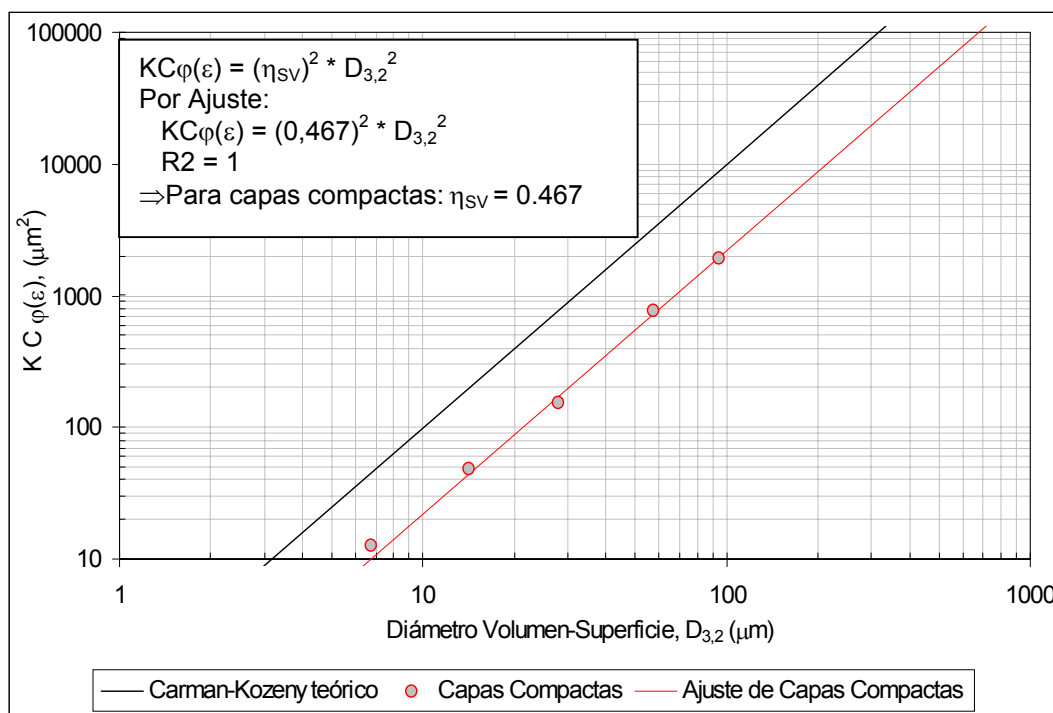


Figura N°46: Ajuste de datos para determinar el factor de forma partícula – poro

## APÉNDICE A-5: CÁLCULO DE LA POROSIDAD POR EL MÉTODO DE YU-STANDISH

Los cálculos realizados para determinar la porosidad de mezclas mediante el método de Yu-Standish están referidos a tortas de lecho poco denso (porued packing) formadas con la mezcla de carbonato C-3000.

### ▪ Determinación de los pseudo 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%, tal como se muestra en la figura N°47

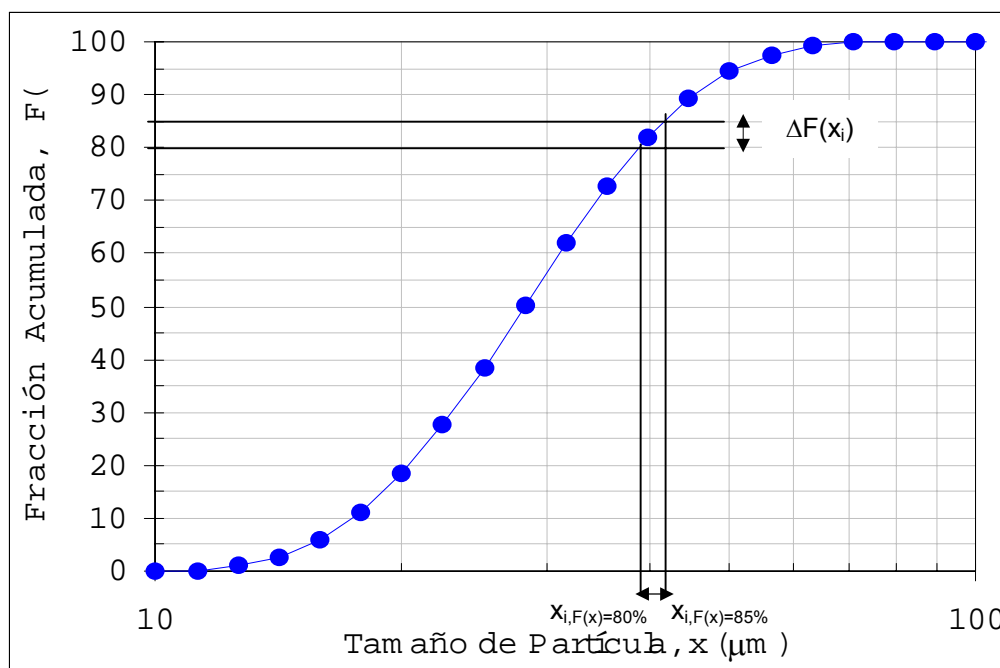


Figura N°47: Pseudo componentes para la mezcla de carbonato C-3000

Los pseudo componentes de la mezcla se ordenan de mayor a menor tamaño (x).



Para el pseudo componente 4 ( $i=4$ ), la fracción ( $F_{vi}$ ) y el diámetro ( $x_i$ ) y, se determina como:

$$F_{vi} = \Delta F(x) = (85 - 80)\% = 5\%$$

$$x_i = \frac{x_{i,(F(x)=85\%)} - x_{i,(F(x)=80\%)}}{2} = \frac{41,92 - 38,96}{2}$$

$$x_4 = 44,40$$

#### ▪ Porosidad individual ( $\varepsilon_i$ )

Para cada pseudo componente, se calculó la porosidad inicial por la ecuación propuesta por Yu-Standish (ec. 4.65), utilizando los parámetros de ajuste ( $a$ ,  $b$ ,  $\varepsilon_0$ ) encontrados en el trabajo de López-Pérez<sup>(14)</sup> para lechos tipo poured packing y tapped packing.

Para el pseudo componente 4 ( $i=4$ ), en lecho tipo poured packing se tiene:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_0 + (1 - \varepsilon_0) \cdot \exp(-a \cdot x_i^b)$$

$$\Rightarrow \varepsilon_4 = 0,5092 + (1 - 0,5092) \cdot \exp(-1,3799 \cdot 40,44^{0,3487})$$

$$\Rightarrow \varepsilon_i = 0,5125$$

#### ▪ Volumen específico individual ( $V_i$ )

Para  $i=4$ , se tiene:

$$V_i = \frac{1}{1 - \varepsilon_i} = \frac{1}{1 - 0,5125} \Rightarrow V_4 = 2,0511$$

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

Para cada pseudo componente (i), se determina la razón de tamaño volumétrico respecto a cada pseudo componente (j).

Para el pseudo componente 4 (i=4), la razón de tamaño volumétrico respecto al pseudo componente 1 (j=1), se determina como:

$$R_{i,j} = \frac{x_i}{x_j} \Rightarrow R_{4,1} = \frac{x_4}{x_1} = \frac{40,44}{70,41}$$

$$R_{4,1} = 0,5743$$

▪ **Razón de empaque ( $r_{i,j}$ )**

Utilizando los parámetros P, encontrados en el trabajo de López-Pérez, para cada tipo de lecho, se determinó la razón de empaque ( $r_{i,j}$ ) para cada pseudo componente (i) respecto al pseudo componente (j)

Para lechos tipo poured packing, la razón de empaque del componente 4 (i=4), respecto al componente 1 (j=1), es:

$$r_{i,j} = R_{i,j}^P = 0,5743^{0,52}$$

$$r_{4,1} = 0,7494$$

▪ **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.

Para  $i < j$ ,  $i=1$  y  $j=4$

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

$$\Rightarrow f(r_{1,4}) = (1 - 0,7494)^{3,33} + 2,81 \cdot 0,7494 \cdot (1 - 0,7494)^{2,77}$$

$$f(r_{1,4}) = 0,0555$$

Para  $i > j$ ;  $i=4$  y  $j=1$

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

$$g(r_{4,1}) = (1 - 0,7494)^{1,97} + 0,36 \cdot 0,7494 \cdot (1 - 0,7494)^{3,67}$$

$$g(r_{4,1}) = 0,0671$$

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

Para el pseudo componente 4 ( $i=4$ ), y el tipo de empaque poured packing, se tiene:

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

$$\Rightarrow V_4^T = \sum_{j=1}^{4-1} [V_j - (V_j - 1) \cdot g(r_{4,j})] \cdot F_{V_j} + V_4 \cdot F_{V_4} + \sum_{j=4+1}^{20} V_j \cdot [1 - f(r_{4,j})] \cdot F_{V_j}$$

$$V_4^T = 1,9613$$

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

Una vez determinados todos los volúmenes específicos de empaque individual para cada pseudo componente ( $V_i^T$ ), se considera el valor máximo de ellos como el volumen específico de la mezcla.

Para la mezcla de carbonato, C-3000 y el tipo de empaque, poured packing, se tiene:

$$V_e = \max.(V_1^T, V_2^T, \dots, V_3^T)$$

$$V_e = \max (1,912; 1,977; 1,994; 2,005; 2,012; 2,017; 2,020; 2,022; 2,022; 2,021; 2,019; 2,015; 2,009; 2,002; 1,992; 1,979; 1,961; 1,937; 1,898; 1,708)$$

$$V_e = 2,022$$

▪ **Porosidad de la mezcla ( $\varepsilon$ )**

$$\varepsilon = 1 - \frac{1}{V_e} = 1 - \frac{1}{2,022}$$

$$\varepsilon = 0,505$$

## ▪ APÉNDICE B: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Los diferentes análisis para determinar la distribución de tamaño de partículas son realizados con el equipo de difracción láser Mastersizer 2000. Las características de estas DTP, se presentan a continuación.

### APÉNDICE B-1: MEZCLAS SELECCIONADAS

**Tabla N°15: Características de la DTP de las mezclas de carbonato de calcio seleccionadas**

Distribución Acumulada F(X) (%)	Nombre de la Mezcla				
	C-9000	C-4500	C-3000	C-45-63	C-75-90
	Tamaño de Partículas x, (μm)				
10,00	4,82	9,30	17,38	41,54	70,85
20,00	5,44	10,96	20,41	46,73	78,94
30,00	5,96	12,41	23,03	51,02	85,27
40,00	6,46	13,81	25,58	54,94	91,43
50,00	6,97	15,27	28,20	58,99	97,59
60,00	7,54	16,89	31,14	63,12	104,31
70,00	8,18	18,78	34,58	68,20	111,45
80,00	8,99	21,20	38,96	74,40	121,05
90,00	10,29	24,79	45,59	83,61	135,50
99,00	13,91	34,13	62,33	107,39	170,77
<b>Diámetro volumen-superficie D<sub>3,2</sub> (μm)</b>	6,73	14,18	27,71	57,07	94,46
<b>Desviación Estándar (σ) (adim)</b>	1,34	1,45	1,45	1,31	1,29

**Tabla N°16: Características de la DTP de las mezclas de esferas de vidrio seleccionadas**

Distribución Acumulada F(X) (%)	Nombre de la Mezcla		
	V-40-70	V-63	V-70-110
	Tamaño de Partículas x, (μm)		
10,00	38,42	50,03	56,38
20,00	44,35	56,30	63,12
30,00	49,26	60,89	68,58
40,00	53,99	65,41	73,89
50,00	58,87	69,90	79,11
60,00	64,07	74,89	84,95
70,00	70,11	80,19	91,37
80,00	77,89	87,06	99,26
90,00	89,12	97,66	111,34
99,00	119,39	123,04	141,37
<b>Diámetro volumen-superficie D<sub>3,2</sub> μm)</b>	55,74	67,63	85,76
<b>Desviación Estándar (σ) (adim)</b>	1,38	1,30	1,31

## APÉNDICE B-2: CORTES DE TORTAS SEDIMENTADAS Y TORTAS POR CAPAS

Tabla N°17: Características de la DTP de los cortes de tortas sedimentadas (mezcla de carbonato C-3000)

Distribución Acumulada F(X) (%)	Corte de la torta							
	N°1	N°2	N°3	N°4	N°5	N°6	N°7	N°8
	Tamaño de Partículas x, (μm)							
10,00	18,94	18,41	18,33	18,92	18,87	18,77	18,49	16,47
20,00	22,27	21,89	21,79	22,28	22,22	22,08	21,69	19,33
30,00	25,10	24,96	24,85	25,15	25,09	24,91	24,46	21,79
40,00	27,84	27,98	27,86	27,94	27,87	27,66	27,16	24,19
50,00	30,72	31,17	31,04	30,87	30,80	30,54	29,97	26,69
60,00	33,89	34,73	34,58	34,12	34,03	33,72	33,05	29,43
70,00	37,60	38,94	38,77	37,93	37,83	37,44	36,64	32,63
80,00	42,33	44,31	44,11	42,80	42,69	42,21	41,25	36,73
90,00	49,33	52,80	52,47	49,98	49,86	49,31	48,27	42,98
99,00	67,50	73,36	72,49	69,04	68,85	67,82	65,79	58,54
<b>Diámetro volumen-superficie D<sub>3,2</sub> (μm)</b>	28,65	28,77	28,63	28,76	28,69	28,46	27,94	24,89
<b>Desviación Estándar (σ) (adim)</b>	1,44	1,49	1,49	1,45	1,45	1,45	1,44	1,44

**Tabla N°18: Características de la DTP de los cortes de tortas formadas por capas (mezcla de carbonato C-3000)**

Distribución Acumulada F(X) (%)	Corte de la torta							
	N°1	N°2	N°3	N°4	N°5	N°6	N°7	N°8
	Tamaño de Partículas x, ( $\mu\text{m}$ )							
10,00	18,63	18,81	18,89	18,96	18,33	18,43	18,92	18,62
20,00	22,19	22,13	22,24	22,33	21,79	21,90	22,23	21,89
30,00	25,08	24,96	25,11	25,20	24,85	24,97	25,05	24,72
40,00	27,88	27,72	27,89	28,00	27,86	27,99	27,79	27,46
50,00	30,76	30,61	30,82	30,94	31,04	31,18	30,66	30,34
60,00	33,91	33,79	34,06	34,19	34,58	34,74	33,82	33,51
70,00	37,64	37,52	37,86	38,00	38,77	38,95	37,51	37,22
80,00	42,30	42,29	42,72	42,88	44,11	44,31	42,21	41,99
90,00	49,23	49,38	49,89	50,04	52,47	52,78	49,20	49,14
99,00	67,52	67,88	68,90	69,08	72,49	73,25	67,24	67,80
<b>Diámetro volumen-superficie <math>D_{3,2}</math> (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	28,55	28,52	28,71	28,82	28,63	28,78	28,59	28,26
<b>Desviación Estándar (<math>\sigma</math>) (adim)</b>	1,44	1,45	1,45	1,45	1,49	1,49	1,44	1,45



## ▪ APÉNDICE C: DATOS EXPERIMENTALES

En esta sección, se presentan los datos requeridos inicialmente para realizar las pruebas experimentales al igual que los datos obtenidos experimentales en las pruebas.

### APÉNDICE C-1: DATOS INICIALES

**Tabla N°19: Datos teóricos**

Dato	Valor
Area de Filtrado ( $m^2$ )	0,00193
Densidad del Líquido ( $Kg/m^3$ )	1000
Densidad del Carbonato de Calcio ( $Kg/m^3$ )	2930
Densidad del Vidrio ( $Kg/m^3$ )	2500
Viscosidad del líquido ( $Kg/m.s$ )	0,01018

**Tabla N°20: Masa de muestra y de líquido para formar las tortas**

Sustancia	Mecanismo de Formación de Torta	Altura de torta supuest. $h_c$ (cm)	Masa de Muestra Inicial $m_i$ (gr)	Masa de Líquido $m_L$ (gr)
Carbonato	Sedimentadas	0,1	2,9	8,8
		1	28,8	88,3
		2	57,5	176,7
		3	86,3	265,0
	Por Capas	0,1	2,9	1,5
		1	28,8	14,7
		2	57,5	29,4
		3	86,3	44,2
Esferas de Vidrio	Sedimentadas	0,1	3,2	11,5
		1	31,9	114,8
		2	63,8	229,7
		3	95,7	344,5
	Por Capas	0,1	3,2	1,9
		1	31,9	19,1
		2	63,8	38,3
		3	95,7	57,4

**APÉNDICE C-2: MASA Y ALTURA DE TORTAS FORMADAS POR  
SEDIMENTACIÓN Y POR CAPAS**

**Tabla N°21: Masa y altura de cada torta de carbonato**

Mezcla	Mecanis. Formac. de Torta	Altura de Torta Supuesta $h_c$ (cm)	Alturas individuales tomadas en cada torta, $h_c$ (mm)					Masa (Torta Seca+ Plato) $m_{SP}$ (gr)	Masa Plato $m_P$ (gr)
			$h_{c,1}$	$h_{c,2}$	$h_{c,3}$	$h_{c,4}$	$h_{c,5}$		
C-9000	Sediment.	0,1	1,08	0,79	0,95	0,84	0,54	5,367	2,582
		1	9,99	10,34	10,49	9,85	9,98	31,267	2,604
		2	20,66	20,87	20,10	20,73	20,02	59,692	2,572
		3	31,20	31,33	31,53	31,70	31,61	87,315	2,238
	Capas Compac.	0,1	0,78	1,06	0,95	0,85	0,93	5,296	2,405
		1	10,23	10,32	10,51	10,32	9,32	31,032	2,236
		2	20,05	20,73	21,54	21,37	20,32	59,496	2,236
		3	32,59	31,02	31,34	30,83	30,90	88,824	2,604
C-4500	Sediment.	0,1	0,39	0,87	0,47	0,37	0,60	4,620	2,414
		1	10,65	10,79	10,73	10,50	10,56	31,140	2,382
		2	22,05	21,90	21,83	22,25	22,12	60,099	2,408
		3	33,36	33,20	34,45	34,22	34,13	88,255	2,395
	Capas Compac.	0,1	0,87	0,69	0,90	0,58	1,20	5,426	2,382
		1	10,82	10,09	9,45	9,73	10,36	30,915	2,395
		2	21,67	21,13	20,25	20,82	21,37	61,048	2,398
		3	32,63	32,04	31,13	31,96	32,63	92,994	2,382

**Tabla N° 21: Masa y altura de cada torta de carbonato (cont.)**

Mezcla	Mecanis. Formac. de Torta	Altura de Torta Supuesta $h_c$ (cm)	Alturas individuales tomadas en cada torta, $h_c$ (mm)					Masa (Torta Seca+ Plato) $m_{SP}$ (gr)	Masa Plato $m_P$ (gr)
			$h_{c,1}$	$h_{c,2}$	$h_{c,3}$	$h_{c,4}$	$h_{c,5}$		
C-3000	Sediment.	0,1	0,60	0,70	0,95	0,80	0,90	5,316	2,560
		1	9,13	10,50	10,20	9,37	9,58	31,168	2,590
		2	20,33	20,59	21,02	19,98	20,36	59,907	2,242
		3	31,24	30,65	30,86	31,10	30,47	89,987	2,242
	Capas Compac.	0,1	0,95	0,83	0,89	0,87	0,93	5,465	2,679
		1	9,72	9,07	9,20	9,37	9,31	31,274	2,368
		2	18,35	18,10	18,50	18,45	18,05	59,083	2,310
		3	30,20	29,85	30,17	30,10	30,26	88,285	2,362
C-45-53	Sediment.	0,1	0,55	0,82	0,95	0,99	0,85	5,431	2,588
		1	8,73	8,52	9,10	9,83	9,07	31,322	2,570
		2	20,69	19,85	20,94	20,97	20,54	60,048	2,567
		3	31,52	30,46	30,05	30,56	30,36	88,736	2,591
	Capas Compac.	0,1	0,48	0,55	1,15	1,23	0,48	4,901	2,604
		1	10,81	8,37	11,29	9,13	9,94	31,045	2,312
		2	19,86	19,88	19,41	19,29	19,46	59,702	2,370
		3	28,96	29,27	28,37	28,89	28,76	88,568	2,310
C-75-90	Sediment.	0,1	0,33	0,73	0,32	0,81	0,92	4,854	2,604
		1	8,73	8,95	9,26	9,23	8,43	30,803	2,580
		2	20,11	19,71	19,97	20,33	20,77	59,997	2,604
		3	30,53	30,99	31,43	30,93	30,45	88,685	2,580
	Capas Compac.	0,1	1,10	0,73	0,89	0,84	0,90	4,854	2,604
		1	10,08	10,45	10,30	9,56	10,26	30,803	2,580
		2	20,26	18,10	19,64	20,11	20,43	59,997	2,604
		3	29,68	29,11	28,03	28,26	29,23	88,685	2,580

**Tabla N°22: Masa y altura de cada torta de esferas de vidrio**

Mezcla	Mecanis. Formac. de Torta	Altura de Torta Supuesta $h_c$ (cm)	Alturas individuales tomadas en cada torta, $h_c$ (mm)					Masa (Torta Seca+ Plato) $m_{SP}$ (gr)	Masa Plato $m_P$ (gr)
			$h_{c,1}$	$h_{c,2}$	$h_{c,3}$	$h_{c,4}$	$h_{c,5}$		
V-40-70	Sediment.	0,1	1,01	1,75	0,75	0,62	0,72	5,562	2,401
		1	9,66	9,60	9,40	9,63	9,78	34,221	2,383
		2	22,34	22,61	22,84	22,26	22,16	66,167	2,401
		3	33,39	34,03	34,19	33,68	33,77	97,600	2,275
	Capas Compac.	0,1	1,24	1,28	1,25	1,29	1,24	5,335	2,398
		1	9,96	10,08	10,22	9,75	10,13	33,653	2,395
		2	20,20	21,49	20,80	20,20	21,33	65,668	2,390
		3	30,13	30,56	30,04	30,63	30,55	97,410	2,394
V-40-70 (*)	Sediment.	0,1	1,10	0,18	0,84	1,38	0,03	4,812	2,407
		1	8,13	8,11	8,27	8,36	8,73	26,628	2,381
		2	16,70	16,79	19,99	17,37	17,33	51,357	2,390
		3	25,54	25,95	26,37	26,44	25,43	76,063	2,407
	Capas Compac.	0,1	0,87	1,71	1,27	0,75	0,62	4,797	2,393
		1	8,45	9,39	8,68	7,39	10,31	26,803	2,312
		2	15,86	16,06	15,71	16,22	16,67	51,199	2,312
		3	23,89	24,89	25,29	23,75	24,62	75,507	2,312
V-70-110	Sediment.	0,1	1,20	0,75	1,32	0,87	0,96	5,589	2,392
		1	11,62	11,02	11,72	11,63	11,97	34,356	2,532
		2	22,27	22,43	22,20	21,98	22,62	66,027	2,392
		3	32,53	32,59	32,83	32,85	33,57	98,153	2,532
	Capas Compac.	0,1	1,15	1,05	1,69	0,92	1,46	5,501	2,532
		1	10,69	11,30	11,38	11,68	11,88	33,922	2,604
		2	20,98	21,13	21,34	21,01	20,81	65,858	2,532
		3	31,68	31,40	30,70	30,46	31,16	97,637	2,604

(\*) Pruebas utilizando como medio filtrante el SK009, el cual es diferente al usado en el resto de las pruebas con esferas de vidrio, que es el W-030.

**Tabla N°22: Masa y altura de tortas de esferas de vidrio (cont.)**

Mezcla	Mecanis. Formac. de Torta	Altura de Torta Supuesta $h_c$ (cm)	Alturas individuales tomadas en cada torta, $h_c$ (mm)					Masa (Torta Seca+ Plato) $m_{SP}$ (gr)	Masa Plato $m_P$ (gr)
			$h_{c,1}$	$h_{c,2}$	$h_{c,3}$	$h_{c,4}$	$h_{c,5}$		
V-63	Sediment.	0,1	1,10	1,23	0,95	1,38	1,11	5,404	2,390
		1	9,92	9,64	9,33	10,12	9,83	33,207	2,414
		2	21,20	21,57	22,12	21,61	21,87	65,033	2,380
		3	33,09	34,41	33,89	34,19	33,22	97,874	2,390
	Capas Compac.	0,1	1,43	0,86	0,75	0,96	1,20	4,746	2,312
		1	10,58	10,30	8,46	11,03	11,72	33,207	2,414
		2	20,80	21,81	20,25	19,96	18,62	65,033	2,380
		3	30,06	29,95	33,43	32,78	31,41	97,874	2,390

### APÉNDICE C-3: MASA DE FILTRADO A TRAVÉS LAS TORTAS

Tabla N°23: Masa de filtrado a través de tortas de carbonato: C-9000

Tiempo t (seg)	Masa de Filtrado, m <sub>LF</sub> (gr)									
	Torta Sedimentada					Torta Por Capas				
	Torta de altura h <sub>c</sub>									
	h <sub>c</sub> =0	h <sub>c0</sub>	h <sub>c1</sub>	h <sub>c2</sub>	h <sub>c3</sub>	h <sub>c</sub> =0	h <sub>c0</sub>	h <sub>c1</sub>	h <sub>c2</sub>	h <sub>c3</sub>
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	10,1	2,9	1,3	3,2	1,1	61,5	3,5	0,2	0,2	0,1
2	22,7	7,2	3,0	4,2	2,3	119,0	9,9	0,3	0,4	0,3
3	32,4	11,0	6,0	5,0	2,4		15,9	0,5	0,6	0,5
4	41,2	15,8	8,6	6,1	2,7		21,9	0,7	0,8	0,7
5	50,6	20,3	10,7	7,5	3,0		27,5	0,9	1,0	0,9
6	59,4	25,5	12,5	9,1	3,5		33,5	1,5	1,2	1,1
7	66,6	30,1	15,0	10,3	4,0		38,7	2,2	1,4	1,2
8	74,7	35,4	17,0	11,8	4,3		43,9	3,1	1,6	1,4
9	80,5	39,7	19,1	12,7	4,8		49,3	4,1	1,8	1,6
10	86,9	44,9	20,8	13,6	5,5		54,3	4,8	2,1	1,8
11	98,0	49,2	22,5	14,3	6,3		59,7	5,6	2,3	2,0
12		54,3	24,4	15,3	6,9		64,3	6,0	2,5	2,2
13		58,6	25,9	16,6	7,5		70,0	6,6	2,7	2,4
14		63,6	27,8	17,8	8,1		74,5	7,0	2,9	2,5
15		67,8	29,0	18,7	8,5		79,0	7,5	3,1	2,7
16		72,7	30,3	19,6	9,1		84,0	8,3	3,3	2,9
17		77,0	32,2	20,6	10,3		89,1	8,8	3,5	3,1
18		81,9	33,8	21,5	10,8		92,5	9,5	3,7	3,3
19		85,9	35,2	22,1	11,5			10,1	4,0	3,5
20		90,5	36,9	23,5	11,9			10,6	4,2	3,6
25			42,9	27,4	14,2			13,4	5,2	4,6
30			48,1	31,3	17,4			16,7	6,3	5,5
35			53,5	35,6	19,5			19,8	7,3	6,4
40			58,4	38,9	22,6			22,9	8,4	7,3
45			63,6	42,4	25,6			26,1	9,4	8,3
50			67,4	45,8	27,7			29,0	10,5	9,2
55			71,4	49,2	31,0			32,1	11,5	10,1
60			76,0	52,2	33,1			35,2	12,6	11,0
65				55,4	35,4			38,6	13,7	12,0
70				58,3	36,9			41,3	14,7	12,9
75				61,0	38,9			44,6	15,8	13,8
80				64,1	41,1			47,1	16,8	14,7
85				66,5	43,0			50,6	17,9	15,6
90				69,6	45,1			53,9	18,9	16,6
95				71,8	48,2			57,1	20,0	17,5

Tabla N° 23: Masa de filtrado a través de tortas de  $\text{CaCO}_3$ : C-9000 (cont.)

Tiempo t (seg)	Masa de Filtrado, m <sub>LF</sub> (gr)									
	Torta Sedimentada					Torta Por Capas				
	Torta de altura h <sub>c</sub>									
	h <sub>c</sub> =0	h <sub>c0</sub>	h <sub>c1</sub>	h <sub>c2</sub>	h <sub>c3</sub>	h <sub>c</sub> =0	h <sub>c0</sub>	h <sub>c1</sub>	h <sub>c2</sub>	h <sub>c3</sub>
100				74,3	49,6			60,0	21,0	18,4
110				79,7	53,8			65,9	23,1	20,3
120				84,4	58,3			72,6	25,3	22,1
130				88,8	61,6			78,1	27,4	24,0
140				93,8	64,1			84,9	29,5	25,8
150				98,0	68,8			90,1	31,6	27,7
160					71,2			95,9	33,7	29,5
170					75,6				35,8	31,3
180					78,0				37,9	33,2
190					81,9				40,0	35,0
200					84,5				42,1	36,9
210					88,3				44,2	38,7
220					91,0				46,3	40,6
230					94,0				48,5	42,4
240					97,0				50,6	44,3
250					99,1				52,7	46,1
260									54,8	48,0
270									56,9	49,8
280									59,0	51,7
290									61,1	53,5
300									63,2	55,4
310									65,3	57,2
320									67,4	59,0
330									69,5	60,9
340									71,7	62,7
350									73,8	64,6
360									75,9	66,4
370									78,0	68,3
380									80,1	70,1
390									82,2	72,0
400									84,3	73,8
410									86,4	75,7
420									88,5	77,5
430										79,4
440										81,2
450										83,1
460										84,9
470										86,7
480										88,6
490										90,4
500										92,3

Tabla N°24: Masa de filtrado a través de tortas de carbonato: C-4500

Tiempo t (seg)	Masa de Filtrado, m <sub>LF</sub> (gr)									
	Torta Sedimentada					Torta Por Capas				
	Torta de altura h <sub>c</sub>									
	h <sub>c</sub> =0	h <sub>c0</sub>	h <sub>c1</sub>	h <sub>c2</sub>	h <sub>c3</sub>	h <sub>c</sub> =0	h <sub>c0</sub>	h <sub>c1</sub>	h <sub>c2</sub>	h <sub>c3</sub>
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	39,0	3,6	0,2	1,8	0,9	34,0	9,8	1,4	0,7	0,5
2	64,4	21,3	2,3	3,5	3,3	87,0	19,7	2,8	1,4	1,0
3	85,7	35,8	4,6	5,3	5,0	135,2	29,6	4,3	2,1	1,5
4	102,4	49,1	7,1	6,1	6,8		39,4	5,7	2,8	2,0
5		66,2	8,9	8,3	8,6		49,3	7,1	3,5	2,6
6		80,9	11,5	10,1	10,4		59,2	8,5	4,2	3,1
7		95,5	14,2	12,1	12,1		69,0	9,9	4,9	3,6
8		111,9	16,9	13,8	13,6		78,9	11,4	5,6	4,1
9			19,7	15,8	15,3		88,8	12,8	6,3	4,7
10			22,9	17,4	16,7		98,7	14,2	7,0	5,2
11			25,5	19,3	18,1		108,5	15,6	7,7	5,7
12			28,4	20,9	19,7			17,0	8,4	6,2
13			31,7	22,6	21,3			18,5	9,1	6,8
14			34,9	24,2	22,7			19,9	9,8	7,3
15			37,1	26,0	24,0			21,3	10,5	7,8
16			40,4	27,5	25,4			22,7	11,2	8,3
17			42,9	29,3	26,9			24,1	11,9	8,9
18			45,7	30,8	28,2			25,6	12,6	9,4
19			48,6	32,5	29,5			27,0	13,3	9,9
20			51,6	34,1	30,8			28,4	14,0	10,4
25			65,5	42,7	37,3			35,5	17,5	13,0
30			79,5	50,8	43,4			42,3	21,0	15,7
35			93,0	59,4	49,1			49,8	24,5	18,3
40				67,9	54,9			56,8	28,1	20,9
45				76,4	60,8			63,9	31,6	23,5
50				84,8	66,5			71,0	35,1	26,1
55				93,1	72,3			78,1	38,6	28,7
60				101,0	78,0			85,2	42,1	31,4
65					83,7			92,3	45,6	34,0
70					89,5			99,4	49,1	36,6
75					95,2				52,6	39,2
80					100,8				56,2	41,8
85									59,7	44,5
90									63,2	47,1
95									66,7	49,7
100									70,2	52,3
105									73,7	54,9
110									77,2	57,5
115									80,7	60,2



**Tabla N° 24: Masa de filtrado a través de tortas de  $\text{CaCO}_3$ : C-4500 (cont.)**

Tiempo t (seg)	Masa de Filtrado, $m_{LF}$ (gr)									
	Torta Sedimentada					Torta Por Capas				
	Torta de altura $h_c$									
	$h_c=0$	$h_{c0}$	$h_{c1}$	$h_{c2}$	$h_{c3}$	$h_c=0$	$h_{c0}$	$h_{c1}$	$h_{c2}$	$h_{c3}$
120									84,3	62,8
125									87,8	65,4
130									91,3	68,0
135									94,8	70,6
140									98,3	73,3
145										75,9
150										78,5
155										81,1
160										83,7
165										86,3
170										89,0
175										91,6
180										94,2
185										96,8
190										99,4

Tabla N°25: Masa de filtrado a través de tortas de carbonato: C-3000

Tiempo t (seg)	Masa de Filtrado, m <sub>LF</sub> (gr)									
	Torta Sedimentada					Torta Por Capas				
	Torta de altura h <sub>c</sub>									
	h <sub>C</sub> =0	h <sub>C0</sub>	h <sub>C1</sub>	h <sub>C2</sub>	h <sub>C3</sub>	h <sub>C</sub> =0	h <sub>C0</sub>	h <sub>C1</sub>	h <sub>C2</sub>	h <sub>C3</sub>
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	20,8	10,3	3,1	2,8	2,1	38,9	8,2	0,8	1,1	1,5
2	69,0	19,3	6,0	6,0	4,3	84,1	20,1	2,4	2,7	1,9
3	104,6	29,2	10,5	9,3	6,6	126,8	33,2	6,0	3,9	2,2
4		38,7	15,3	12,5	8,8		44,3	8,6	5,0	2,6
5		47,1	19,5	15,7	11,0		55,4	12,0	5,9	3,8
6		55,2	23,8	19,0	13,3		67,8	14,6	7,3	4,9
7		64,1	28,7	22,2	15,5		80,0	17,8	9,1	5,9
8		71,8	33,7	25,4	17,7		90,7	20,9	10,9	7,2
9		80,7	37,7	28,6	19,9		101,2	23,6	12,4	8,3
10		88,4	42,7	31,9	22,2			26,2	14,0	9,2
11		96,7	47,1	35,1	24,4			29,6	15,5	10,0
12			51,3	38,3	26,6			32,0	16,9	10,9
13			56,1	41,6	28,9			35,0	19,0	11,9
14			60,9	44,8	31,1			37,9	20,9	12,9
15			64,9	48,0	33,3			40,9	22,3	14,2
16			69,4	51,3	35,6			44,1	24,2	15,1
17			74,1	54,5	37,8			46,9	25,7	15,9
18			78,8	57,7	40,0			49,7	27,1	17,0
19			83,2	60,9	42,2			52,7	29,4	18,4
20			87,4	64,2	44,5			55,4	31,6	19,2
21			92,1	67,4	46,7			58,6	33,1	20,3
22			96,5	70,6	48,9			61,7	34,7	21,2
23				73,9	51,2			64,4	36,0	22,1
24				77,1	53,4			67,4	37,7	22,8
25				80,3	55,6			70,5	39,2	24,6
26				83,6	57,9			73,3	40,7	25,4
27				86,8	60,1			76,2	43,0	26,4
28				90,0	62,3			79,0	44,7	27,1
29				93,2	64,5			82,2	46,6	28,2
30				96,5	66,8			84,7	48,3	28,9
31				99,7	69,0			87,9	50,0	29,6
32					71,2			91,0	51,7	30,1
33					73,5			93,6	53,3	30,5
34					75,7			97,0	54,9	31,5
35					77,9			99,7	56,6	32,6
36					80,2			102,7	58,6	33,5
37					82,4				60,1	34,5
38					84,6				61,4	35,6
39					86,8				63,4	36,5

Tabla N° 25: Masa de filtrado a través de tortas de  $\text{CaCO}_3$ : C-3000 (cont.)

Tiempo t (seg)	Masa de Filtrado, m <sub>LF</sub> (gr)									
	Torta Sedimentada					Torta Por Capas				
	Torta de altura h <sub>c</sub>									
	h <sub>c</sub> =0	h <sub>c0</sub>	h <sub>c1</sub>	h <sub>c2</sub>	h <sub>c3</sub>	h <sub>c</sub> =0	h <sub>c0</sub>	h <sub>c1</sub>	h <sub>c2</sub>	h <sub>c3</sub>
40					89,1				65,4	37,5
41					91,3				67,1	38,5
42					93,5				68,8	39,6
43					95,8				70,4	40,5
44					98,0				71,8	41,6
45					100,2				74,2	42,5
46									75,7	43,5
47									77,3	44,4
48									78,9	45,3
49									80,1	46,2
50									81,7	47,3
55									90,7	52,3
60									99,2	57,2
65										61,9
70										66,9
75										71,8
80										76,8
85										81,7
90										85,9
95										90,6
100										95,3
101										96,2
102										97,3
103										98,3
105										99,4

Tabla N°26: Masa de filtrado a través de tortas de carbonato: C-45-53

Tiempo t (seg)	Masa de Filtrado, m <sub>LF</sub> (gr)									
	Torta Sedimentada					Torta Por Capas				
	Torta de altura h <sub>c</sub>									
	h <sub>c</sub> =0	h <sub>c0</sub>	h <sub>c1</sub>	h <sub>c2</sub>	h <sub>c3</sub>	h <sub>c</sub> =0	h <sub>c0</sub>	h <sub>c1</sub>	h <sub>c2</sub>	h <sub>c3</sub>
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	40,7	28,9	6,1	0,6	1,2	41,1	30,4	3,8	3,4	0,9
2	74,4	54,9	14,6	5,8	5,6	80,8	62,7	13,9	8,7	2,5
3	110,1	83,9	26,5	12,2	11,7	112,8	90,2	23,0	14,5	5,6
4		108,7	37,0	19,8	17,5		120,8	31,8	19,3	9,0
5			49,0	27,4	24,5			41,1	24,2	11,9
6			61,0	34,1	30,2			50,5	30,2	15,5
7			71,4	41,9	37,1			60,8	34,8	19,0
8			83,4	48,5	43,0			70,2	40,5	22,6
9			93,8	56,3	47,4			80,6	45,7	25,4
10			105,7	63,2	54,2			89,9	51,5	29,0
11				71,0	61,2			100,4	56,5	32,4
12				77,7	67,2				62,3	36,3
13				85,6	74,1				67,4	39,9
14				92,4	81,0				72,9	43,5
15				100,0	87,1				78,2	46,5
16					93,1				83,9	50,2
17					99,1				88,6	53,3
18									94,9	57,0
19									101,1	60,9
20										63,9
21										67,0
22										70,7
23										74,1
24										77,7
25										80,8
26										84,7
27										88,1
28										91,5
29										94,8
30										98,5
31										101,7

Tabla N°27: Masa de filtrado a través de tortas de carbonato: C-75-90

Tiempo t (seg)	Masa de Filtrado, $m_{LF}$ (gr)									
	Torta Sedimentada					Torta Por Capas				
	Torta de altura $h_c$									
	$h_c=0$	$h_{c0}$	$h_{c1}$	$h_{c2}$	$h_{c3}$	$h_c=0$	$h_{c0}$	$h_{c1}$	$h_{c2}$	$h_{c3}$
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	41,2	4,5	14,1	14,4	6,0	38,0	15,2	6,9	8,9	3,6
2	71,4	31,0	32,5	30,3	16,1	72,7	36,0	18,0	17,5	12,5
3	100,9	55,5	52,9	44,1	27,0	100,4	57,5	31,7	27,2	20,7
4		75,0	72,7	59,9	36,7		79,6	42,0	35,8	29,1
5		95,5	89,7	73,5	45,9		99,5	55,3	45,6	38,7
6				89,1	55,0			67,0	54,2	48,3
7					65,4			80,2	63,9	56,8
8					74,3			93,4	73,6	65,1
9					84,7			104,8	82,0	74,7
10					93,5				90,6	83,2
11									100,4	92,7
12										101,1

Tabla N°28: Masa de filtrado a través de tortas de esferas de vidrio: V-40-70

Tiempo t (seg)	Masa de Filtrado, m <sub>LF</sub> (gr)									
	Torta Sedimentada					Torta Por Capas				
	Torta de altura h <sub>c</sub>									
	h <sub>C</sub> =0	h <sub>C0</sub>	h <sub>C1</sub>	h <sub>C2</sub>	h <sub>C3</sub>	h <sub>C</sub> =0	h <sub>C0</sub>	h <sub>C1</sub>	h <sub>C2</sub>	h <sub>C3</sub>
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	72,7	0,3	0,4	0,6	0,6	74,9	12,3	4,0	3,6	3,2
2	167,7	13,0	2,4	1,3	2,4	147,8	57,6	8,7	5,5	4,5
3		53,6	5,5	3,9	4,9		94,7	12,7	7,8	5,7
4		87,1	9,9	7,6	7,0		129,3	17,8	10,0	7,0
5		118,1	12,4	10,6	9,2			21,9	11,9	8,4
6			17,3	14,2	11,6			26,7	14,0	9,6
7			21,7	17,4	13,5			31,2	16,3	10,7
8			25,7	21,1	15,8			35,9	18,4	12,0
9			29,4	24,1	18,1			39,9	20,5	13,4
10			33,6	27,6	20,3			44,8	22,7	14,5
11			37,7	31,1	22,2			49,4	24,7	15,8
12			41,1	33,9	24,4			53,5	26,7	17,1
13			45,0	37,0	26,6			57,6	28,9	18,3
14			48,4	40,2	28,6			62,3	31,2	19,5
15			51,6	43,0	30,4			66,4	33,1	20,8
16			55,1	46,1	32,7			71,2	35,3	21,9
17			58,2	48,8	34,8			75,3	37,5	23,3
18			61,6	51,8	36,6			80,0	39,7	24,6
19			64,3	54,5	38,4			84,0	41,8	26,0
20			67,7	57,5	40,4			88,6	44,0	27,2
21			70,4	60,2	42,2			93,1	45,7	28,4
22			73,3	63,1	44,6			97,4	47,9	29,7
23			76,4	65,6	46,5			101,3	50,1	31,1
24			78,9	68,5	48,3				52,2	32,3
25			81,3	70,9	49,9				54,2	33,5
26			84,1	73,7	51,9				56,4	34,7
27			86,4	76,2	53,7				58,3	35,9
28			89,1	78,9	55,4				60,5	37,2
29			91,3	81,1	57,2				62,6	38,5
30				83,9	59,0				64,8	39,6
31				86,1	60,6				66,7	40,9
32				88,8	62,3				68,6	42,1
33				91,0	64,2				70,6	43,4
34				93,6	65,6				73,0	44,7
35				96,0	67,1				74,9	45,8
36				98,3	68,8				76,9	47,0
37				100,9	70,4				79,0	48,3
38					71,8				81,0	49,4
39					74,0				82,9	50,7

Tabla N°28: Masa de filtrado a través de tortas de esferas: V-40-70(cont.)

Tiempo t (seg)	Masa de Filtrado, m <sub>LF</sub> (gr)									
	Torta Sedimentada					Torta Por Capas				
	Torta de altura h <sub>c</sub>									
	h <sub>c</sub> =0	h <sub>c0</sub>	h <sub>c1</sub>	h <sub>c2</sub>	h <sub>c3</sub>	h <sub>c</sub> =0	h <sub>c0</sub>	h <sub>c1</sub>	h <sub>c2</sub>	h <sub>c3</sub>
40				75,4					85,1	51,9
41				77,0					87,2	53,2
42				78,4					89,2	54,4
43				79,9					91,1	55,7
44				81,5					93,3	57,0
45				82,8					95,1	58,1
46				84,5					97,2	59,4
47				85,9					99,3	60,6
48				87,5					101,2	61,9
49				88,8						63,0
50				90,3						64,4
51				91,7						65,5
52				93,3						66,9
53				94,5						68,0
54				96,1						69,3
55				97,4						70,5
56				98,9						71,9
57				100,1						73,2
58										74,4
59										75,5
60										76,8
61										78,1
62										79,3
63										80,4
64										81,8
65										82,9
66										84,3
67										85,4
68										86,7
69										88,1
70										89,2
71										90,6
72										91,7
73										92,8
74										94,2
75										95,4
76										96,6
77										98,0
78										99,1
79										100,3

**Tabla N°29: Masa de filtrado a través de tortas de esferas de vidrio: V-40-70  
utilizando un medio filtrante diferente (SK009)**

Tiempo t (seg)	Masa de Filtrado, $m_{LF}$ (gr)				
	Torta Sedimentada				
	Torta de altura $h_c$				
	$h_c=0$	$h_{c0}$	$h_{c1}$	$h_{c2}$	$h_{c3}$
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	22,7	1,2	0,6	0,4	0,3
2	46,2	1,8	1,9	1,0	0,5
3	69,7	2,8	4,1	1,8	0,6
4	87,4	5,1	5,5	2,9	0,8
5	104,8	7,5	6,9	4,0	1,0
6		9,8	8,3	5,0	1,1
7		11,6	9,7	6,0	1,6
8		13,7	11,0	7,0	2,3
9		15,4	12,7	7,7	3,0
10		17,3	14,6	8,4	4,1
11		18,9	15,7	9,2	4,8
12		20,6	17,1	10,2	5,7
13		22,2	18,7	10,8	6,2
14		23,8	19,9	11,6	6,7
15		25,3	21,1	12,1	7,3
16		26,7	22,2	13,6	8,0
17		28,0	23,3	14,3	8,6
18		29,5	24,9	14,9	9,2
19		30,8	26,7	15,7	9,8
20		32,0	28,0	16,2	10,3
21		33,2	29,2	16,8	10,8
22		34,4	30,3	17,7	11,4
23		35,7	31,3	18,4	12,0
24		36,8	32,8	19,0	12,5
25		37,7	34,2	19,7	13,1
26		38,9	35,5	20,3	13,6
27		40,0	36,6	20,9	14,2
28		41,1	37,5	21,4	14,7
29		42,1	38,8	22,1	15,2
30		43,2	39,9	22,6	15,8
31		44,1	41,0	23,2	16,3
32		45,0	42,2	23,8	16,8
33		46,0	43,3	24,4	17,1
34		47,0	44,3	25,0	17,7
35		47,9	45,6	25,6	18,4
36		48,7	47,0	26,2	19,2
37		49,6	48,3	26,8	19,6
38		50,6	49,2	27,2	20,2



**Tabla N° 29: Masa de filtrado a través de tortas de esferas de vidrio:**  
**V-40-70, utilizando un medio filtrante diferente (SK009) (cont.)**

Tiempo t (seg)	Masa de Filtrado, $m_{LF}$ (gr)				
	Torta Sedimentada				
	Torta de altura $h_c$				
	$h_c=0$	$h_{c0}$	$h_{c1}$	$h_{c2}$	$h_{c3}$
39		51,3	50,2	27,6	20,6
40		52,1	51,2	28,3	21,3
41		53,1	52,1	28,8	21,6
42		53,8	53,2	29,3	22,1
43		54,6	54,6	30,0	22,6
44		55,7	55,5	30,5	23,1
45		56,4	56,3	31,1	23,5
46		57,1	57,8	31,7	24,0
47		58,0	58,9	32,2	24,5
48		58,9	60,0	32,7	25,0
49		59,5	61,0	33,3	25,5
50		60,4	61,9	33,9	26,1
51		61,3	63,0	34,4	26,5
52		61,9	64,1	34,9	27,1
53		62,7	64,9	35,5	27,5
54		63,4	66,0	36,0	28,1
55		64,0	66,7	36,4	28,6
56		64,7	68,0	37,0	29,0
57		65,4	69,2	37,4	29,4
58		66,0	70,4	37,8	29,9
59		66,7	71,5	38,5	30,4
60		67,4	72,3	38,9	30,7
65		70,9	76,8	41,4	33,0
70		75,2	82,2	43,7	35,4
75		78,2	86,3	46,0	37,5
80		80,9	91,3	48,3	39,7
85		83,7	95,5	50,5	41,8
90		86,2	100,0	52,6	43,9
95		88,6		54,9	45,9
100		91,0		56,8	48,0
120		100,0		64,7	56,0
140				72,1	63,9
160				79,0	71,1
180				85,6	78,3
200				91,9	85,3
220				97,8	92,0
240					98,7

Tabla N°30: Masa de filtrado a través de tortas de esferas de vidrio: V-63

Tiempo t (seg)	Masa de Filtrado, m <sub>LF</sub> (gr)									
	Torta Sedimentada					Torta Por Capas				
	Torta de altura h <sub>c</sub>									
	h <sub>C</sub> =0	h <sub>C0</sub>	h <sub>C1</sub>	h <sub>C2</sub>	h <sub>C3</sub>	h <sub>C</sub> =0	h <sub>C0</sub>	h <sub>C1</sub>	h <sub>C2</sub>	h <sub>C3</sub>
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	75,5	4,0	4,7	5,4	4,9	75,8	13,3	2,1	2,2	2,2
2	161,6	71,0	14,5	13,0	9,9	132,2	65,8	4,1	3,6	4,3
3		136,8	26,7	20,1	14,8		101,2	13,7	7,1	6,5
4			40,5	28,2	19,7			23,3	10,3	8,7
5			52,4	35,4	24,6			34,2	15,7	10,8
6			67,6	43,6	29,6			45,2	19,4	13,0
7			79,3	50,7	34,5			55,0	24,3	15,2
8			91,1	58,6	39,4			64,7	28,9	17,4
9				66,9	44,4			75,8	32,9	19,5
10				73,8	49,3			85,2	37,6	21,7
11				80,9	54,2			96,2	42,7	23,9
12				88,9	59,2				47,0	26,0
13				96,0	64,1				52,2	28,2
14					69,0				55,6	30,4
15					73,9				60,7	32,5
16					78,9				66,0	34,7
17					83,8				70,3	36,9
18					88,7				74,8	39,0
19					93,7				78,9	41,2
20					98,6				83,5	43,4
21									88,5	45,5
22									93,0	47,7
23									98,1	49,9
24										52,1
25										54,2
26										56,4
27										58,6
28										60,7
29										62,9
30										65,1
31										67,2
32										69,4
33										71,6
34										73,7
35										75,9
36										78,1
37										80,2
38										82,4
39										84,6
40										86,8

**Tabla N° 30: Masa de filtrado a través de tortas de esferas de vidrio:  
V-63 (cont.)**

Tiempo t (seg)	Masa de Filtrado, m <sub>LF</sub> (gr)									
	Torta Sedimentada					Torta Por Capas				
	Torta de altura h <sub>c</sub>									
	h <sub>c</sub> =0	h <sub>c0</sub>	h <sub>c1</sub>	h <sub>c2</sub>	h <sub>c3</sub>	h <sub>c</sub> =0	h <sub>c0</sub>	h <sub>c1</sub>	h <sub>c2</sub>	h <sub>c3</sub>
41										88,9
42										91,1
43										93,3
44										95,4
45										97,6
46										99,8

**Tabla N°31: Masa de filtrado a través de tortas de esferas de V.: V-70-110**

Tiempo t (seg)	Masa de Filtrado, m <sub>LF</sub> (gr)									
	Torta Sedimentada					Torta Por Capas				
	Torta de altura h <sub>c</sub>									
	h <sub>c</sub> =0	h <sub>c0</sub>	h <sub>c1</sub>	h <sub>c2</sub>	h <sub>c3</sub>	h <sub>c</sub> =0	h <sub>c0</sub>	h <sub>c1</sub>	h <sub>c2</sub>	h <sub>c3</sub>
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	110,4	40,6	16,4	8,1	1,4	86,0	48,0	14,5	3,8	3,1
2	212,3	114,1	31,1	18,7	9,1	190,0	96,4	30,3	10,5	7,5
3		177,3	51,7	29,5	18,1		153,0	44,1	16,9	11,3
4			72,9	41,7	26,1			59,8	23,9	16,1
5			91,4	52,5	34,1			73,3	30,0	20,1
6			112,4	64,6	42,0			88,8	37,2	24,5
7				75,3	51,0			102,1	43,4	29,0
8				87,4	60,0				49,6	34,1
9				97,9	67,7				56,6	38,0
10					76,7				62,8	42,1
11					84,5				69,7	46,7
12					93,4				75,9	51,6
13									82,8	55,8
14									88,8	59,9
15									95,7	64,4
16									101,8	68,6
17										73,4
18										77,4
19										81,7
20										86,3
21										90,4
22										94,3
23										98,9
24										103,2

## ▪ APÉNDICE D: RESULTADOS

En esta sección, se presentan datos de los resultados obtenidos durante esta investigación.

### APÉNDICE D-1: RESULTADOS DE PERMEABILIDAD

**Tabla N°32: Comparación de los modelos de permeabilidad**

Modelo de Permeabilidad	Porosidad Simulada $\varepsilon$ (adim)	Constante (C) (adim)	Función de porosidad $\varphi(\varepsilon)$ (adim)	Grupo $C*\varphi(\varepsilon)$
Carman-Kozeny	0,2	180	80,00	14400,00
	0,3		18,15	3266,67
	0,4		5,63	1012,50
	0,5		2,00	360,00
	0,6		0,74	133,33
	0,7		0,26	47,23
Rumpf-Gupte	0,2	5,6	6987,71	39131,19
	0,3		751,33	4207,47
	0,4		154,41	864,69
	0,5		45,25	253,43
	0,6		16,60	92,97
	0,7		7,11	39,82
Molerus-Rumpf-Palh	0,2	22,4	1211,72	27142,60
	0,3		167,57	3753,57
	0,4		38,80	869,01
	0,5		11,71	262,36
	0,6		4,09	91,56
	0,7		1,52	34,05
Happel-Brenner	0,2	18	706,83	12723,01
	0,3		161,30	2903,48
	0,4		51,07	919,25
	0,5		18,95	341,17
	0,6		7,57	136,19
	0,7		3,04	54,73

**Tabla N°33: Resultados intermedios involucrados en el cálculo  
de la permeabilidad**

Mezcla	Mecanis. de Formación de Torta	Altura promedio $h_c \cdot 10^3$ (m)	Flujo Másico Filtrado ( $\bar{m}=m_{FL}/t$ ) (gr/s)	Caudal Filtrado $Q \cdot 10^6$ (m <sup>3</sup> /s)	Resistenc. Total $\Delta P \cdot A_F / \mu_L \cdot Q$ (m <sup>-1</sup> )	Resistenc. Específica de la torta $r_c$ (m <sup>-2</sup> )	Resistenc. del Medio $R_M$ (m <sup>-1</sup> )
C-9000	Sediment.	0,000	8,637	8,637	$2,232 \cdot 10^7$	$1,491 \cdot 10^{10}$	$2,201 \cdot 10^7$
		0,840	4,601	4,601	$4,191 \cdot 10^7$		
		10,130	1,169	1,169	$1,650 \cdot 10^8$		
		20,476	0,600	0,600	$3,214 \cdot 10^8$		
		31,474	0,388	0,388	$4,974 \cdot 10^8$		
	Por Capas	0,000	59,500	59,500	$2,593 \cdot 10^9$	$2,860 \cdot 10^{13}$	$8,619 \cdot 10^9$
		0,914	5,250	5,250	$2,938 \cdot 10^{10}$		
		10,140	0,613	0,613	$2,517 \cdot 10^{11}$		
		20,802	0,211	0,211	$7,315 \cdot 10^{11}$		
		31,336	0,185	0,185	$8,354 \cdot 10^{11}$		
C-4500	Sediment.	0,000	25,150	25,150	$6,134 \cdot 10^9$	$3,5510 \cdot 10^{12}$	$1,046 \cdot 10^{10}$
		0,540	14,548	14,548	$1,060 \cdot 10^{10}$		
		10,646	2,774	2,774	$5,561 \cdot 10^{10}$		
		22,030	1,684	1,684	$9,161 \cdot 10^{10}$		
		33,872	1,219	1,219	$1,266 \cdot 10^{11}$		
	Por Capas	0,000	45,860	45,860	$3,364 \cdot 10^9$	$9,233 \cdot 10^{12}$	$1,008 \cdot 10^{10}$
		0,848	9,869	9,869	$1,563 \cdot 10^{10}$		
		10,090	1,420	1,420	$1,086 \cdot 10^{11}$		
		21,048	0,702	0,702	$2,196 \cdot 10^{11}$		
		32,078	0,524	0,524	$2,946 \cdot 10^{11}$		
C-3000	Sediment.	0,000	36,200	36,200	$2,663 \cdot 10^9$	$1,1745 \cdot 10^{12}$	$7,136 \cdot 10^9$
		0,790	8,719	8,719	$1,106 \cdot 10^{10}$		
		9,756	4,484	4,484	$2,150 \cdot 10^{10}$		
		20,456	3,228	3,228	$2,987 \cdot 10^{10}$		
		30,864	2,230	2,230	$4,324 \cdot 10^{10}$		
	Por Capas	0,000	42,560	42,560	$2,265 \cdot 10^9$	$3,157 \cdot 10^{12}$	$3,237 \cdot 10^9$
		0,894	11,532	11,532	$8,361 \cdot 10^9$		
		9,334	2,916	2,916	$3,306 \cdot 10^{10}$		
		18,290	1,687	1,687	$5,715 \cdot 10^{10}$		
		30,116	0,960	0,960	$1,005 \cdot 10^{11}$		

**Tabla N° 33: Resultados intermedios involucrados en el cálculo de la permeabilidad (cont.)**

Mezcla	Mecanis. de Formación de Torta	Altura promedio $h_c \cdot 10^3$ (m)	Flujo Másico Filtrado ( $\bar{m} = m_{FL}/t$ ) (gr/s)	Caudal Filtrado $Q \cdot 10^6$ (m <sup>3</sup> /s)	Resistenc. Total $\Delta P \cdot A_F / \mu_L \cdot Q$ (m <sup>-1</sup> )	Resistenc. Especifica de la torta $r_c$ (m <sup>-2</sup> )	Resistenc. del Medio $R_M$ (m <sup>-1</sup> )
C-45-53	Sediment.	0,000	36,400	36,400	$1,589 \cdot 10^9$	$2,6299 \cdot 10^{11}$	$2,139 \cdot 10^9$
		0,832	27,240	27,240	$2,124 \cdot 10^9$		
		9,050	10,905	10,905	$5,305 \cdot 10^9$		
		20,598	7,017	7,017	$8,245 \cdot 10^9$		
		30,590	6,093	6,093	$9,494 \cdot 10^9$		
	Por Capas	0,000	37,810	37,810	$1,530 \cdot 10^9$	$5,236 \cdot 10^{11}$	$1,298 \cdot 10^9$
		0,778	30,140	30,140	$1,919 \cdot 10^8$		
		9,908	9,366	9,366	$6,177 \cdot 10^9$		
		19,580	5,350	5,350	$1,081 \cdot 10^{10}$		
		28,850	3,402	3,402	$1,700 \cdot 10^{10}$		
C-70-95	Sediment.	0,000	33,290	33,290	$1,738 \cdot 10^9$	$1,1499 \cdot 10^{11}$	$2,140 \cdot 10^9$
		0,622	20,386	20,386	$2,838 \cdot 10^9$		
		8,920	18,420	18,420	$3,141 \cdot 10^9$		
		20,178	14,825	14,825	$3,902 \cdot 10^9$		
		30,866	9,564	9,564	$6,049 \cdot 10^9$		
	Por Capas	0,000	33,590	33,590	$1,722 \cdot 10^9$	$1,650 \cdot 10^{11}$	$2,505 \cdot 10^9$
		0,892	20,349	20,349	$2,843 \cdot 10^9$		
		10,130	11,993	11,993	$4,823 \cdot 10^9$		
		19,708	9,147	9,147	$6,324 \cdot 10^9$		
		28,800	8,720	8,720	$6,634 \cdot 10^9$		
V-40-70	Sediment.	0,000	83,850	83,850	$2,300 \cdot 10^8$	$2,9408 \cdot 10^{11}$	$9,463 \cdot 10^8$
		0,970	25,471	25,471	$7,570 \cdot 10^8$		
		9,614	3,338	3,338	$5,777 \cdot 10^9$		
		22,442	2,843	2,843	$6,784 \cdot 10^9$		
		33,812	1,779	1,779	$1,084 \cdot 10^{10}$		
	Sediment (SK-009) (*)	0,000	21,189	21,189	$9,101 \cdot 10^8$	$1,1730 \cdot 10^{12}$	$1,874 \cdot 10^{10}$
		0,706	0,776	0,776	$2,484 \cdot 10^{10}$		
		8,320	1,096	1,096	$1,759 \cdot 10^{10}$		
		17,636	0,414	0,414	$4,656 \cdot 10^{10}$		
		25,946	0,404	0,404	$4,768 \cdot 10^{10}$		
	Por Capas	0,000	73,900	73,900	$2,609 \cdot 10^8$	$4,921 \cdot 10^{11}$	$1,582 \cdot 10^8$
		1,260	34,100	34,100	$5,655 \cdot 10^8$		
		10,028	4,433	4,433	$4,350 \cdot 10^9$		
		20,804	2,087	2,087	$9,241 \cdot 10^9$		
		30,382	1,246	1,246	$1,548 \cdot 10^{10}$		

**Tabla N° 33: Resultados intermedios involucrados en el cálculo  
de la permeabilidad (cont.)**

Mezcla	Mecanis. de Formación de Torta	Altura promedio $h_c \cdot 10^3$ (m)	Flujo Másico Filtrado ( $m = m_{FL}/t$ ) (gr/s)	Caudal Filtrado $Q \cdot 10^6$ ( $m^3/s$ )	Resistenc. Total $\Delta P \cdot A_F / \mu_L \cdot Q$ ( $m^{-1}$ )	Resistenc. Específica de la torta $r_c$ ( $m^{-2}$ )	Resistenc. del Medio $R_M$ ( $m^{-1}$ )
V-63	Sediment.	0,000	80,800	80,800	$2,386 \cdot 10^8$	$1,0405 \cdot 10^{11}$	$3,950 \cdot 10^8$
		1,154	47,740	47,740	$4,039 \cdot 10^8$		
		9,768	12,002	12,002	$1,607 \cdot 10^9$		
		21,674	7,525	7,525	$2,563 \cdot 10^9$		
		33,760	4,930	4,930	$3,911 \cdot 10^9$		
	Por Capas	0,000	66,100	66,100	$2,917 \cdot 10^8$	$2,609 \cdot 10^{11}$	$2,557 \cdot 10^8$
		1,040	35,610	35,610	$5,415 \cdot 10^8$		
		10,418	9,333	9,333	$2,066 \cdot 10^9$		
		20,288	4,431	4,431	$4,352 \cdot 10^9$		
		31,526	2,169	2,169	$8,891 \cdot 10^9$		
V-70-110	Sediment.	0,000	106,150	106,150	$1,817 \cdot 10^8$	$6,4669 \cdot 10^{10}$	$2,652 \cdot 10^8$
		1,020	60,540	60,540	$3,185 \cdot 10^8$		
		11,592	18,893	18,893	$1,021 \cdot 10^9$		
		22,300	11,123	11,123	$1,734 \cdot 10^9$		
		32,874	8,131	8,131	$2,372 \cdot 10^9$		
	Por Capas	0,000	95,000	95,000	$2,030 \cdot 10^8$	$1,389 \cdot 10^{11}$	$2,271 \cdot 10^7$
		1,254	50,740	50,740	$3,800 \cdot 10^8$		
		11,386	14,654	14,654	$1,316 \cdot 10^9$		
		21,054	6,491	6,491	$2,971 \cdot 10^9$		
		31,080	4,359	4,359	$4,424 \cdot 10^9$		

## APÉNDICE D-2: RESULTADOS DE POROSIDAD EXPERIMENTAL

**Tabla N°34: Resultados intermedios involucrados en el cálculo de la porosidad experimental**

Mezcla	Mecanismo de Formación de Torta	Altura Promedio $h_c$ (m)	Masa torta seca $m_s$ (gr)	Porosidad individual $\varepsilon$ (adim)	Porosidad promedio $\varepsilon$ (adim)	Función de Porosidad $\varphi(\varepsilon)$ (adim)
C-9000	Sediment.	0,000	0,000	-	0,494	2,121
		0,840	2,785	0,424		
		10,130	28,663	0,508		
		20,476	57,120	0,515		
		31,474	85,077	0,530		
	Por Capas	0,000	0,000	-	0,499	2,003
		0,914	2,891	0,450		
		10,140	28,796	0,506		
		20,802	57,260	0,521		
		31,336	86,220	0,522		
C-4500	Sediment.	0,000	0,000	-	0,481	2,420
		0,540	2,206	0,290		
		10,646	28,758	0,530		
		22,030	57,691	0,545		
		33,872	85,860	0,559		
	Por Capas	0,000	0,000	-	0,477	2,515
		0,848	3,044	0,376		
		10,090	28,520	0,509		
		21,048	58,650	0,516		
		32,078	90,612	0,509		
C-3000	Sediment.	0,000	0,000	-	0,475	2,574
		0,790	2,756	0,393		
		9,756	28,578	0,491		
		20,456	57,665	0,510		
		30,864	87,745	0,506		
	Por Capas	0,000	0,000	-	0,471	2,678
		0,894	2,786	0,458		
		9,334	28,906	0,462		
		18,290	56,773	0,460		
		30,116	85,923	0,504		



**Tabla N°34: Resultados intermedios involucrados en el cálculo de la porosidad experimental (cont.)**

Mezcla	Mecanismo de Formación de Torta	Altura Promedio $h_c$ (m)	Masa torta seca $m_s$ (gr)	Porosidad individual $\varepsilon$ (adim)	Porosidad promedio $\varepsilon$ (adim)	Función de Porosidad $\varphi(\varepsilon)$ (adim)
C-45-53	Sediment.	0,000	0,000	-	0,469	2,715
		0,832	2,843	0,406		
		9,050	28,752	0,448		
		20,598	57,481	0,515		
		30,590	86,145	0,510		
	Por Capas	0,000	0,000	-	0,488	2,247
		0,778	2,297	0,487		
		9,908	28,733	0,496		
		19,580	57,332	0,491		
		28,850	86,258	0,480		
C-70-75	Sediment.	0,000	0,000	-	0,460	2,985
		0,622	2,250	0,371		
		8,920	28,223	0,450		
		20,178	57,393	0,505		
		30,866	86,105	0,515		
	Por Capas	0,000	0,000	-	0,513	1,762
		0,892	2,250	0,561		
		10,130	28,223	0,516		
		19,708	57,393	0,494		
		28,800	86,105	0,480		
V-40-70	Sediment.	0,000	0,000	-	0,377	7,250
		0,970	3,161	0,336		
		9,614	31,838	0,325		
		22,442	63,766	0,421		
		33,812	95,325	0,426		
	Sediment.	0,000	0,000	-	0,392	6,141
		0,706	2,405	0,306		
		8,320	24,247	0,406		
		17,636	48,967	0,434		
		25,946	73,656	0,422		
	Por Capas	0,000	0,000	-	0,408	5,149
		1,260	2,937	0,525		
		10,028	31,258	0,365		
		20,804	63,278	0,380		
		30,382	95,016	0,363		

**Tabla N°34: Resultados intermedios involucrados en el cálculo de la porosidad experimental (cont.)**

Mezcla	Mecanismo de Formación de Torta	Altura Promedio $h_c$ (m)	Masa torta seca $m_s$ (gr)	Porosidad individual $\varepsilon$ (adim)	Porosidad promedio $\varepsilon$ (adim)	Función de Porosidad $\varphi(\varepsilon)$ (adim)
V-63	Sediment.	0,000	0,000	-	0,415	4,787
		1,154	3,014	0,468		
		9,768	30,793	0,358		
		21,674	62,653	0,411		
		33,760	95,484	0,424		
	Por Capas	0,000	0,000	-	0,418	4,609
		1,040	2,434	0,523		
		10,418	30,793	0,398		
		20,288	62,653	0,371		
		31,526	95,484	0,383		
V-70-110	Sediment.	0,000	0,000	-	0,407	5,220
		1,020	3,197	0,361		
		11,592	31,824	0,441		
		22,300	63,635	0,419		
		32,874	95,621	0,407		
	Por Capas	0,000	0,000	-	0,430	4,075
		1,254	2,969	0,518		
		11,386	31,318	0,440		
		21,054	63,326	0,387		
		31,080	95,033	0,377		

### APÉNDICE D-3: RESULTADOS DE POROSIDAD CALCULADA POR EL METODO DE YU-STANDISH

**Tabla N°35: Porosidades y volúmenes específicos de cada pseudo  
componente de la mezcla de carbonato: C-9000**

Pseudo Compon. I	Mecanismo de Sedimentación (poured packing)			Mecanismo Por Capas (tapped packing)		
	Porosidad individual $\varepsilon_i$ (adim)	Volumen especifico individual $V_i$ (adim)	Volumen especifico de empaques individual $V_i^T$ (adim)	Porosidad individual $\varepsilon_i$ (adim)	Volumen especifico individual $V_i$ (adim)	Volumen especifico de empaques individual $V_i^T$ (adim)
20	0,564	2,292	2,080	0,528	2,119	1,826
19	0,556	2,252	2,121	0,517	2,071	1,886
18	0,553	2,237	2,133	0,513	2,053	1,904
17	0,551	2,226	2,142	0,510	2,040	1,915
16	0,549	2,217	2,147	0,507	2,029	1,923
15	0,547	2,210	2,151	0,505	2,019	1,928
14	0,546	2,203	2,154	0,503	2,011	1,931
13	0,545	2,196	2,155	0,501	2,002	1,932
12	0,543	2,190	2,156	0,499	1,994	1,932
11	0,542	2,185	2,156	0,497	1,987	1,930
10	0,541	2,179	2,155	0,495	1,980	1,926
9	0,540	2,173	2,153	0,493	1,972	1,920
8	0,539	2,168	2,150	0,491	1,966	1,913
7	0,538	2,163	2,145	0,489	1,958	1,903
6	0,536	2,157	2,139	0,487	1,949	1,888
5	0,535	2,151	2,130	0,485	1,941	1,871
4	0,534	2,144	2,118	0,482	1,932	1,847
3	0,532	2,136	2,100	0,479	1,921	1,811
2	0,530	2,127	2,071	0,476	1,907	1,756
1	0,523	2,094	1,887	0,461	1,855	1,447
Volumen especifico de la mezcla $V_e = \max(V_i^T, \dots, V_n^T)$ (adim)			2,156	1,932		

**Tabla N°36: Porosidades y volúmenes específicos de cada pseudo  
componente de la mezcla de carbonato: C-4500**

Pseudo Compon. I	Mecanismo de Sedimentación (poured packing)			Mecanismo Por Capas (tapped packing)		
	Porosidad individual $\varepsilon_i$ (adim)	Volumen especifico individual $V_i$ (adim)	Volumen especifico de empaquete individual $V_i^T$ (adim)	Porosidad individual $\varepsilon_i$ (adim)	Volumen especifico individual $V_i$ (adim)	Volumen especifico de empaquete individual $V_i^T$ (adim)
20	0,543	2,190	1,946	0,498	1,994	1,653
19	0,535	2,151	2,009	0,485	1,942	1,732
18	0,532	2,139	2,028	0,480	1,924	1,756
17	0,530	2,130	2,039	0,477	1,911	1,770
16	0,529	2,123	2,047	0,474	1,900	1,779
15	0,528	2,117	2,052	0,471	1,891	1,785
14	0,526	2,111	2,055	0,469	1,883	1,787
13	0,525	2,107	2,057	0,467	1,875	1,787
12	0,524	2,102	2,057	0,465	1,868	1,785
11	0,523	2,098	2,056	0,463	1,862	1,780
10	0,523	2,095	2,053	0,461	1,855	1,773
9	0,522	2,091	2,049	0,459	1,849	1,764
8	0,521	2,088	2,043	0,457	1,843	1,751
7	0,520	2,084	2,035	0,456	1,837	1,735
6	0,519	2,081	2,025	0,454	1,830	1,715
5	0,519	2,077	2,011	0,452	1,824	1,690
4	0,518	2,074	1,993	0,450	1,817	1,657
3	0,517	2,070	1,968	0,447	1,809	1,613
2	0,516	2,066	1,936	0,445	1,801	1,560
1	0,513	2,052	1,728	0,435	1,768	1,244
Volumen especifico de la mezcla $V_e = \max(V_i^T, \dots, V_n^T)$ (adim)			2,057	1,787		

**Tabla N°37: Porosidades y volúmenes específicos de cada pseudo  
componente de la mezcla de carbonato: C-3000**

Pseudo Compon. I	Mecanismo de Sedimentación (poured packing)			Mecanismo Por Capas (tapped packing)		
	Porosidad individual $\varepsilon_i$ (adim)	Volumen especifico individual $V_i$ (adim)	Volumen especifico de empaquete individual $V_i^T$ (adim)	Porosidad individual $\varepsilon_i$ (adim)	Volumen especifico individual $V_i$ (adim)	Volumen especifico de empaquete individual $V_i^T$ (adim)
20	0,527	2,116	1,909	0,471	1,890	1,598
19	0,522	2,091	1,977	0,459	1,850	1,676
18	0,520	2,084	1,994	0,456	1,837	1,697
17	0,519	2,080	2,005	0,453	1,828	1,710
16	0,518	2,076	2,012	0,451	1,821	1,718
15	0,518	2,073	2,017	0,449	1,815	1,723
14	0,517	2,070	2,020	0,447	1,809	1,725
13	0,516	2,067	2,022	0,446	1,804	1,725
12	0,516	2,065	2,022	0,444	1,799	1,723
11	0,515	2,063	2,021	0,443	1,795	1,719
10	0,515	2,061	2,019	0,442	1,791	1,712
9	0,514	2,059	2,015	0,440	1,787	1,703
8	0,514	2,058	2,009	0,439	1,782	1,692
7	0,514	2,056	2,002	0,438	1,778	1,677
6	0,513	2,054	1,992	0,436	1,774	1,658
5	0,513	2,053	1,979	0,435	1,770	1,634
4	0,512	2,051	1,961	0,434	1,765	1,603
3	0,512	2,049	1,937	0,432	1,760	1,561
2	0,512	2,047	1,898	0,430	1,754	1,497
1	0,510	2,042	1,708	0,424	1,735	1,213
Volumen especifico de la mezcla $V_e = \max(V_i^T, \dots, V_n^T)$ (adim)			2,022	1,725		

**Tabla N°38: Porosidades y volúmenes específicos de cada pseudo  
componente de la mezcla de carbonato: C-45-53**

Pseudo Compon. I	Mecanismo de Sedimentación (poured packing)			Mecanismo Por Capas (tapped packing)		
	Porosidad individual $\varepsilon_i$ (adim)	Volumen especifico individual $V_i$ (adim)	Volumen especifico de empaquete individual $V_i^T$ (adim)	Porosidad individual $\varepsilon_i$ (adim)	Volumen especifico individual $V_i$ (adim)	Volumen especifico de empaquete individual $V_i^T$ (adim)
20	0,515	2,060	1,940	0,441	1,787	1,607
19	0,513	2,052	1,992	0,434	1,767	1,673
18	0,512	2,050	2,003	0,432	1,761	1,686
17	0,512	2,048	2,010	0,431	1,758	1,694
16	0,512	2,048	2,014	0,430	1,755	1,699
15	0,511	2,047	2,017	0,429	1,752	1,702
14	0,511	2,046	2,019	0,429	1,750	1,704
13	0,511	2,045	2,020	0,428	1,748	1,704
12	0,511	2,045	2,021	0,427	1,746	1,703
11	0,511	2,044	2,021	0,427	1,744	1,702
10	0,511	2,044	2,020	0,426	1,742	1,698
9	0,511	2,044	2,018	0,426	1,741	1,694
8	0,511	2,043	2,015	0,425	1,739	1,688
7	0,510	2,043	2,012	0,424	1,737	1,680
6	0,510	2,042	2,007	0,424	1,736	1,671
5	0,510	2,042	2,001	0,423	1,734	1,658
4	0,510	2,041	1,991	0,423	1,732	1,640
3	0,510	2,041	1,978	0,422	1,730	1,616
2	0,510	2,040	1,957	0,421	1,727	1,577
1	0,510	2,039	1,839	0,418	1,718	1,381
Volumen especifico de la mezcla $V_e = \max(V_i^T, \dots, V_n^T)$ (adim)			2,021	1,704		

**Tabla N°39: Porosidades y volúmenes específicos de cada pseudo  
componente de la mezcla de carbonato: C-75-90**

Pseudo Compon. I	Mecanismo de Sedimentación (poured packing)			Mecanismo Por Capas (tapped packing)		
	Porosidad individual $\varepsilon_i$ (adim)	Volumen especifico individual $V_i$ (adim)	Volumen especifico de empaquete individual $V_i^T$ (adim)	Porosidad individual $\varepsilon_i$ (adim)	Volumen especifico individual $V_i$ (adim)	Volumen especifico de empaquete individual $V_i^T$ (adim)
20	0,511	2,046	1,946	0,428	1,750	1,603
19	0,510	2,043	1,994	0,424	1,737	1,662
18	0,510	2,042	2,003	0,423	1,734	1,673
17	0,510	2,041	2,009	0,423	1,732	1,680
16	0,510	2,041	2,013	0,422	1,730	1,685
15	0,510	2,041	2,016	0,421	1,728	1,687
14	0,510	2,040	2,017	0,421	1,727	1,689
13	0,510	2,040	2,019	0,421	1,726	1,689
12	0,510	2,040	2,019	0,420	1,725	1,689
11	0,510	2,040	2,019	0,420	1,724	1,687
10	0,510	2,040	2,018	0,420	1,723	1,685
9	0,510	2,039	2,017	0,419	1,722	1,681
8	0,510	2,039	2,015	0,419	1,721	1,676
7	0,510	2,039	2,012	0,419	1,720	1,670
6	0,510	2,039	2,008	0,418	1,719	1,661
5	0,510	2,039	2,002	0,418	1,718	1,650
4	0,509	2,039	1,995	0,418	1,717	1,636
3	0,509	2,039	1,984	0,417	1,716	1,614
2	0,509	2,038	1,963	0,417	1,714	1,576
1	0,509	2,038	1,856	0,415	1,709	1,396
Volumen especifico de la mezcla $V_e = \max(V_i^T, \dots, V_n^T)$ (adim)			2,019	1,689		

## APÉNDICE D-4: DIAGRAMAS DE PREDICCIÓN DE LA PERMEABILIDAD

En esta sección, se presentan los diagramas que permiten predecir la permeabilidad de tortas de carbonato y esferas de vidrio, para los mecanismos de capas compactas y capas sueltas

### ▪ Mecanismo de formación de torta: Capas Compactas

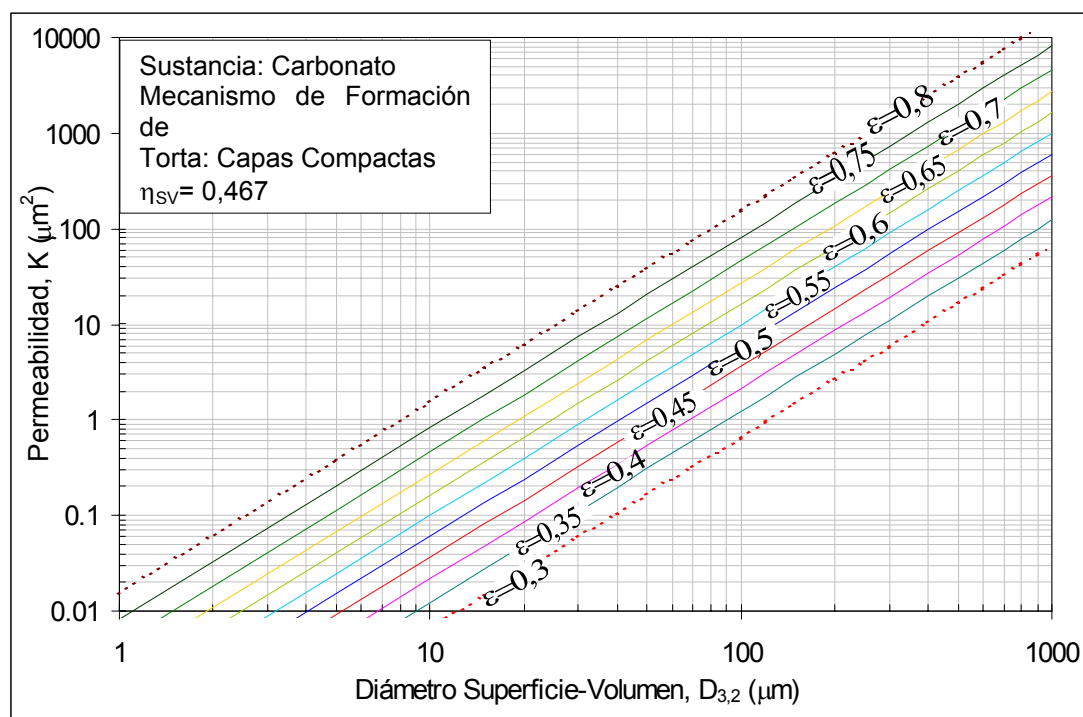


Figura N°48: Predicción de la permeabilidad para tortas de carbonato formadas por capas compactas variando la porosidad  $\varepsilon$



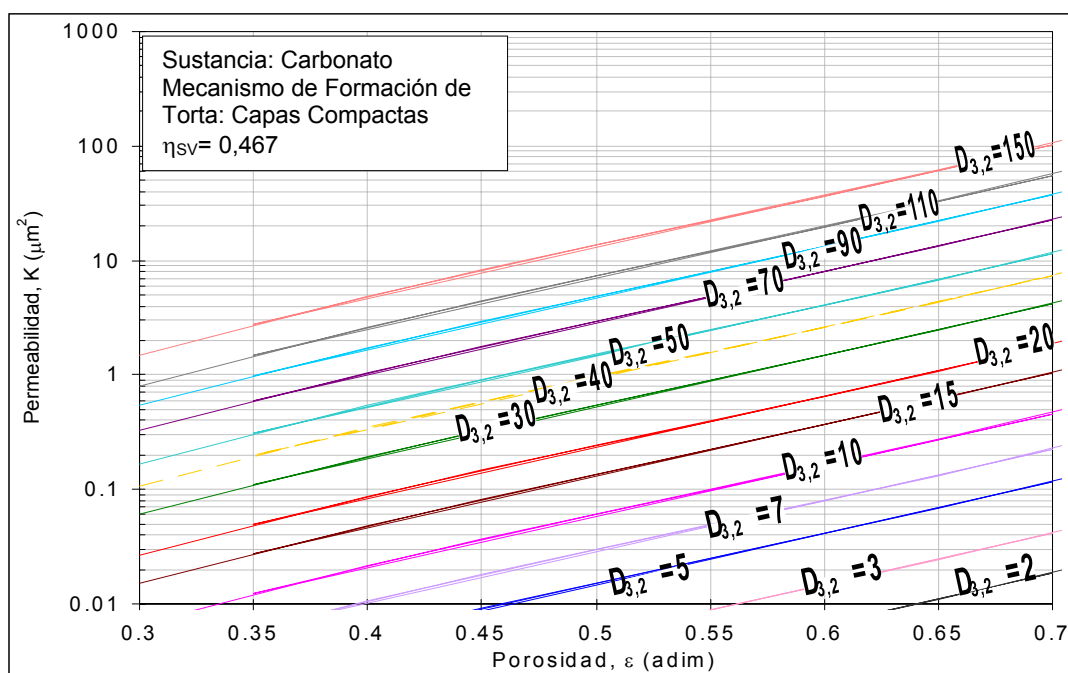


Figura N°49: Predicción de la permeabilidad para tortas de carbonato formadas por capas compactas, variando el diámetro  $D_{3,2}$

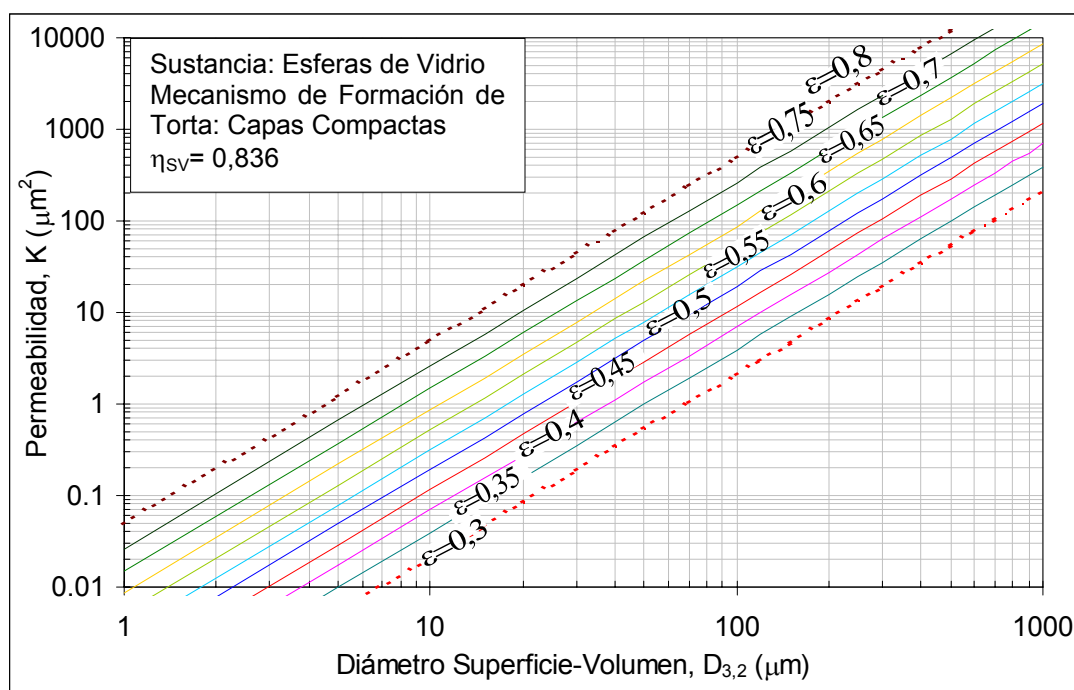


Figura N°50: Predicción de la permeabilidad para tortas de esferas de vidrio formadas por capas compactas, variando la porosidad  $\varepsilon$

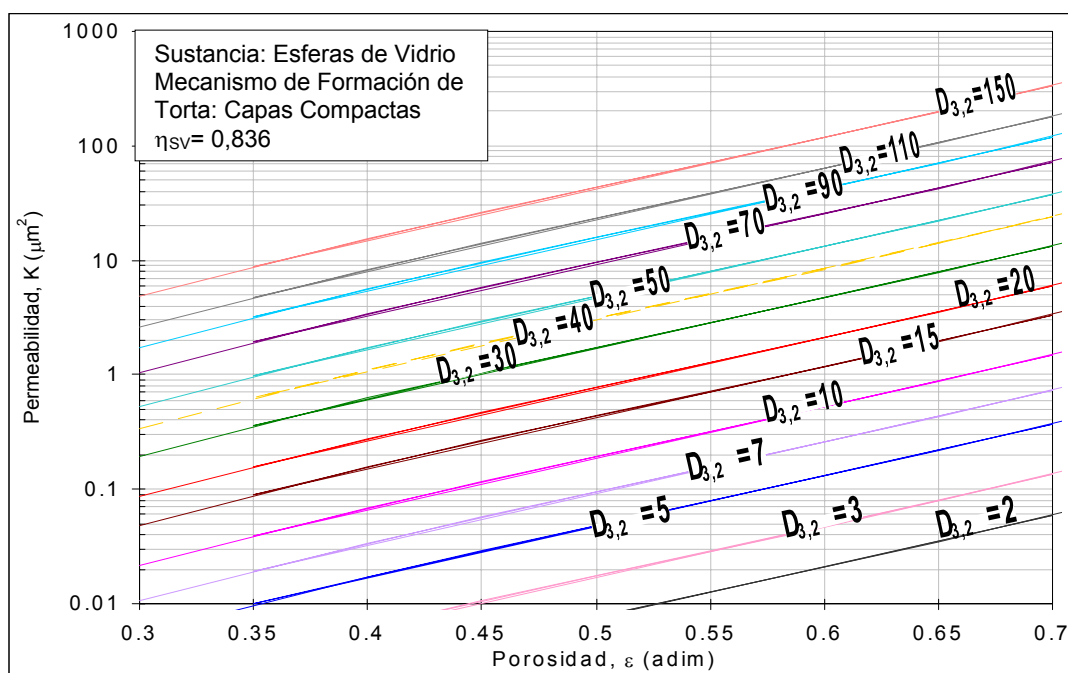


Figura N°51: Predicción de la permeabilidad para tortas de esferas de vidrio formadas por capas compactas, variando el diámetro  $D_{3,2}$

▪ Mecanismo de formación de torta: Capas Seltas

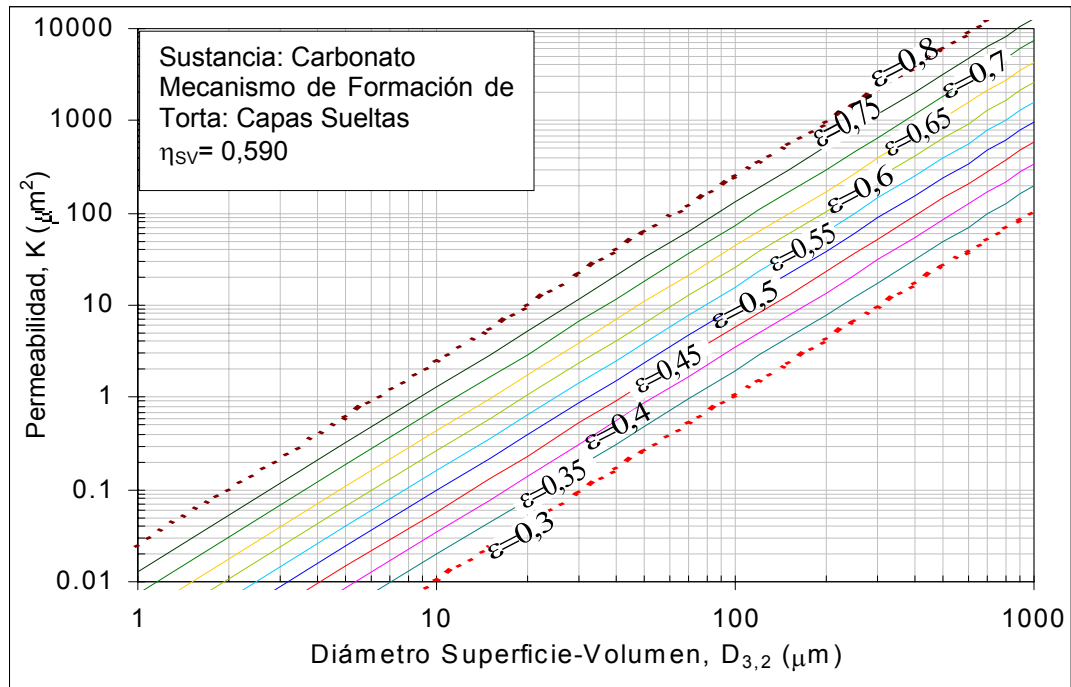


Figura N°52: Predicción de la permeabilidad para tortas de carbonato formadas por capas sueltas, variando la porosidad  $\varepsilon$

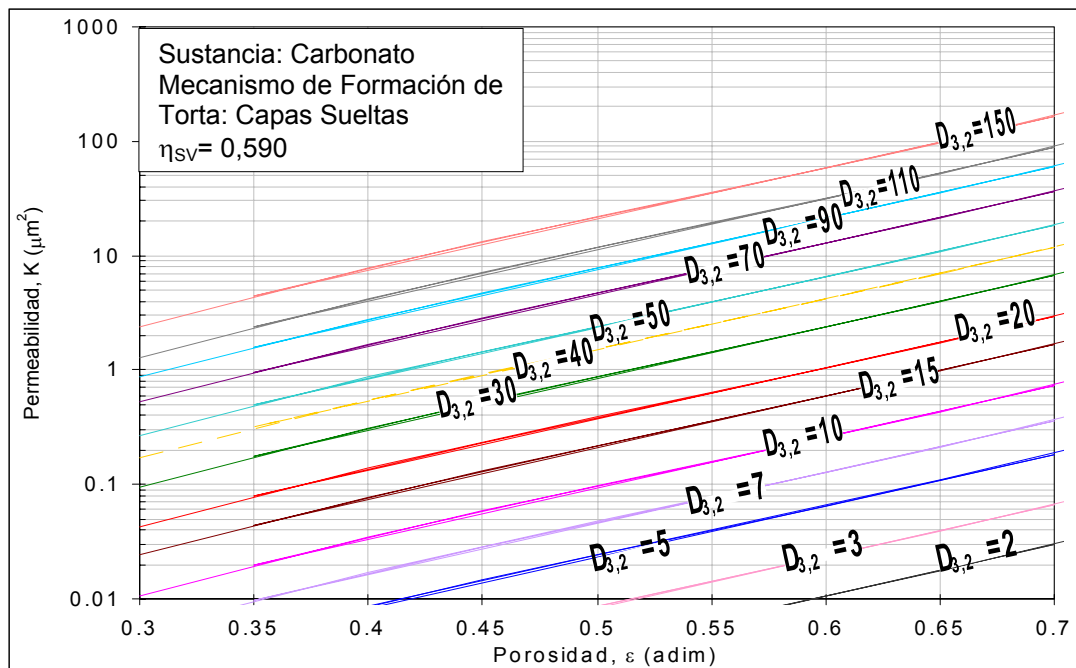


Figura N°53: Predicción de la permeabilidad para tortas de carbonato formadas por capas sueltas, variando el diámetro  $D_{3,2}$

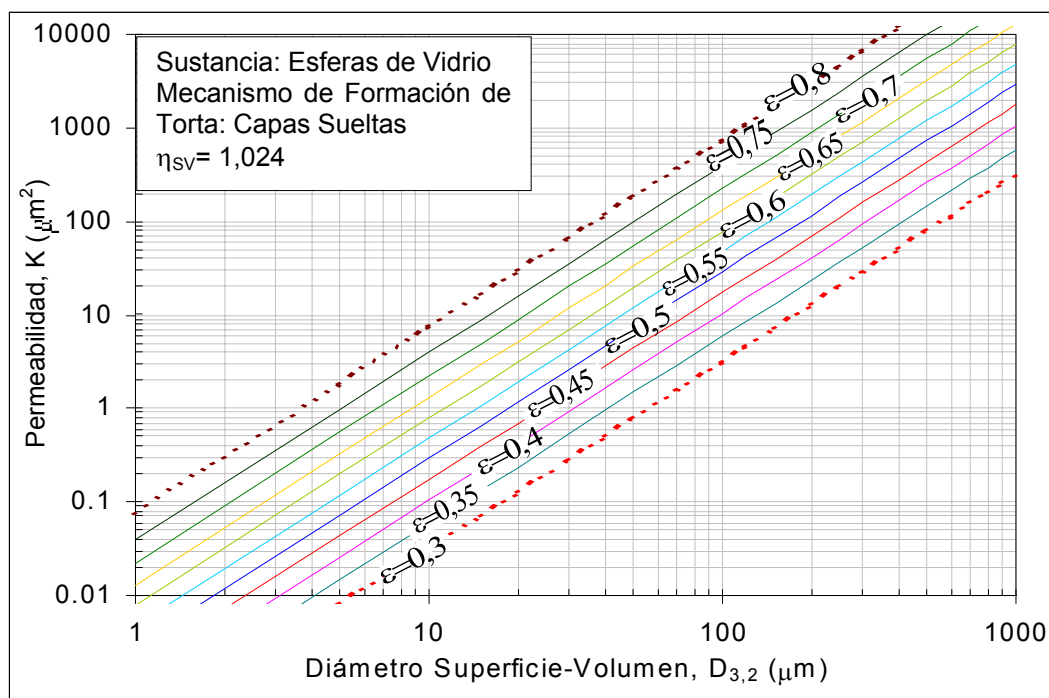


Figura N°54: Predicción de la permeabilidad para tortas de esferas de Vidrio formadas por capas sueltas, variando la porosidad  $\varepsilon$

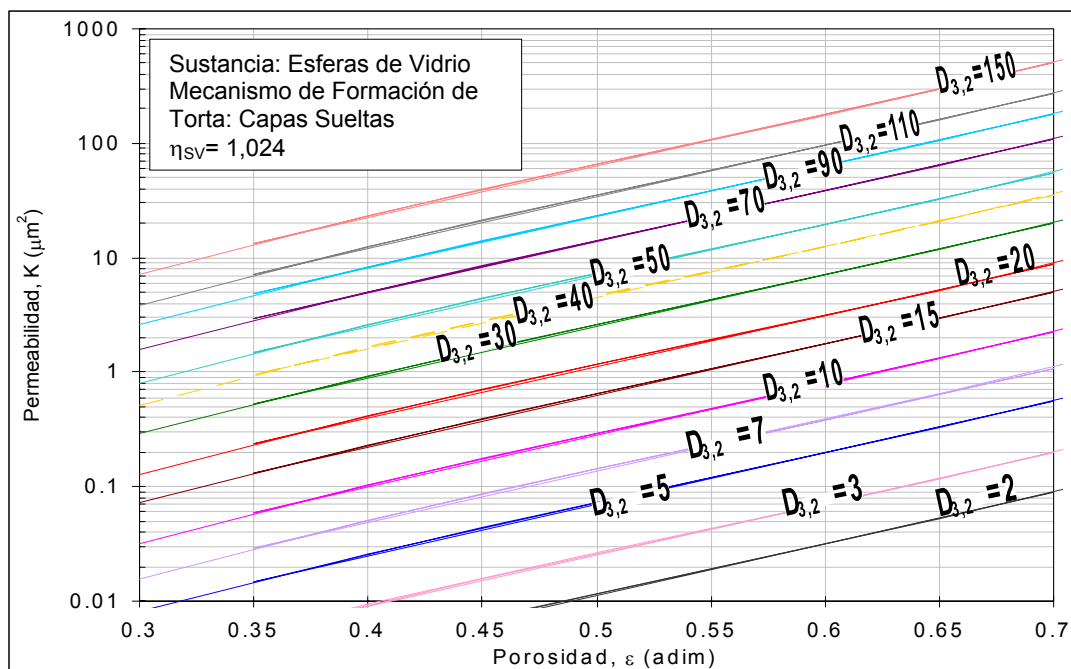


Figura N°55: Predicción de la permeabilidad para tortas de esferas de vidrio formadas por capas sueltas, variando el diámetro  $D_{3,2}$