

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y
APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES
(INGENIERÍA)**

**CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN
PARA EL DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
UNIDAD OAXACA**

**ESTUDIO DE LA FILTRACIÓN CENTRÍFUGA DE UNA
SUSPENSIÓN AGUA-TALCO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA:

RAYMUNDO ALVARADO VELASCO

DIRECTOR DE TESIS:

DR. SADO TH SANDOVAL TORRES



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO

ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez siendo las 13:00 horas del día 22 del mes de noviembre del 2012 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación del **Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca (CIIDIR-OAXACA)** para examinar la tesis de grado titulada: "Estudio de la filtración Centrifuga de una suspensión agua-talco"

del alumno:

Alvarado Apellido paterno	Velasco materno	Raymundo nombre(s)
		Con registro: B 1 0 1 7 4 8

aspirante al grado de: **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISION REVISORA

~~Director de tesis~~

~~Dr. Sadoth Sandoval Torres~~

~~Dr. Francisco Castellanos León~~

~~Dra. Luicita Lagunez Rivera~~

~~Dr. Juan Rodriguez Ramirez~~

~~Dra. Lilia Leticia Mendez Lagunas~~

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

~~Dr. Rafael Pérez Pacheco~~





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez el día 22 del mes noviembre **del año 2012**, el (la) que suscribe **Alvarado Velasco Raymundo** alumno (a) del Programa de **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES** con número de registro **B101748**, adscrito al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. Sadoth Sandoval Torres y cede los derechos del trabajo titulado: **“Estudio de la filtración Centrífuga de una suspensión agua-talco”**, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección **Calle Hornos 1003, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca**, e-mail: posgradoox@ipn.mx ó rjjealvarado@hotmail.com Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Alvarado Velasco Raymundo



CENTRO INTERDISCIPLINARIO
DE INVESTIGACION PARA EL
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
C.I.I.D.I.R.
UNIDAD OAXACA
I.P.N.

Dedicatoria

A Dios

Por la familia que me ha dado, por la oportunidad que me da de concluir esta etapa de mi vida, por los amigos y personas que ha puesto en mi camino, las cuales han hecho más fácil el trayecto, por la vida misma.

A mi amada esposa Jessy y a mis preciosos hijos Jonathan, Ethann y Grace, por hacerme sentir que la vida no se trata solo de números y cálculos, sino que también existe amor y sentimientos, gracias por ser parte de mi vida y por estar a mi lado, Ustedes son la razón de mis logros.

Con amor, respeto y admiración, a mi Madre Margarita Velasco Morales por el apoyo brindado durante el transcurso de mi vida, por las palabras de aliento escuchadas en los momentos difíciles, por sus oraciones a Dios.

A mis hermanos Javier y José Moisés, así como a mis cuñadas Ingrid y Ana Desiree, quienes son para mí una fuente de inspiración y me han alentado a seguir siempre adelante

A mis suegros, Melesio y Victoria, por el gran cariño y apoyo mostrado hacia mi persona y hacia mi familia, por su comprensión y paciencia

A mis amigos, los cuales no menciono por temor a omitir alguno, gracias, porque sé que siempre podré contar con Ustedes.

Raymundo Alvarado Velasco

Agradecimientos

Con admiración, respeto y sincero agradecimiento al Dr. Sadoth Sandoval Torres por su apoyo y paciencia brindados durante el desarrollo de esta tesis.

A un gran compañero y amigo, Emilio Hernández Bautista, por todo el apoyo brindado.

Al CIIDIR-IPN por abrirme sus puertas y permitirme esta etapa de superación en mi vida profesional

Al Instituto Politécnico Nacional por su apoyo en el desarrollo de este trabajo.

A todos los catedráticos del programa de maestría, por todo el conocimiento brindado, por su disposición y apoyo.

Al Jurado de examen: Dr. Sadoth Sandoval Torres, Dr. Juan Rodríguez Ramírez, Dra. Lilia Leticia Méndez Lagunas, Dr. Francisco Castellanos León, Dra. Luicita Lagunez Rivera y Dr. Pastor Teodoro Matadamas Ortiz, por el tiempo dedicado y los conocimientos que aportaron a este trabajo de investigación.

Al CONACyT por el apoyo financiero otorgado para la realización de este trabajo.

A la Comisión de Operación y Fomentos de Actividades Académicas del IPN (COFAA-IPN) por el apoyo otorgado mediante el oficio DEAE/A0275/2012

Al Programa Institucional para la Formación de Investigadores (PIFI), por el apoyo económico brindado a través de los proyectos SIP 20110476 Análisis de los periodos y mecanismos de transporte durante el secado de papa por convección de aire forzada y SIP 20121076 Modelamiento multifísico del secado de papa por convección de aire caliente.

Resumen

La filtración centrífuga es un método mecánico de separación de sólidos dispersos en una fase líquida. El principio de operación se basa en una diferencia de presión que obliga a la suspensión a atravesar el medio filtrante con una fuerza de 100 a 2500 veces la gravedad (Sutherland, 2009). Dicho proceso es utilizado cuando se requiere que el producto sólido esté lo más seco posible sin que se someta a altas temperaturas, teniéndose también menor demanda de energía que si se realiza a través del secado convencional con aplicación de temperatura (Couturier, 2007). Esto ha permitido que sea ampliamente utilizada en procesos de la industria química, de alimentos, farmacéutica, cosmética, ambiental, etc. (Hwang, 2007).

Se requiere conocer cómo evoluciona el espesor de la torta formada al interior del tambor centrífugo, para enseguida determinar el periodo de de-saturación de la torta. El espesor se estima a partir de los balances generales de masa. La de-saturación de la torta se simula considerando el modelo generalizado de Darcy. Para facilitar la solución se consideró una torta homogénea e incompresible (Wakeman y Vince, 1986), ya que si se tratara de una estructura compresible se modificarían los efectos capilares y los flujos en las fases. Además, se puede justificar la estructura no compresible debido a que se estudia una torta constituida de partículas de talco. La solución numérica del modelo se realizó utilizando Comsol Multiphysics 3.4 en el módulo de Difusión.

Los datos experimentales han sido obtenidos del proceso de filtración centrífuga de una suspensión agua talco con una fracción en volumen de sólidos de 0.057, una alimentación de la suspensión de 150 kg/h y una velocidad de centrifugación de 3000 rpm. Se comparan los resultados teóricos con los datos experimentales del proceso. La formulación de ecuaciones propuestas mediante balances de masa permitió determinar el espesor de la torta alcanzándose un valor máximo de 0.017 m. en un tiempo de operación de 600 segundos el cual es muy similar al valor determinado experimentalmente de 0.0175 m. La etapa de saturación inicia aproximadamente a los 700 segundos del proceso, alcanzándose una saturación mínima en la torta de 0.32. Separar 22 kg de líquido de una suspensión con fracción másica igual a 0.1428 tomó aproximadamente 600 segundos.

La reducción de la permeabilidad es tan grande, que permite el desarrollo de fuertes fuerzas capilares que impiden la evacuación total de líquido en la torta, lo cual se refleja en los últimos segundos de la de-saturación. Esto puede explicarse, pues cuando la saturación de la torta es muy baja, los valores de la presión capilar se incrementan exponencialmente.

Palabras clave. Filtración centrífuga, espesor, desaturación, presión capilar.

Abstract

Centrifugal filtration is a mechanical separation used for suspensions. The principle of this operation is based on a pressure gradient through the filter medium (cake), with a force of 100 to 2500 times the gravity (Sutherland, 2009). Centrifugal filtration is applied when is necessary to obtain a granular product with low moisture content by avoiding the application of high temperatures, reducing in this way the energy consumption (Couturier, 2007). These advantages have allowed important applications in the chemical, food, pharmaceutical, cosmetics, and environmental industry (Hwang, 2007).

This thesis studies both the cake thickness evolution inside the centrifugal drum, and the period of cake de-saturation. The thickness evolution is computed from the mass balance in the bowl. The de-saturation period is computed from both a mass balance and a mathematical model by taking into account the generalized Darcy model. To solve the model, the porous media was considered as a homogeneous incompressible cake (Wakeman and Vince, 1986), since a compressible porous media requires a special strategy in the numerical solution. So, it is possible to consider an incompressible porous media because of the cake is an agglomeration of talc particles. The numerical solution of the proposed model was performed by using Comsol Multiphysics 3.5a.

The experimental data have been obtained from several centrifugal filtration trials. The suspension is a water/talc mixture with a solids volume fraction of 0.057, a slurry feed of 150 kg/h and a centrifugal speed of 3000 rpm. Theoretical results are compared with experimental data of the process. The mass balance compute the cake thickness evolution reaching a maximum value of 0,017 m. in 600 seconds which is very similar to the experimentally value (0.0175 m). The de-saturation period starts at approximately 700 seconds, reaching an equilibrium value of 0.32. During this operation, 22 kg of water were evacuated approximately in 600 seconds.

During filtration the permeability take very small values, this fact allows the development of strong capillary forces which prevent a full evacuation of liquid in the cake, then the de-saturation reach an equilibrium at 0.32. This can be explained by the fact that at low saturation, the capillary pressure increases exponentially.

Keywords. Centrifugal filtration, thickness, desaturation, capillary pressure.

Índice general

<i>Agradecimientos</i>	v
Resumen.....	6
Nomenclatura	5
Capítulo 1. Planteamiento de la investigación	10
1.1 Introducción.....	10
1.2 Planteamiento del problema.....	11
1.3 Justificación	11
1.4 Antecedentes.....	12
1.5 Delimitación del estudio.....	14
1.6 Objetivos.....	14
1.6.1 Objetivo general:	14
1.6.2 Objetivos específicos:	14
1.7 Hipótesis	14
Capítulo 2. Estado del Arte	15
2.1 Filtración centrífuga	15
2.1.1. Aplicaciones principales	16
2.1.2. Formación de la torta	18
2.1.3. Factores principales que afectan la filtración	19
2.1.3.1 Influencia de las propiedades de las partículas.....	21
2.1.4 Teoría de la Filtración Centrífuga.	23
2.2 Mecanismos de Transporte en medios porosos.....	25
2.2.1 Introducción	25
2.2.2 Descripción de medio poroso.....	26
2.2.3 Volumen elemental representativo	27
2.2.4 Definición de parámetros	28
Capítulo 3. Metodología.....	36
3.1 Introducción.....	36
3.2 Balances de masa, formulación matemática	41
3.2.1 Determinación del radio líquido.....	43
3.2.2 Determinación del radio sólido	45
3.2.3 Determinación del espesor	45
3.2.4 Determinación de la Saturación	45
3.3 Deshidratación de la torta constituida	46

Capítulo 4. Resultados	55
4.1 Flujo másico de alimentación	55
4.2 Evolución del flujo másico de filtrado	57
4.3 Evolución del radio líquido y sólido calculado contra el radio sólido medido	62
4.4 Deshidratación de la torta	65
Capitulo 5. Conclusiones	71
Recomendaciones	73
Bibliografía.....	74

Nomenclatura

A	Área de la torta filtrante [m^2]
a	Aceleración centrífuga [m^2]
C	Concentración [kg/m^3]
e	Espesor [m]
e_l	Espesor de la capa líquida [m]
e_s	Espesor de la capa sólida [m]
e_c	Espesor de la torta [m]
f_{ms}	Fracción másica de sólidos [$m^3_{agua}/m^3_{suspensión}$]
f_{vs}	Fracción volumen de sólidos [$m^3_{talco}/m^3_{suspensión}$]
F_c	Fuerza centrífuga [N]
g	Aceleración de la gravedad [m/s^2]
H	Altura de la cesta [m]
h_l	Altura de líquido [m]
h_c	Altura de la torta [m]
k	Permeabilidad [m^2]
k_l	Permeabilidad del líquido [m^2]
k_{rl}	Permeabilidad relativa del líquido [m^2]
k_{rg}	Permeabilidad relativa del gas [m^2]
m_a	Masa de alimentación [kg]
m_a	Masa de la torta [kg]
m_l	Masa del líquido [kg]
m_{lc}	Masa del líquido contenido en la cesta [kg]
m_s	Masa del sólido [kg]
m_{sc}	Masa del sólido contenido en la cesta [kg]
$M(t)$	Masa instantánea de filtrado [kg]
P_{atm}	Presión atmosférica [Pa]
P_b	Presión de entrada [Pa]
P_c	Presión capilar [Pa]
P_{cent}	Presión centrífuga [Pa]
P_l	Presión del líquido [Pa]
P_l^l	Presión de líquido en el líquido [Pa]
P_g^g	Presión del gas en el gas [Pa]
P_g	Presión del gas [Pa]
Q_a	Flujo de alimentación [kg/s]
Q	Flujo de filtrado [kg/s]
r_b	Radio interior del tambor centrífugo [m]
r_c	Radio de la torta [m]
r_s	Radio sólido [m]
r_l	Radio líquido [m]
R_m	Resistencia media [m^{-1}]

S	Saturación [-]
t	Tiempo [s]
V_{θ}	Velocidad tangencial []
V_l	Volumen líquido [m ³]
V_s	Volumen del sólido [m ³]
V_{susp}	Volumen de la suspensión [m ³]
V_f	Velocidad de filtración [m/s]
W	Humedad [%]
x	Tamaño de la partícula [μm]

Letras griegas

\mathcal{E}	Porosidad [-]
ω	Velocidad angular [s ⁻¹]
ρ_s	Densidad del sólido [kg/m ³]
ρ_l	Densidad del líquido [kg/m ³]
ρ_{susp}	Densidad de la suspensión [kg/m ³]
μ_l	Viscosidad del líquido [N s/m ²]
α	Resistencia específica [m/kg]
ΔP	Diferencia de presión de filtración [N/m ²]
σ_l	Tensión superficial del líquido [N/m]
λ	Índice de distribución de poros [-]

Índice de figuras

Fig. 2.1 Filtración centrífuga.....	18
Fig. 2.2 Estructura del medio poroso	28
Fig. 2.3 Medio poroso interpretado como la superposición de medios continuos: fase sólida, líquida y gaseosa, todas en el mismo punto geométrico.....	28
Fig. 2.4 Detalles del menisco y tensiones en la interfaz.....	32
Fig. 2.5 Equilibrio mecánico en el menisco	33
Fig. 2.6 Líquido que moja al sólido.....	34
Fig. 2.7 Líquido que no moja al agua.....	34
Fig. 2.8 Fuerzas de adhesión y humedad relativa en el menisco	35
Fig. 3.1 Centrífuga vertical marca Robotel, en la cual se realizaron los experimentos	37
Fig. 3.2 Diagrama esquemático del equipo experimental	38
Fig. 3.3 Etapas del ciclo de centrifugado	39
Fig. 3.4 Graduación del fondo de la centrífuga.....	40
Fig. 3.5 Determinación del espesor experimentalmente.....	40
Fig. 3.6 Determinación del tamaño de partícula	41
Fig. 3.7 Corte de una centrífuga filtrante	43
Fig. 3.8 Permeabilidad relativa del líquido y del gas en función de la saturación (Brooks and Corey, 1964)	48
Fig. 3.9 Presión capilar en función de la Saturación (Brooks and Corey, 1964).....	49
Fig. 3.10 Geometría a modelar	50
Fig. 4.1 Evolución del flujo másico de alimentación y de la velocidad de centrifugación con respecto al tiempo de la suspensión agua-talco, experimento 1.	55
Fig. 4.2 Evolución del flujo másico de alimentación y de la velocidad de centrifugación con respecto al tiempo de la suspensión agua-talco, experimento 2.	56
Fig. 4.3 Evolución del flujo másico de alimentación y de la velocidad de centrifugación con respecto al tiempo de la suspensión agua-talco, experimento 3.	56
Fig. 4.4 Evolución del flujo másico de alimentación y de la velocidad de centrifugación con respecto al tiempo de la suspensión agua-talco, experimentos 1,2 y 3.	57
Fig. 4.5 Evolución del flujo másico de filtrado con respecto al tiempo de la suspensión agua talco. Experimento 1.....	58
Fig. 4.6 Evolución del flujo másico de filtrado total con respecto al tiempo de la suspensión agua talco. Experimentos 1,2 y 3.....	59
Fig. 4.7 Volumen de filtrado con respecto al tiempo de la suspensión agua talco. Experimentos 1,2 y 3.....	60
Fig. 4.8 Volumen de filtrado con respecto al tiempo de la suspensión agua talco. Experimentos 1,2 y 3.....	61
Fig. 4.9 Evolución del espesor de la torta de filtración y volumen de filtrado.....	62
Fig. 4.10 Evolución del radio líquido y radio sólido calculados contra el radio sólido medido con respecto al tiempo de la suspensión agua talco. Experimento 1.	63
Fig. 4.11 Evolución del radio líquido y radio sólido calculados contra el radio sólido medido con respecto al tiempo de la suspensión agua talco. Experimento 2.	64

Fig. 4.12 Evolución del radio líquido y radio sólido calculados contra el radio sólido medido con respecto al tiempo de la suspensión agua talco. Experimento 3. 64

Fig. 4.13 Evolución del espesor calculado con respecto al tiempo de la suspensión agua talco. Experimentos 1, 2 y 3. 65

Fig. 4.14 Evolución de la Saturación con respecto al tiempo de la suspensión agua talco. Experimentos 1, 2 y 3. 66

Fig. 4.15 Perfiles de Saturación determinados experimentalmente contra perfil obtenido del Modelo Comsol Multiphysics Versión 3.4 Modulo EDP 67

Fig. 4.16 Perfil de Saturación determinado por el Modelo en Comsol Multiphysics Versión 3.4 Modulo Difusión. 67

Fig. 4.17 Perfil de Saturación determinado por el Modelo en Comsol Multiphysics Versión 3.4 Modulo EDP..... 68

Fig. 4.18 Perfil de Permeabilidad relativa determinado a partir de datos experimentales. 69

Fig. 4.19 Perfil de Presión capilar determinado con los datos experimentales. 70

Índice de tablas

<i>Tabla 3.1 Caracterización de la suspensión (IFTS, Francia).....</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 3.2 Expresiones del subdominio</i>	<i>53</i>
<i>Tabla 3.3 Expresiones escalares</i>	<i>53</i>
<i>Tabla 3.4 Ecuaciones de contorno</i>	<i>53</i>
<i>Tabla 3.5 Malla</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 5.1 Determinación experimental de espesor de la torta</i>	<i>65</i>

Capítulo 1. Planteamiento de la investigación

1.1 Introducción

El proceso de filtración centrífuga se encuentra en industrias como: protección del medio ambiente, tratamiento de agua, industria alimentaria, farmacéutica, cosmética, etc. (Anlauf, 2007). Es uno de los métodos de separación sólido-líquido más eficientes y económicos, debido a que la centrífuga puede generar una gran caída de presión a través de la torta de filtrado dando lugar a altas tasas de filtrado y bajos contenidos de humedad. Una consecuencia de eliminar al máximo posible la mayor cantidad de líquido por deshidratación mecánica es que permite reducir los costos de energía en el proceso de secado, ya que los procesos de separación mecánicos generalmente preceden a un secado térmico. La energía consumida en los filtros convencionales oscila generalmente entre 0.5 a 10 kWhm⁻³ de la suspensión a separarse, que es 100-1000 veces menos energía que la del secado térmico (Couturier, 2007).

El funcionamiento de los filtros centrífugos se basa en la existencia de una diferencia de presión que obliga a una suspensión a atravesar el medio filtrante (el filtrado es impulsado a través del medio filtrante, con una fuerza de 100 a 2500 veces la gravedad (Sutherland, 2009), el sólido es lanzado hacia las paredes que se encuentran perforadas, y en la que se va a depositar comprimiéndose hasta formar una torta.

En el presente estudio se analizan datos experimentales del proceso de filtración centrífuga de una suspensión agua-talco, principalmente por tres razones: 1. El talco tiene características similares en tamaño al de la partícula original de interés, 2. El talco es un material inerte, y 3. Costos bajos de experimentación. El talco se utiliza ampliamente en muchos sectores industriales tales como papel, pinturas, cerámica, cosméticos y farmacéuticos, es insoluble en agua, lo que lo hace un buen material para este estudio, ya que no implican disolventes (Ahmed, 2005).

La determinación de la evolución de la torta de filtrado se realiza por medio de balances generales de masa. El proceso comienza con una torta filtrante de espesor cero. Es importante entender la naturaleza del flujo durante este tiempo, ya que representa con precisión las etapas iniciales del sistema a analizar. La tasa de filtración es afectada significativamente por el crecimiento de la torta, la distribución de tamaño y estructura de las partículas en la torta. Por lo tanto, para entender el mecanismo de filtración centrífuga es necesario conocer las propiedades de la torta de filtrado.

Las pruebas experimentales se llevaron a cabo en el Instituto de la Filtración y de Procesos de Separación en Francia, a partir de los datos obtenidos se requiere realizar un análisis para determinar cómo evoluciona la torta de filtración en el interior del tambor centrífugo y como se lleva a cabo el transporte de humedad en la torta constituida. El interés del proceso

se debe a lo complicado que resulta separar partículas con un tamaño igual o menor a 24 micras.

Con el fin de establecer modelos de predicción para la formación de la torta a presión constante (o inclusive variable), es un requisito previo poder generar datos experimentales fiables y repetibles, también es necesario ser capaces de predecir los parámetros como el volumen acumulado de filtrado y la tasa de crecimiento de la torta en función del tiempo (Tarleton, 1997).

La estructura de trabajo mediante la cual se desarrolla esta investigación comprende lo siguiente: En el capítulo 1 se presenta el planteamiento de la investigación, en el capítulo 2 se aborda el marco conceptual en donde se dan conocer los principios de la filtración centrífuga, así como sus principales áreas de aplicación; se presenta la teoría del transporte de masa para determinar los mecanismos de migración de humedad. En el capítulo 3 se aborda la Metodología, en la cual se describen las ecuaciones matemáticas que permitirán la determinación del espesor de la torta de filtración como una primera parte del trabajo, describiéndose a continuación las ecuaciones para determinar la transferencia de humedad en la torta. En el capítulo 4 se analizan y discuten los resultados obtenidos mediante las ecuaciones planteadas, comparándose las gráficas obtenidas mediante las ecuaciones con los datos obtenidos experimentalmente para ver la tendencia de la evolución del espesor de la torta de filtración. Finalmente en el capítulo 5 se plantean las conclusiones obtenidas de este estudio.

1.2 Planteamiento del problema

En los procesos de filtración centrífuga con partículas de tamaño promedio igual o menores a 24 micras, la separación es difícil. En la separación de suspensiones con estas características es difícil obtener un filtrado con los requerimientos de control de calidad en cuanto a turbidez.

Para poder controlar y optimizar el proceso es necesario vincular los parámetros de la operación con los parámetros de la torta filtrante. Si no se conoce la formación de la torta, es difícil predecir la resistencia que ofrece el medio filtrante, así como la resistencia que ofrece la torta misma. Debido a la distribución no uniforme de humedad en la torta formada, es necesario estudiar los mecanismos de transporte al interior de la torta durante el proceso de centrifugado.

1.3 Justificación

La filtración centrífuga se utiliza como técnica de separación de productos sólidos dispersos en una fase líquida, ello permite obtener sólidos lo más secos posibles gracias a la utilización de una presión elevada, lo cual no es posible en la mayoría de los demás filtros empleados en la separación sólido-líquido.

Separar las partículas sólidas de una suspensión requiere de grandes cantidades de energía si se utilizara solo calor. Posteriormente, una vez formada la torta de partículas sólidas, se requiere una cantidad de energía adicional para deshidratar dicha torta. En muchos procesos es necesario obtener la masa de sólidos con una baja saturación, pues con ello se disminuyen los requerimientos energéticos de un secado o incineración posterior. En efecto, la energía requerida para la deshidratación de una torta filtrante es mucho menor comparada con el calor requerido aplicando un secado térmico, en donde, para elevar un grado centígrado la temperatura del agua se requiere de una caloría (C_p del agua= 1 cal/gr $^{\circ}$ C) que es más alto que el de cualquier otra sustancia; el calor específico por gramo de agua es mucho más alto que el de un metal, por ejemplo. La energía consumida en los filtros convencionales oscila generalmente entre 0.5 a 10 kWhm $^{-3}$ de la suspensión a separarse, que es 100-1000 veces menos energía que la del secado térmico. Por tal motivo, algunos han propuesto que es deseable eliminar al máximo la cantidad de líquido utilizando un proceso mecánico (Couturier, 2007).

El desarrollo de un Modelo matemático que describa la evolución de la saturación en la torta constituida para partículas iguales o menores a 24 μ m permitirá comprender mejor los mecanismos de transporte de humedad en la torta.

La formulación de un balance de materia nos permitirá verificar la evolución del espesor de dicha torta y la formulación multifísica del drenado de líquido nos permitirá comprender mejor los mecanismos de transporte de esta operación.

1.4 Antecedentes

La centrifugación es un proceso ampliamente utilizado en la industria con fines de deshidratación mecánica y lavado, para obtener productos con bajo contenido de humedad y baja concentración de impurezas. En dichos procesos de separación, el lavado del producto de la filtración es un paso esencial para mejorar la calidad de los productos por la eliminación de impurezas. Durante el lavado y deshidratación de la torta, los cambios de saturación de la torta dependen de las condiciones de flujo y no siempre pueden ser medidos y controlados con precisión.

La posibilidad de aplicar presiones elevadas a las masas de líquido, la duración de procesos relativamente cortos y de alto rendimiento, así como modos de operación discontinuos hacen a las centrifugadoras muy atractivas y aplicables a muchos productos de partículas (Ruslim, 2009).

Para reducir los costos de energía en el proceso de secado, los procesos de separación mecánicos generalmente preceden a un secado térmico. En consecuencia, es ventajoso eliminar al máximo posible la mayor cantidad de líquido por deshidratación mecánica.

De acuerdo con estas consideraciones, se llevaron a cabo distintas investigaciones para mejorar la cinética de la filtración y reducir el contenido final de humedad de la torta

residual (Tarletón, 1992). Dentro de las posibles alternativas consideradas para mejorar la deshidratación mecánica para ayudar a los procesos convencionales de filtración se encuentran: la electricidad (Iwata, 1991 y Saveyn, 1991), acústica (Smythe y Wakeman, 2000), magnética (Stolarski, 2006) o campos térmicos (Gerl, 1994).

La filtración centrífuga ha sido de interés en varias investigaciones. Algunas de las teorías de drenado se basan en correlaciones empíricas como en los trabajos de física de Bender (1983). Bender propone Modelos Físicos para el drenado asumiendo un flujo pistón, así como una película de flujo en superposición. Stadager (1995) investigó la combinación de la presión diferencial y el campo centrífugo para un mejor proceso de deshidratación. Wakeman y Tarleton (1991) y Tarleton (1992) describen el uso de un campo eléctrico o acústico para ayudar al proceso de separación mecánica. El movimiento del líquido se debe a la acción de un campo eléctrico. Ruslim et al (2009) investigaron la influencia de la saturación inicial y temporal del lavado de la torta, con partículas de PVC y arena de sílice en un campo centrífugo. Hwang K. y Ku-Haw Chou (2009) proponen un método numérico para estimar la presión capilar y la permeabilidad a varias saturaciones en tortas de filtración. La saturación de la torta se simuló conociendo las relaciones entre la presión capilar, permeabilidad de la torta y saturación de la torta. Las desviaciones entre la saturación simulada y los datos experimentales fueron del 2%. Ellos encontraron que la saturación en el equilibrio para tortas de talco compresibles con baja porosidad es mucho más alta que para tortas incompresibles de Al_2O_3 a una velocidad fija de rotación. El incremento de la velocidad de rotación es mucho más eficiente para tortas incompresibles en la deshidratación centrífuga. Wakeman y Vince (1986), desarrollan un modelo Físico-Matemático con el fin de describir la cinética de la centrífuga en el drenado de medios porosos, la solución es desarrollada con base en un diseño de ingeniería con el cual se pueden obtener los datos; es totalmente predictivo, siempre que sea posible medir la saturación en el equilibrio. Los conceptos y ecuaciones relacionadas con la presión capilar y la permeabilidad relativa que se encontraron pudieron generar un modelo exitoso de gas forzado y deshidratación gravitacional. Buscall y White (1987) desarrollaron una descripción fenomenológica de la deshidratación de una suspensión de lodos en forma de redes continuas. La teoría fenomenológica demostró ser precisa.

Un problema que puede ocurrir en procesos de lavado realizados en los aparatos de filtración como filtros o centrífugas es la mala distribución del agua de lavado. Esto sucede en el lavado de tortas finas y uniformes, que son sensibles a la formación de grietas debido a la físico-química de la torta o a efectos capilares. La distribución no homogénea del agua de lavado dentro de la torta durante el flujo multifísico incorpora aire, lo cual ocasiona el agrietamiento de las tortas de filtración (Ruslim, 2009).

Los modelos teóricos se han desarrollado para permitir una descripción física del proceso de lavado de la torta, algunos de estos modelos se presentan por Wakeman (1990). Aunque los modelos teóricos son útiles para indicar los mecanismos dominantes de lavado por las comparaciones con los datos experimentales, los experimentos aún se requieren para determinar el comportamiento del material bajo diferentes condiciones del proceso (Ruslim, 2009).

1.5 Delimitación del estudio

Estamos interesados en:

Formulación de ecuaciones para la predicción, o simulación del espesor de la torta de filtración.

Transporte de humedad en la torta.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo general:

Analizar el proceso de filtración centrífuga de una suspensión agua-talco con el propósito de simular el crecimiento de la torta y resolver un modelo para la transferencia de humedad en la torta constituida.

1.6.2 Objetivos específicos:

A) Realizar el balance general de masa en la centrífuga para determinar la evolución de la torta de filtración con respecto al tiempo.

B) Formular una descripción matemática de los mecanismos de transporte del líquido en la torta filtrante.

1.7 Hipótesis

En medios porosos constituidos por partículas finas ($24 \mu\text{m}$), estas se comprimen por la acción de la fuerza centrífuga, la presión capilar aumenta y entonces compite con la presión inducida por la fuerza centrífuga, lo cual impide la evacuación total de líquido en la torta.

Capítulo 2. Estado del Arte

2.1 Filtración centrífuga

La teoría convencional de la filtración/consolidación se origina desde los trabajos pioneros de Ruth (Lee, 2000), quien empleando analogías eléctricas propuso la teoría de la doble resistencia. Conforme a esta teoría, la resistencia total en la filtración comprende una serie de resistencias en el medio y en la torta. Tiller, et al (1993) desarrollaron la teoría contemporánea de la doble resistencia basados en la torta de filtración compresible. El desarrollo de la teoría convencional consiste en la combinación de la ecuación del balance de masa y la ecuación de balance de momento (ley de Darcy) para la fase líquida en la torta, asumiendo únicamente que el punto de contacto existe entre las partículas (Lee, 2000).

La separación sólido / líquido es un proceso amplio en la tecnología de filtración de sólidos. A pesar de que la torta de filtración ha sido ampliamente estudiada durante los últimos 60 años, sólo abarca una fracción en el campo de la tecnología de separación sólido-líquido. La torta de filtración predomina en los dispositivos habituales de separación tales como centrífugas, filtros de vacío, filtros prensas, de banda y filtros de presión automáticos (Mayer, 2000).

La centrifugación puede ser definida como una operación elemental de separación de mezclas:

- * De dos fases líquidas, la separación centrífuga de fases se debe a la diferencia de densidades de los componentes sometidos a un campo centrífugo (Robatel, 1989).
- * De una fase sólida en suspensión de una fase líquida.
- * De dos fases líquidas contenidas en una tercera fase sólida.

Por la acción de una fuerza centrífuga aplicada a los componentes, la mezcla es impulsada por un dispositivo llamado centrífuga. La centrífuga logra estas separaciones mecánicas por medio de la fuerza gravitacional acelerada alcanzada por la rotación rápida. En la práctica, el término cubre una amplia gama de equipos, con usos en la industria; la fecha de la invención por Gustaf de Laval de una centrífuga para un separador de crema fue en 1878, con un simple tambor de giro con arandelas (Sutherland, 2009).

En la filtración centrífuga la separación de los constituyentes se efectúa por el camino (intersticios) de la fase líquida (o de las fases líquidas) a través de un elemento filtrante por la acción de un campo centrífugo, este elemento filtrante fijado contra la pared interna del rotor, es el medio en el que se depositan las partículas sólidas constituyentes y una capa llamada torta. Es necesario por lo tanto una filtración de apoyo en que la presión de la filtración es ejercida sobre un anillo líquido en rotación.

Como regla general, la filtración centrífuga se utiliza como técnica de secado de productos sólidos dispersos en una fase líquida permitida, gracias a una presión elevada en la que se trata de obtener sólidos más secos que los filtros a vacío o a presión al tiempo que permite un lavado de la torta en la descarga.

El tipo más simple de filtro centrífugo es un tambor que gira alrededor de un eje vertical con motor, y el eje, ya sea debajo del tambor o por encima de él, la toma de este último para facilitar la remoción de sólidos. El tambor puede adoptar la forma de una canasta perforada (malla de alambre gruesa o placa perforada), o puede tener sólo paredes perforadas. Cuando los sólidos acumulados alcanzan un cierto nivel, la alimentación se detiene y la acumulación de sólidos en la torta pueden ser lavados, después se deja desaguar por el drenaje. La rotación es entonces detenida y los sólidos son retirados ya sea excavado, o por el levantamiento en una bolsa de material filtrante. El tambor (o filtro de mangas) se lava y se repite el proceso (Sutherland, 2009).

La deshidratación de la torta es un proceso posterior a la filtración en el que el filtrado atrapado en los poros de las tortas de filtración se elimina por algún medio mecánico o hidrodinámico para ahorrar energía en el secado térmico o mejorar las cualidades de manipulación de las tortas de filtración. Los medios mecánicos se utilizan para comprimir la torta y eliminar el exceso de líquido (Hosten, 2002).

La filtración centrífuga ha sido ampliamente utilizada en procesos de la industria química, de alimentos, farmacéutica, cosmética, ambiental, ingeniería bioquímica, etc. (Hwang, 2007). La mayoría de las plantas de producción con tratamiento sólido-líquido generan una gran cantidad de lodos residuales. Muchos tipos de minerales se producen en una amplia gama de desechos industriales, incluidos los de la minería, la cerámica, papel y las industrias de la salud. Hoy en día, de acuerdo a las nuevas regulaciones ambientales, se requiere de la reducción de los volúmenes de residuos. Debido al costo relativamente bajo de energía, los procesos de filtración se prefieren a menudo a los dispositivos de secado térmico empleados para lograr esta reducción de volumen (Mihoubi, 2003).

2.1.1. Aplicaciones principales

Un gran número de separaciones mecánicas pueden ser efectuadas por centrifugación, las más comunes incluyen las siguientes operaciones:

Clarificación, esta operación consiste en separar una fase sólida de una fase líquida, se busca:

Recuperar la fase líquida solamente (tan puro como sea posible), cuando el sólido, a menudo en baja proporción, constituye una impureza. Ejemplos:

- Purificación de aguas residuales urbanas o industriales (industria del carbón, curtiduría, papelería, impresión); en general, lo hace por centrifugación antes de que una parte del agua sea tratada después de una decantación estática.

- Clarificación de agua destilada.
- Producción del vino de Champagne.
- Clarificación de jugos de frutas, de cerveza, del vino.
- Clarificación de aceites minerales.
- Clarificación de lacas y barnices.

Recuperar solo la fase sólida, operación que algunos llaman extracción, pero eso no debe confundirse con la operación de transferencia de materia. Ejemplos:

- Decantación de suspensiones de polímeros o copolímeros de química orgánica.
- Recuperación de vitaminas, de metales.
- Clarificación de productos minerales (sales de cadmio, bario y aluminio).

Ya sea para recuperar las laminas de la fase sólida en la fase líquida separadas lo más perfectamente posible. Ejemplos:

- Clarificación de aceites de prensa (maíz, olivo, palma, soya, cacahuete).

Separación de dos fases líquidas con densidades diferentes, donde la una y la otra se pueden recuperar. Ejemplos:

- Deshidratación de aceites minerales, alquitranes.
- Separación del látex, los glóbulos rojos del plasma sanguíneo (tratamiento de sangre fresca).
- Formación de crema de leche.

Clarificación y separación combinadas, la fase sólida constituye frecuentemente la impureza. Ejemplos:

- Purificación de aceites de motor.
- Purificación de combustibles.

Clasificación de partículas sólidas de diferentes tamaños en la suspensión en un líquido. Ejemplos:

- Tratamiento de lodos de perforación petroleros.
- Clasificación de caolínicas, óxido de titanio.
- Clasificación de pigmentos.

Concentración de una fase sólida en suspensión. Ejemplos:

Concentración de materias proteínicas, levadura y almidón.

Ecurrido o secado de productos sólidos por eliminación de líquido que está en la suspensión. Ejemplos:

- Deshidratación del carbón (contenido en las aguas de lavado).
- Secado de sal marina, de productos cristalinos o amorfos de la industria química, minerales u orgánicos, farmacéuticos, etc.
- Secado del almidón, de la fécula.
- Secado de textiles
-

Lavado de productos sólidos después de la eliminación del líquido madre.

Lavado de productos cristalinos de la industria química y farmacéutica (Robatel, 1989).

La deshidratación de la torta es un proceso posterior a la filtración en el que el filtrado atrapado en los poros de las tortas de filtración se elimina por algún medio mecánico o hidrodinámico para ahorrar energía en el secado térmico o mejorar las cualidades de manipulación de las tortas de filtración. Los medios mecánicos se utilizan para comprimir la torta y llevar las partículas más cerca con el fin de que se elimine el exceso de líquido (Hosten, 2002).

2.1.2. Formación de la torta

Como se observa en la figura 2.1 (a), para realizar una filtración centrífuga se requiere de un recinto denominado cesto filtrante, el cual posee perforaciones en su superficie cilíndrica. Sobre esta pared perforada se coloca un medio filtrante el cual retendrá las partículas sólidas contenidas en la suspensión a separar. El líquido que atraviesa el medio filtrante abandonará el rotor a través de las perforaciones del cesto. La sedimentación conduce en la mayoría de los casos a la formación de una zona líquida en la parte superior de la torta y esta cantidad de líquido debe superar la resistencia máxima en la filtración durante el drenado (Anlauf, 2007).

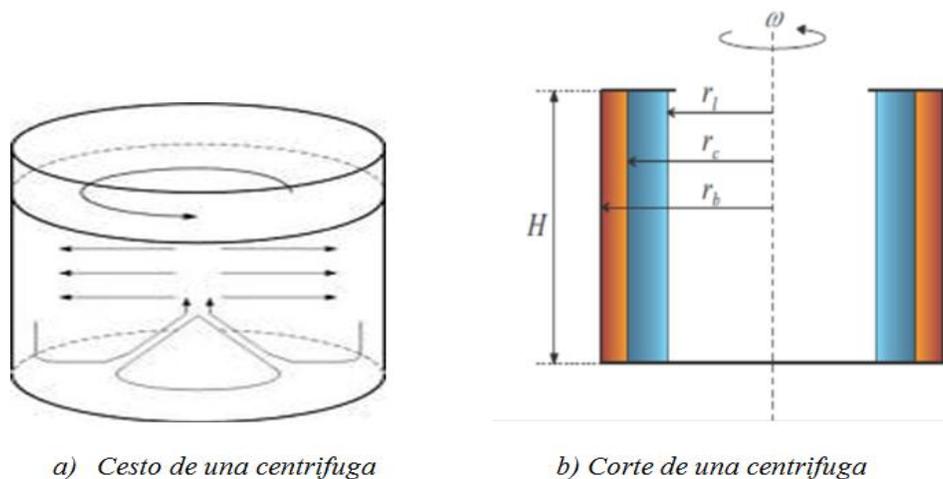


Fig. 2.1 Filtración centrífuga

En la figura 2.1 (b), podemos observar el corte de un cesto filtrante de radio r_b , en el que se ha retenido una torta de espesor $(r_b - r_c)$, sobre la cual queda una capa de líquido retenido, de espesor $(r_c - r_1)$. La dimensión $(r_b - r_1)$ corresponde al ancho del borde superior del cesto y determina el máximo espesor de sólido o líquido retenible en la centrifuga.

El propósito de la filtración puede ser obtener un líquido clarificado, limpio de sólidos, o bien, el producto sólido lo más seco posible, es decir, con la menor cantidad de líquido que se pueda conseguir.

El ciclo de operación puede ser continuo o discontinuo. En cuanto a la naturaleza de los sólidos, se puede tener: *Torta compresible*, si los sólidos son deformables.

Torta incompresible, si los sólidos son rígidos.

Si los sólidos de la suspensión son muy finos o viscosos, se forma una torta densa e impermeable la cual obstruye en seguida el medio filtrante. En consecuencia es necesario añadir ciertos aditivos que aumenten la porosidad de la torta, se pueden usar como tales la perlita, tierras de diatomeas o la celulosa de madera. Estos materiales forman lechos de porosidades muy elevadas, provocan la reducción de la resistencia específica de la torta a la vez que aumentan su grosor y hacen que esta sea más compresible. Estos aditivos suelen emplearse cuando el filtrado es el producto valioso y el residuo puede desecharse.

Normalmente es necesario realizar un lavado de la torta para recuperar el líquido que haya quedado retenido, para ello se utiliza un disolvente miscible con el filtrado (usualmente agua). En una primera etapa del lavado se retira el filtrado sin producirse una dilución apreciable, de esta manera se retira hasta el 90 % del filtrado retenido. En la segunda etapa del lavado, el disolvente llega a los huecos menos accesibles del filtro y la concentración del filtrado es muy baja.

El funcionamiento de los filtros centrífugos se basa en la existencia de una diferencia de presión que obliga a una suspensión a atravesar el medio filtrante. En las centrifugas la fuerza impulsora se aporta como energía cinética, el sólido es lanzado hacia la periferia, que se encuentra perforada y en la que se va a depositar comprimiéndose hasta formar una torta.

2.1.3. Factores principales que afectan la filtración

La mayoría de las plantas de producción con tratamiento de mezclas sólido-líquido generan una gran cantidad de lodos residuales o partículas sólidas. Muchos tipos de minerales se producen en una amplia gama de desechos industriales, incluidos los de la minería, la cerámica, papel y las industrias de la salud. Hoy en día, de acuerdo a las nuevas regulaciones ambientales, se requiere de la reducción de los volúmenes de residuos. Debido al costo relativamente bajo de energía, los procesos de filtración se prefieren a menudo a los dispositivos de secado térmico empleados para lograr esta reducción de volumen (Mihoubi, 2003).

La reducción del contenido de líquido es importante, por la disminución de las necesidades de energía para el secado y la mejora en el resultado de la incineración, dando bajas fracciones de humedad. La energía necesaria para reducir el líquido de la torta es insignificante en comparación al calor necesario para el secado. Por lo tanto, es deseable eliminar la cantidad máxima posible por presión mecánica (Mihoubi. 2003).

La calidad y velocidad de separación dependen significativamente de varios parámetros (Wakeman y Tarleton, 1999 y Wakeman, 2007) clasificados en tres categorías: a) Las propiedades de las fases presentes, incluye las propiedades físicas del sólido y del líquido, tamaño, forma y distribución de las partículas. b) El estado del sistema, incluye la concentración de la suspensión, dispersión de las partículas y porosidad de la torta filtrante. Y c) Las propiedades macroscópicas, estas pueden ser, la permeabilidad de la torta, su resistencia específica y la velocidad final de las partículas.

- *La naturaleza de la suspensión.*
- *La fuerza impulsora aplicada.*
- *La resistencia de la torta de filtración.*
- *La temperatura de la suspensión.*
- *El tamaño de las partículas.*
- *La concentración de los sólidos en suspensión.*
- *El efecto de la utilización de floculantes y de la agitación, y*
- *La naturaleza del medio filtrante.*

El medio filtrante es la barrera que retiene los sólidos y deja pasar el líquido, puede ser un tamiz, una tela, un tejido de fibras, fieltro, membranas poliméricas o un lecho de sólidos, debe ser resistente mecánicamente a la acción corrosiva del fluido, mostrar poca resistencia al flujo del filtrado, así como permitir que la torta se desprenda fácilmente.

En el caso de la sedimentación, donde la conducción resulta a partir de la diferencia de la densidad entre las partículas sólidas y la suspensión de líquido (o entre dos líquidos inmiscibles), la separación se logra con una fuerza de 1000 a 20.000 veces la de gravedad. En el caso de la filtración, el filtrado es impulsado a través del medio filtrante, y cualquier torta constituida en él, con una fuerza de 100 a 2500 veces la gravedad (Sutherland, 2009).

Un estudio reciente realizado por DuPont (Mayer, 2000), reveló que en la mayoría de los proyectos, los retrasos y sobrecostos fueron causados por el procesamiento de sólidos, lo que dio lugar a paradas de planta. Específicamente en lo que respecta a la filtración de torta hay que preocuparse por la mezcla de transporte aguas arriba del dispositivo de separación, así como la remoción de sólidos y transporte aguas abajo. En algunos casos, el transporte de sólidos y acumulación en el dispositivo, también deben tomarse en cuenta.

El funcionamiento de los medios de filtración exige que las partículas sólidas depositadas contra la pared del rotor se mantengan en una capa más o menos gruesa, en esas condiciones de presión desarrolladas por la centrifuga se tiene una permeabilidad suficiente. En la práctica, el diámetro mínimo de las partículas puede ser alrededor de $5\mu\text{m}$.

Para algunos de los constituyentes, la permeabilidad de la torta disminuye cuando la presión desarrollada en la canasta de la centrifuga aumenta (Robatel, 1989).

2.1.3.1 Influencia de las propiedades de las partículas

En los procesos de separación sólido / líquido, hay cuatro razones principales para conocer los tamaños de las partículas (Wakeman, 2007):

1. Evaluar los sólidos con el fin de predecir su probable comportamiento en un proceso de separación. Esto puede consistir en ayudar en la elección inicial entre la separación por diferentes métodos, para seleccionar o probar un proceso con un tratamiento previo apropiado al medio filtrante, para mejorar la eficiencia de una maquina ya existente, o para estimar el tamaño de una nueva. En cualquiera de estos, el objetivo es predictivo.
2. Para especificar el funcionamiento de un medio filtrante en términos de su capacidad para retener las partículas de diferentes tamaños. Este tipo de evaluación es a menudo asociada con el pulido de líquidos y la especificación de un tamaño de poro nominal de un medio pulido, o para la evaluación del desempeño de la separación por dispositivos tales como centrifugadoras para sedimentación.
3. Para medir y especificar la calidad de un líquido cuando este es el producto valioso de un proceso de filtración. En este caso, las partículas que quedan en suspensión se diluyen en la concentración, y por lo tanto se vuelven difíciles de filtrar. A menudo sólo se requiere la concentración total de sólidos, como, por ejemplo, en los procesos de tratamiento de agua. Sin embargo, en las operaciones tales como la filtración de líquidos o fluidos hidráulicos, el tamaño (y en ocasiones la forma) de los sólidos restantes es fundamental.
4. En muchas operaciones, el sólido es el producto valioso. En este caso rara vez se recupera en un estado completamente seco y a menudo requiere un proceso más, el cual suele ser normalmente un proceso de secado. La evaluación del producto es necesaria para el control de calidad y así no relacionarla únicamente con el proceso de separación.

Tres tipos de parámetros pueden ser identificados para describir completamente un sistema sólido / líquido. Estos son: las propiedades primarias, el estado del sistema, y las propiedades macroscópicas (Wakeman, 2007).

Las propiedades principales (primarias) son los que se puede medir de forma independiente de los otros componentes del sistema, y son las propiedades físicas de los sólidos y líquidos; el tamaño de partícula (x), el tamaño distribución y forma de las partículas, las propiedades superficiales de las partículas en su entorno. La forma de las partículas que interactúan con el líquido que las rodea, se convierte en fundamental, esto porque las partículas más pequeñas (en particular, $<10\mu$ m), son el atractivo de red o fuerzas de repulsión entre partículas. Estos factores deciden si las partículas, por ejemplo, se asientan poco a poco o rápidamente, si pueden ser mantenidas por algún medio filtrante, o si la torta resultante tendrá un paño seco o una coherencia descuidada.

La descripción del estado de un sistema (porosidad, homogeneidad y el grado de dispersión de las partículas) se combina con las propiedades principales para controlar las propiedades macroscópicas.

Las propiedades macroscópicas son: la permeabilidad, resistencia específica de un filtro, la velocidad terminal de sedimentación de las partículas, o la tasa mayor de sedimentación de las partículas en suspensión.

Efecto del tamaño de las partículas en la torta.

En los filtros centrífugos el tamaño de partícula no sólo afecta la resistencia específica de la torta, sino también la saturación irreductible (contenido de humedad) de la torta, dando lugar a una reducción significativa del tiempo de giro.

La resistencia específica de una torta de filtrado es una medida de la resistencia al flujo de fluido a través de la torta, y es inversamente proporcional a la permeabilidad de la torta de filtración por:

$$\alpha_{av} = \frac{1}{\rho_s(1-\varepsilon)k} \quad \text{Ec. 2.1}$$

Donde ρ_s es la densidad real de los sólidos, ε la porosidad de la torta, y k es su permeabilidad. La permeabilidad es inversamente proporcional a S_0^2 , lo que conduce a la relación entre determinadas resistencia y tamaño de las partículas:

$$\alpha_{av} \propto \frac{1}{x_{sp}^2} \quad \text{Ec. 2.2}$$

La ecuación. 2.2 muestra que la resistencia específica es inversamente proporcional al cuadrado del tamaño de la partícula, por lo que si el tamaño de las partículas disminuye, aumenta la resistencia. Esto es lo que se debería esperar, que la resistencia a la fuerza de arrastre del flujo de fluidos a través de la torta debe ser proporcional a la superficie de las partículas en la torta. Por lo tanto, al reducir el tamaño de las partículas en un factor de 10 (por ejemplo) aumenta la resistencia específica en un factor de 100.

Si suponemos que la ecuación de Carman-Kozeny es válida para describir la porosidad de la torta, a continuación:

$$\alpha_{av} = \frac{180}{\rho_s x_{av}^2} \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \quad \text{Ec. 2.3}$$

La porosidad es independiente del tamaño de las partículas, pero es una función de la distribución del tamaño de las partículas.

Cuando el rango de tamaños es más grande que las partículas, estas son capaces de acumularse más y más para formar una torta, las partículas más pequeñas ocupan los espacios entre las más grandes.

La resistencia específica de tortas de filtración es un parámetro freno importante en la evacuación del líquido.

En los filtros centrífugos el efecto de aumentar o disminuir el tamaño de partícula es considerable, ya que no sólo afecta la magnitud de la resistencia específica de la torta, sino también la saturación irreductible (contenido de humedad) de la torta, dando lugar a una reducción o aumento significativo del tiempo de giro. Una mayor carga de sólidos afecta principalmente al radio interno de la superficie de la torta, es decir, el espesor de la torta (Wakeman, 2007).

Muchos factores experimentales pueden influir en la reducción del contenido de agua y, en consecuencia, el rendimiento del proceso. Los factores críticos del procesamiento son la temperatura, presión, tiempo, tamaño de partícula y el pH (Mahmoud, 2008).

2.1.4 Teoría de la Filtración Centrífuga.

La filtración centrífuga se basa en el principio común de que la rotación de un objeto en torno a un eje central y a una distancia radial constante de dicho eje, produce una fuerza que actúa sobre dicho objeto. Si el objeto que se hace girar es un recipiente cilíndrico, la suspensión contenida en él desarrollará una fuerza llamada fuerza centrífuga, hacia las paredes del recipiente. Esta obliga a pasar un líquido a través de un lecho o torta de filtrado en el interior de una cesta o tambor de rotación perforado.

Las partículas suspendidas en un fluido, se separan mecánica o físicamente usando un medio poroso que retiene las partículas en forma de fase separada permitiendo el paso del filtrado sin sólidos. Las partículas sólidas suspendidas pueden ser muy finas (del orden de micrómetros) o bastante grandes, muy rígidas o plásticas, esféricas o de forma muy irregular, agregados o partículas individuales. El producto valioso puede ser el filtrado sin sólidos o la torta sólida.

La alimentación de la suspensión se descarga por el centro de la cesta o tambor centrífugo. Al entrar la alimentación, es arrastrada de inmediato hacia las paredes del tazón. La fuerza centrífuga suele ser tan grande, que es posible despreciar la fuerza de gravedad. Entonces la capa líquida asume una posición de equilibrio con su superficie casi vertical. Las partículas se precipitan horizontalmente hacia afuera, presionándose sobre la pared vertical del tazón.

Se desprecian los efectos de la gravedad y de las variaciones de energía cinética, por lo que la caída de presión debida a la acción centrífuga se iguala a la caída de presión en el líquido que circula a través de la torta; así mismo, se supone que la torta está completamente llena de líquido, que el flujo de líquido es laminar, que la resistencia del medio filtrante es constante y que la torta es prácticamente incompresible de forma que se puede utilizar una resistencia específica media constante.

Teniendo en cuenta estas suposiciones, se predice la velocidad de flujo de líquido a través de la torta, suponiendo, en primer lugar, que el área A disponible para el flujo no varía con el radio (McCabe, 1991).

La fuerza centrífuga actúa en forma perpendicular a la dirección del movimiento y es dirigida radialmente hacia el interior. Es conveniente considerar el proceso en una centrífuga, y la dinámica asociada con la misma, como un marco que gira a la misma velocidad angular que la centrífuga. Un observador en el sistema rotatorio experimenta una aceleración centrífuga dirigida radialmente hacia fuera del eje de rotación con magnitud:

$$a = \omega^2 r \quad \text{Ec. 2.4}$$

Donde ω es la velocidad angular de la estructura giratoria y r es el radio del eje de rotación. Cuando un cuerpo líquido gira en un cuerpo sólido, la velocidad tangencial o circunferencial es linealmente proporcional al radio:

$$V_g = \omega r \quad \text{Ec. 2.5}$$

El proceso a menudo comienza, sin embargo, con una torta filtrante de espesor cero, pero habrá un período de tiempo durante el cual se tendrá una sola dimensión, el análisis constante de la fuerza centrífuga en el proceso será exacto. Es importante entender la naturaleza del flujo durante este tiempo, ya que representa con precisión las etapas de la desaturación.

Efecto centrífugo

Fuerza centrífuga: una partícula de masa m (kg) animada de un movimiento circular de radio r(m), a una velocidad angular ω (rad/s) es sometida a una fuerza centrífuga $F_c = m\omega^2 r$ en Nw aplicada a lo largo del radio, y su peso $P=mg$ en Nw, g es la aceleración de la gravedad ($g= 9.81 \text{ m/s}^2$).

El aumento del campo de la gravedad está definido por la ecuación adimensional:

$$K = \frac{F_c}{P} = \frac{\omega^2 r}{g} \quad \text{Ec. 2.6}$$

Llamada indiferentemente aceleración centrífuga, efecto centrífugo o efecto g. si expresamos la velocidad de rotación N en revoluciones por minuto y si definimos la centrifugación por su diámetro D en metros, entonces:

$$\frac{F_c}{P} = \left(2\pi \frac{N}{60}\right)^2 \frac{D}{2g} = 5.589 \times 10^{-4} DN^2 \quad \text{Ec. 2.7}$$

La presión centrífuga de filtración es definida considerando una corona cilíndrica de líquido de espesor dr situada a una distancia r del eje de rotación de la cesta, de masa primaria:

$$dM = \rho_l(2\pi r h dr) \quad \text{Ec.2.8}$$

Con ρ_l (kg/m^3) masa en volumen de líquido. Este elemento del líquido es sometido a la acción de la fuerza centrífuga.

$$dF_c = (\omega^2 r) dM = \rho_l \omega^2 r (2\pi r h) dr \quad \text{Ec. 2.9}$$

La presión centrífuga de filtración elemental resultante de líquido es.

$$dP_c = \frac{dF_c}{2\pi r h} = \rho_l \omega^2 r dr \quad \text{Ec. 2.10}$$

Para la integración del espesor de la capa líquida, obtenemos la expresión de la presión de la fuerza centrífuga (Robatel, 1989).

$$\Delta P_c = \int_{r_g}^{r_0} dP_c = \frac{1}{2} \rho_l \omega^2 (r_0^2 - r_g^2) \quad \text{Ec. 2.11}$$

La velocidad con la que el fluido atraviesa el material depende de tres factores básicos:

- La porosidad del material;
- La densidad del fluido considerado y,
- La presión a la que está sometido el fluido.

Para ser permeable, un material debe ser poroso, es decir, debe contener espacios vacíos o poros que le permitan absorber fluido. A su vez, tales espacios deben estar interconectados para que el fluido disponga de caminos para pasar a través del material.

2.2 Mecanismos de Transporte en medios porosos

2.2.1 Introducción

El movimiento de humedad a través de medios porosos es básicamente un fenómeno trifásico complejo, en el que tiene lugar un transporte capilar tanto en forma de vapor como de agua líquida. La modelización del transporte de humedad juega un papel fundamental en la prevención de los problemas que origina, tales como el rendimiento y la vida útil de los materiales. El objetivo es describir el flujo de humedad. El éxito en la aplicación del modelo está condicionado a la disposición de una base de datos completa y precisa de las propiedades de transporte y almacenamiento de humedad de los materiales. Sin embargo, resulta difícil diferenciar el transporte de humedad en estado vapor del estado líquido, así como reproducir y garantizar la acción de un único potencial que actúe como fuerza motriz causante del transporte de humedad en cada estado.

Modelos matemáticos.

Son analogías de una realidad física y son creados con el propósito de aproximarse a la realidad de la mejor manera. Un modelo matemático describe las propiedades y características de un sistema real en términos de variables matemáticas y operadores, y puede ser validado con datos experimentales (Vgnote-Peña y Martínez-Rojas, 2006).

Los modelos matemáticos proporcionan una mayor comprensión del proceso, optimizan el proceso y tienen la capacidad de predicción, además facilita los procesos de automatización y capacidad de control (Turner y Perré, 2004).

Modelos fenomenológicos.

Un modelo fenomenológico obedece a las leyes fundamentales de la física. Las diferencias básicas entre los modelos fenomenológicos desarrollados es, primero, el número de variables de estado que pueden ser utilizadas para describir un proceso, y la segunda diferencia se encuentra en el número de dimensiones espaciales utilizadas para describir el proceso, existiendo modelos unidimensionales, bidimensionales y tridimensionales (Truscott, 2005).

En los modelos fenomenológicos también se emplean diferentes tipos de escalas para representar el medio con el que se está trabajando.

En el siguiente capítulo se define la estructura de un medio poroso y los diferentes mecanismos de almacenamiento y transporte que se dan en ellos, despreciando la poca influencia de la temperatura en la difusión de vapor, se enuncian las ecuaciones fundamentales que gobiernan los fenómenos de transporte. Se deducen las ecuaciones básicas para la transferencia isotérmica de humedad a partir de la ley de conservación de masa, combinándola con las ecuaciones de transporte y con las ecuaciones de estado.

2.2.2 Descripción de medio poroso

Un medio poroso consiste en una fase sólida (la matriz) y un sistema de poros abiertos y cerrados. Los poros suelen estar rellenos con un fluido. Las partes del medio poroso que contienen la fase líquida y la fase gaseosa se denominan poros, los poros están interconectados de tal manera que existe un número de caminos continuos desde un extremo del medio hasta el otro.

Una definición más completa es la formulada por Bear (1968): “un medio poroso es una porción del espacio ocupada por materia heterogénea o multifase. Como mínimo, una de las fases comprendidas no es sólida. Puede constar de fase gaseosa y/o líquida. La fase sólida se denomina matriz sólida. El espacio dentro de los dominios del medio poroso que no sea parte de la matriz sólida se denomina “espacio de poros”.

El medio poroso queda microscópicamente definido por las características geométricas y topológicas de los poros y por un conjunto de variables de estado fundamentales para cada fase.

A medida que una matriz sólida se deshidrata, la interconectividad entre los poros se vuelve irregular y discontinua, ya que el aire sustituye al agua en muchas posiciones. Más aún, en contraste con los flujos saturados donde la fuerza centrífuga juega un rol dominante, las fuerzas moleculares se vuelven aquí extremadamente importantes. En las interfaces aire-agua se desarrollan fuertes presiones capilares negativas. Estas presiones cambian con el tamaño efectivo de los poros, y por lo tanto, dependen de la estructura particular del material y de su grado de saturación. Cuanto más seco está el material, tanto más pequeños y discontinuos son los poros que contienen agua, y mayores son las fuerzas capilares.

Los cambios en el contenido de humedad no sólo afectan las fuerzas, sino también dificultan el camino del agua a través de los poros. El problema se complica aún más por el hecho que, bajo ciertas condiciones, el flujo de agua se realiza no sólo en la fase líquida, sino también como vapor. Este flujo no sólo depende de los potenciales centrífugos y capilares, sino también de la densidad del vapor y de los gradientes de temperatura en la torta.

Específicamente, se supone que el flujo es transitorio, por lo que la porosidad de la torta es constante y no hay flujo de agua en el sólido por convección con el movimiento (Tiller y Hsyung, 1993).

El transporte de agua desde el sólido hasta el gas constituye un fenómeno de transferencia de materia, y como hay un cambio de fase del compuesto transferido (agua). Los mecanismos de transporte se clasifican en tres categorías (Sharma *et al.* 2003):

1. Evaporación a partir de una superficie libre, que sigue las leyes de la transferencia de calor y masa desde un objeto húmedo.
2. Flujo de líquido en capilares
3. Fuerza centrífuga

2.2.3 Volumen elemental representativo

Whitaker (1977) y posteriormente Bear (1990), proporcionan bases más sólidas para la formulación de ecuaciones que gobiernan el transporte de humedad y calor en medios porosos, aplicando la aproximación de medio continuo basándose en técnicas de promediado volumétrico. Bear introdujo el concepto de volumen elemental representativo, al objeto de definir el valor promedio de las propiedades de transporte y almacenamiento de humedad del medio poroso a nivel macroscópico.

En el análisis que hace Whitaker (1997), el movimiento de líquido y vapor a través de un medio rígido poroso, es como el que se muestra en la figura 2.2. Se considera que α

representa la fase sólida, β representa la fase líquida y γ la fase gas que consiste en vapor de agua y un gas inerte usualmente aire, que es insoluble en la fase β .

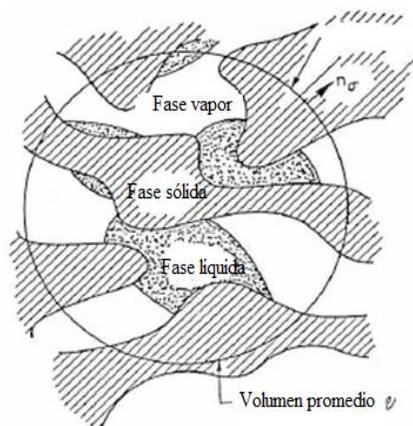


Fig. 2.2 Estructura del medio poroso

Según este concepto, cada punto del volumen total V del medio poroso se considera centroide de un volumen elemental representativo dv . La posición del centro del VER en un sistema de coordenadas global se describe por el vector de posición x . la fase sólida, líquida y gaseosa coinciden en el mismo punto geométrico.

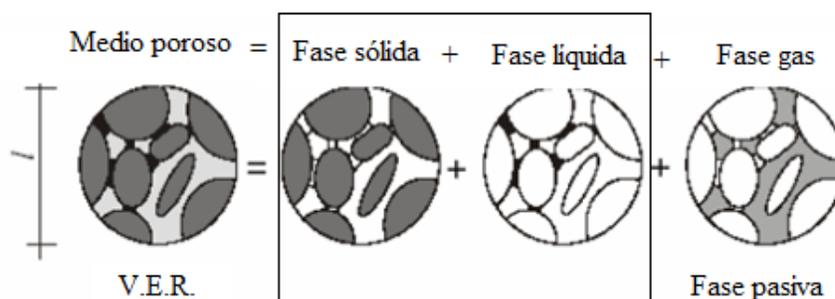


Fig. 2.3 Medio poroso interpretado como la superposición de medios continuos: fase sólida, líquida y gaseosa, todas en el mismo punto geométrico.

La correcta determinación del VER es muy importante: las propiedades obtenidas han de ser independientes del tamaño y continuas en el espacio y tiempo. Por lo tanto dv debe ser lo suficientemente pequeño para considerarlo infinitesimal y lo suficientemente grande con respecto a la heterogeneidad microscópica del material.

2.2.4 Definición de parámetros

En los modelos de secado existen tres variables independientes que son comúnmente usadas: Saturación, temperatura T y presión total del gas P_g , todas las demás variables están expresadas en función de éstas tres variables (Perre, 1999; Perré y Turner, 2008). A

continuación se definen algunos parámetros que serán incorporados en el desarrollo del modelo fenomenológico.

2.2.4.1 Porosidad

La porosidad de un material es la relación entre el vacío total en el material o volumen del poro, y el volumen total del material. Permite calcular el máximo contenido de agua o contenido de humedad en saturación:

$$\varepsilon = \frac{\text{Volumen de poros}}{\text{volumen total}} \quad \text{Ec. 2.17}$$

2.2.4.2 Saturación

El volumen de poros se considera lleno de agua líquida, vapor de agua y aire seco, formando los dos últimos una mezcla de aire húmedo. El grado de saturación de un material poroso es la relación entre su contenido de humedad y el máximo contenido de humedad que puede tener, el correspondiente al material saturado de humedad, cuando todos sus poros abiertos están inundados de agua.

La deshidratación de la torta se suele medir por la fracción del volumen líquido en la torta entre la fracción del volumen de poros. El contenido de humedad $[W]$ es el peso por ciento en kilogramos de líquido sobre kilogramos de sólido $[\text{kg}_l/\text{kg}_s]$. La fracción volumen de los poros en la torta húmeda se mide por la porosidad ($\varepsilon = I - S$), mientras que la fracción de volumen líquido en los poros de la torta se mide por la saturación S .

Para sólidos bien definidos en la torta con la densidad de sólidos ρ_s y la densidad del líquido ρ_l , y dado un volumen de la torta V_t , para la torta insaturada con $S < I$, la saturación se puede deducir de la fracción en peso de sólidos y la porosidad de la torta, junto con las densidades de sólidos y líquidos.

La porosidad de la torta se calcula a partir de la diferencia entre el volumen de torta húmeda y el volumen de sólidos secos. La fracción de saturación de la torta, S , que corresponde a un cierto peso por ciento del contenido de humedad, W , se calcula entonces de la relación:

$$S = \frac{1}{1 + W} \quad \text{Ec.2.18}$$

Donde S es la fracción de saturación, W es el contenido de Humedad. Y los subíndices s y l se refieren a los componentes del sistema: sólido y líquido. Un sistema que está saturado de agua tiene un valor máximo de saturación de 1.

$$S_s + S_l = I \quad \text{Ec. 2.19}$$

La torta húmeda comienza en un estado completamente saturado, $S = 1$, hasta un punto en $S < 1$, dependiendo del tiempo de desecación. Cuando el proceso se continúa por una gran cantidad de tiempo, se acerca entonces a un punto de equilibrio en S_{∞} , que es una función de la fuerza capilar y la cantidad de líquido unido a las partículas atrapado en el interior o exterior de las mismas.

El componente transitorio (líquido) depende entonces, no sólo de la fuerza capilar, la altura, y las propiedades de la torta, sino también del tiempo de de-saturación.

La de-saturación de líquido requiere una fuerza mucho mayor que la de la gravedad. Si la torta no se altera durante el transporte y deshidratación, el líquido puede ser atrapado en los finos capilares, debido al aumento de líquido. Esta cantidad de líquido de saturación suele ser muy pequeña en comparación con la fuerza capilar asociada con la saturación.

Por último, el líquido puede ser atrapado por químicos presentes en la superficie de la partícula o debido a la física capilar o a fuerzas interfaciales en los poros dentro de las partículas. Debido a que la fuerza requerida para de-saturar es muy alta, esta parte de la humedad no puede ser removida por centrifugación mecánica. Afortunadamente, en la mayoría de aplicaciones se trata de un pequeño porcentaje, si existe.

La saturación es a dimensional y toma valores de cero cuando el medio está completamente seco a 1, cuando el medio está completamente saturado. En este trabajo se considerará únicamente la saturación de líquido.

La **saturación residual** está dada por:

$$S_t = \frac{V_l(t)}{\varepsilon \pi (r_0^2 - r_{g \min}^2) h} \quad \text{Ec.2.14}$$

Donde V_l es el volumen de líquido contenido en la torta, $\varepsilon \pi (r_0^2 - r_{g \min}^2) h$ es el volumen total de poros en la torta.

2.2.4.3 Presión Capilar

El contenido de agua puede existir en distintos estados, como agua libre en las cavidades, agua ligada higroscópicamente adherida a las paredes, vapor de agua en las cavidades o agua constitutiva en composición química con las paredes de las células. La cantidad total de agua será entonces la sumatoria del agua de constitución, higroscópica y libre.

Sólo el agua libre, ligada y vapor de agua pueden eliminarse durante la deshidratación. Los mecanismos de transporte básico que permiten el movimiento de humedad en el proceso de deshidratación son el flujo de líquido debido a la capilaridad, la difusión del vapor de agua, la convección del vapor suelto en un flujo de gas (aire) y difusión del agua ligada.

Los movimientos de agua se pueden dividir en dos fases, en primer lugar, la evaporación del agua libre o fase capilar y en segundo lugar la fase higroscópica, en donde se elimina el vapor de agua y el agua ligada. (Karoglu et al, 2005; Pang y Keey, 1995).

El agua libre se transporta a través de capilares que están interconectados. Debido a la alta evaporación la presión dentro de los tubos desciende hasta valores negativos (tensión) y, por esto, a través de los poros se generan burbujas obstruyéndose así el flujo. La presión capilar depende de la presión del gas y el líquido en los poros (Kang y Chung, 2009).

El movimiento de agua libre en las cavidades celulares, es similar al transporte de agua a través de tuberías, en que el agua que brota por un extremo es continuamente remplazada por el agua proveniente del interior. El efecto es más pronunciado a medida que el radio capilar es de menor magnitud, este movimiento se debe a diferencias de presión y depende del tamaño de los capilares, también participa la tensión superficial del agua.

Cuando se están secando sólidos porosos, la humedad libre o sin combinar se desplaza a través de capilares y espacios vacíos de los sólidos por acción capilar, y no por difusión. Un sólido higroscópico contiene poros y canales interconectados de diversos tamaños. A medida que se evapora el agua, se forma un menisco de líquido en cada poro en el interior del sólido. Las fuerzas capilares poseen fuerzas en dirección perpendicular a la superficie del sólido. Estas fuerzas constituyen el impulso para desplazar el agua a través de los poros hasta la superficie. La ley que identifica este proceso es la Ley de Darcy, la cual se establece como:

$$Q = \frac{K}{\mu} (P_i - P_g) \quad \text{Ec. 2.20}$$

Donde Q es el gasto del agua, K es el coeficiente de permeabilidad de Darcy, μ es la viscosidad del líquido, A es el área de sección transversal y $P_i - P_g$ es la diferencia de presión. Los poros pequeños desarrollan fuerzas mayores que los poros más grandes. La intensidad de las fuerzas capilares en un determinado punto de un poro depende de la curvatura del menisco, que a su vez es una función de la sección transversal del poro. A medida que se agota el agua en la superficie, los poros grandes tienden a vaciarse primero, ya que los poros pequeños pueden extraer agua desde los poros grandes. El aire desplaza al agua que se retira, el cual penetra al material a través de los poros más grandes situados en la superficie y paredes del material.

De manera simplificada, la presión capilar es la diferencia de presión entre dos fases (gas-líquido) y se define como:

$$P_c = P_{gas(aire-vapor)} - P_{agua} \quad \text{Ec. 2.21}$$

Donde P_c es la presión capilar, que es igual a la presión del aire menos la presión del agua. Cuando cesa la acción capilar, la casi totalidad de las cavidades sólo contiene aire y vapor de agua, generándose una presión de vapor que será tanto más grande cuanto más elevado

sea el contenido de vapor en dichas cavidades, alcanzando su máximo valor hacia el centro de la pasta y decreciendo en el contorno.

Condensación capilar.

La condensación capilar comienza cuando las capas de agua adsorbida en las zonas más estrechas de los poros pueden pasar a una disposición de mayor estabilidad y menor nivel energético estableciendo el contacto entre ellas y formando un menisco entre la fase líquida y la fase gaseosa.

La tensión superficial σ_{lg} en la interfaz líquido-gas crea un menisco en el capilar como consecuencia de la resultante de las fuerzas de adhesión y de cohesión en la interfaz sólido-gas-líquido (ver figura).

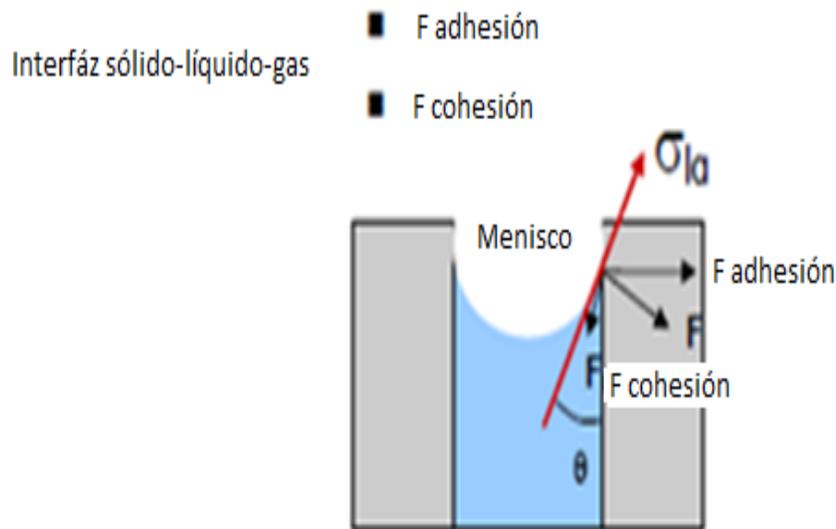


Fig. 2.4 Detalles del menisco y tensiones en la interfaz

Dado que las interfaces sólido-líquido y sólido-gas son rígidas, la única manera de establecer un equilibrio mecánico es ajustando la curvatura de la interfaz móvil líquido-gas. Esta curvatura o menisco se define por el ángulo de contacto θ , medido desde la fase de mayor densidad (Boucher 1980).

Como consecuencia del menisco que se crea, se origina una diferencia de presión entre las dos fases en contacto. Analizando las fuerzas aplicadas en la interfaz líquido-gas en el menisco, se tiene (ver figura):

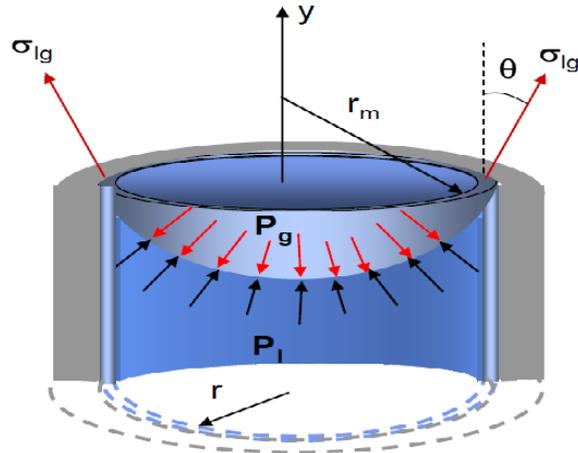


Fig. 2.5 Equilibrio mecánico en el menisco

Siendo r_m (m) el radio de la curvatura del menisco formado por la interfaz líquido-sólido, σ_{lg} (N/m) la tensión superficial del fluido, P_g y P_l (Pa) la presión de la fase gaseosa y en la fase líquida, respectivamente y r (m) el radio del poro de geometría cilíndrica.

Aplicando la condición de equilibrio mecánico en la interfaz:

$$\text{Fuerzas de presión:} \quad F_{P_y} = (P_g - P_l) * \pi r^2 \quad \text{Ec. 2.22}$$

$$\text{Fuerzas de tensión superficial:} \quad F_{\sigma_y} = 2\pi r \sigma_{lg} \cos\theta \quad \text{Ec. 2.23}$$

$$F_{P_y} = F_{\sigma_y}$$

$$P_g - P_l = \frac{2\sigma_{lg}}{r} \cos(\theta) \quad \text{Ec. 2.24}$$

A esta diferencia de presión se le denomina presión capilar, representado por P_c y se define como la diferencia de presión macroscópica entre la fase gaseosa y la fase líquida.

$$P_c = P_g - P_l \quad \text{Ec. 2.25}$$

Dicha diferencia de presión puede dar origen a un gradiente de presión en el líquido que actúa como fuerza motriz para el transporte del agua capilar a través del poro.

A la expresión así obtenida para la presión capilar en un poro cilíndrico se le conoce como ecuación de Washburn:

$$P_c = \frac{2\sigma \cos\theta}{r} \quad \text{Ec. 2.26}$$

Cuando el ángulo de contacto es $0^\circ < \theta < 90^\circ$ la presión capilar es positiva y el poro cilíndrico absorbe agua. Se dice que el líquido moja al sólido.

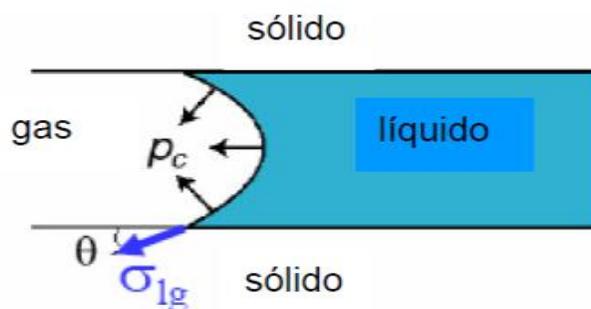


Fig. 2.6 Líquido que moja al sólido.

En una presión capilar negativa, el poro cilíndrico no absorbe agua.

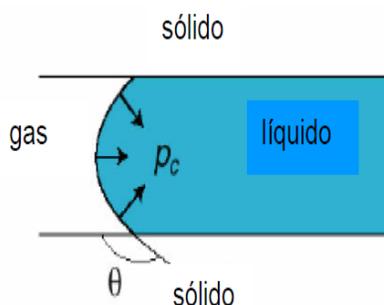


Fig. 2.7 Líquido que no moja al agua

En general, las paredes de un poro real no son superficies planas, sino rugosas y cubiertas por agua adsorbida, de manera que cambia el equilibrio mecánico.

En un capilar parcialmente inundado, la superficie de la interfaz aire-agua forma un menisco curvado, cuya curvatura está determinada por las fuerzas de adhesión entre las moléculas y la superficie, y por el radio del capilar. Las expresiones habitualmente utilizadas para la presión de saturación del vapor de agua son válidas para superficies de agua planas. Pero al formarse el menisco en el poro, la interfaz agua-gas toma forma cóncava. En una superficie cóncava las moléculas de agua se adhieren más fuertemente, con lo que la presión de saturación del vapor se reduce; esta reducción en la presión de saturación es mayor cuanto mayor sea la curvatura de la superficie.

Si el espacio libre en dicho capilar se rellena con aire cuya presión parcial de vapor es mayor que la presión de saturación en el menisco, entonces el aire en las inmediaciones del menisco estará sobresaturado y el vapor de agua condensará sobre el menisco, a pesar de que la humedad del aire dentro del poro será menor que 100%.

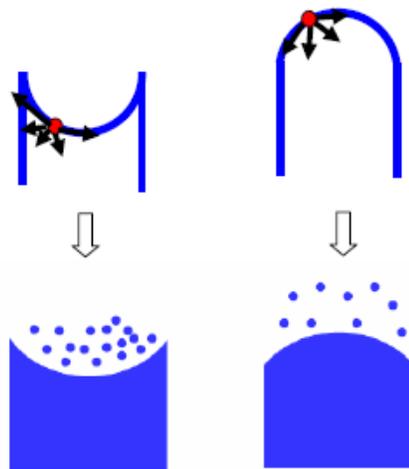


Fig. 2.8 Fuerzas de adhesión y humedad relativa en el menisco

En un material poroso existe un amplio rango de tamaño de poros. En los más pequeños, cualquier menisco que se forme tendrá una curvatura tan fuerte que la humedad condensará sobre el menisco a humedades relativas a partir del 50%. Los poros más pequeños se llenarán de agua y a continuación lo harán los poros de mayor tamaño hasta que se alcance un tamaño de poro tal que, debido a la menor curvatura del menisco, la presión de saturación en las inmediaciones del menisco será igual a la presión de vapor de agua del aire en el poro.

La cantidad de agua que se podrá retirar de los poros dependerá entonces de la estructura y distribución del tamaño de poros.

La permeabilidad del flujo en la torta deshidratada depende del contenido líquido. El efecto del líquido restante es descrito por diferentes ecuaciones empíricas. Es casi imposible calcular directamente el impacto del líquido restante en la permeabilidad. Por lo tanto, es utilizada la permeabilidad relativa (Nicolaou, 1999). Que se multiplica por la permeabilidad del sistema poroso en un flujo de una sola fase.

Capítulo 3. Metodología

3.1 Introducción

Este capítulo describe la metodología para la determinación de la evolución del espesor dentro de una centrífuga vertical, así como la saturación y la permeabilidad, propiedades fenomenológicas significativas de las pruebas de filtración. A partir de datos experimentales obtenidos previamente por otro grupo de investigación en el Instituto de la Filtración y procesos de separación en Francia, se escribe un balance de materia y se formula un conjunto de ecuaciones que describen la formación de la torta y permiten determinar el momento en el cual se inicia la etapa de saturación y desaturación, así como el comportamiento de la permeabilidad de la torta. La formulación se basa en los principios físicos de separación y en los fenómenos de transporte. Las pruebas se realizaron a velocidad constante de centrifugación, fracción másica de sólidos y gasto másico de alimentación.

La segunda parte del trabajo corresponde al desarrollo de un modelo matemático que describa la transferencia de líquido y aire en la torta, basado en los principios físicos de separación y en los fenómenos de transporte.

Para facilitar las comparaciones entre las predicciones teóricas y los datos fue necesario caracterizar la suspensión (Tabla 3.1), que condiciona tanto el crecimiento de la torta, como el caudal de filtrado de forma continua durante las pruebas de filtración, a efecto de contar con todas las variables que involucra la solución de las ecuaciones propuestas.

Tabla 3.1 Caracterización de la suspensión (IFTS, Francia).

<i>Propiedad</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidades</i>	<i>Simbolo</i>
Densidad del agua	1000	kg/m ³	ρ_l
Masa de talco	10	Kg	m_{talco}
Volumen líquido de agua (m ³)	0.08	m ³	V_l
Densidad del talco	2707	kg/m ³	ρ_s
Concentración de la suspensión	157.0003	kg/m ³	C
Fracción volumen de sólido	0.0579		f_{vs}
Densidad de la suspensión	1099.0024	kg/m ³	ρ_{susp}
Fracción masa de sólidos	0.1428		f_{ms}
T suspensión	18	°C	T_{susp}
pH suspensión	8.1		
pH filtrado	8.1		
Granulo de filtrado	24	µm	
Turbidez de filtrado	>4000		

Descripción experimental

Se utilizó una centrífuga Marca Robatel (como se muestra en la figura 3.1) con radio interior de 0.158 m y altura interior de la cesta de 0.198 m en la pared interna de la cesta y 0.201 m en el borde exterior de la cesta. La velocidad de operación (ω) fue de 3000 (rpm).

Se realizaron tres pruebas experimentales con las siguientes condiciones de operación: flujo másico de alimentación de 150 kg/hr, fvs 0.057 y velocidad de operación de 3000 rpm.



Fig. 3.1 Centrífuga vertical marca Robatel, en la cual se realizaron los experimentos

La figura 3.2 muestra el procedimiento experimental llevado a cabo. La suspensión agua-talco se prepara en un depósito con agitador para asegurar la homogenización de la suspensión, dicha suspensión se agrega a la centrífuga mediante una bomba, midiéndose el flujo másico de alimentación. Al momento de ser vertida la suspensión se distribuye hacia las paredes del tambor mediante un dispositivo colocado al centro y en la parte superior del tambor; el tambor contiene una tela filtrante y cuenta además con orificios que van a permitir el paso del líquido filtrado y retendrá los sólidos en una tela filtrante que se ha colocado previamente y que, conforme transcurra el tiempo de filtración empezaran a formar una torta.

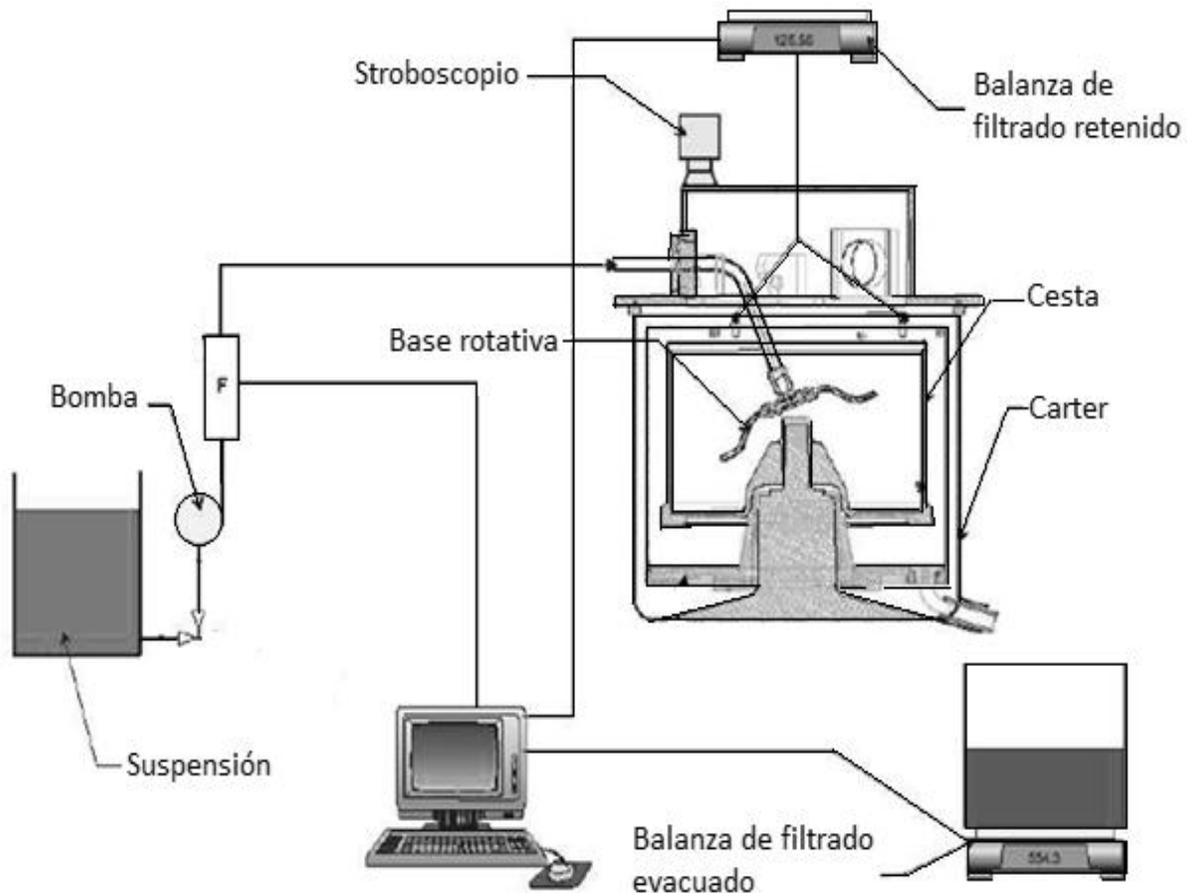


Fig. 3.2 Diagrama esquemático del equipo experimental

La Figura 3.3(1) esquematiza el inicio del proceso, donde el líquido pasa únicamente a través de los orificios del medio filtrante, empezando a quedar retenidas las partículas sólidas, esta acumulación de partículas sólidas participaran luego como medio filtrante Fig. 3.3(2). Detrás de la acumulación de partículas sólidas se forma un anillo de líquido claro Fig. 3.3(3) el cual comenzará a desplazarse a través de la torta de filtración formada una vez que termine de alimentarse suspensión a la centrifuga y comience la deshidratación de la torta Fig. 3.3(4,5,6). En esta etapa el flujo de líquido disminuye, ya que la torta ofrece mayor resistencia al paso del fluido y la fuerza centrífuga, la cual provoca un efecto de compresibilidad y con ello reduce la permeabilidad de dicha torta. La torta deshidratada tiene entonces un gradiente de Saturación en su espesor Fig. 3.3(6).

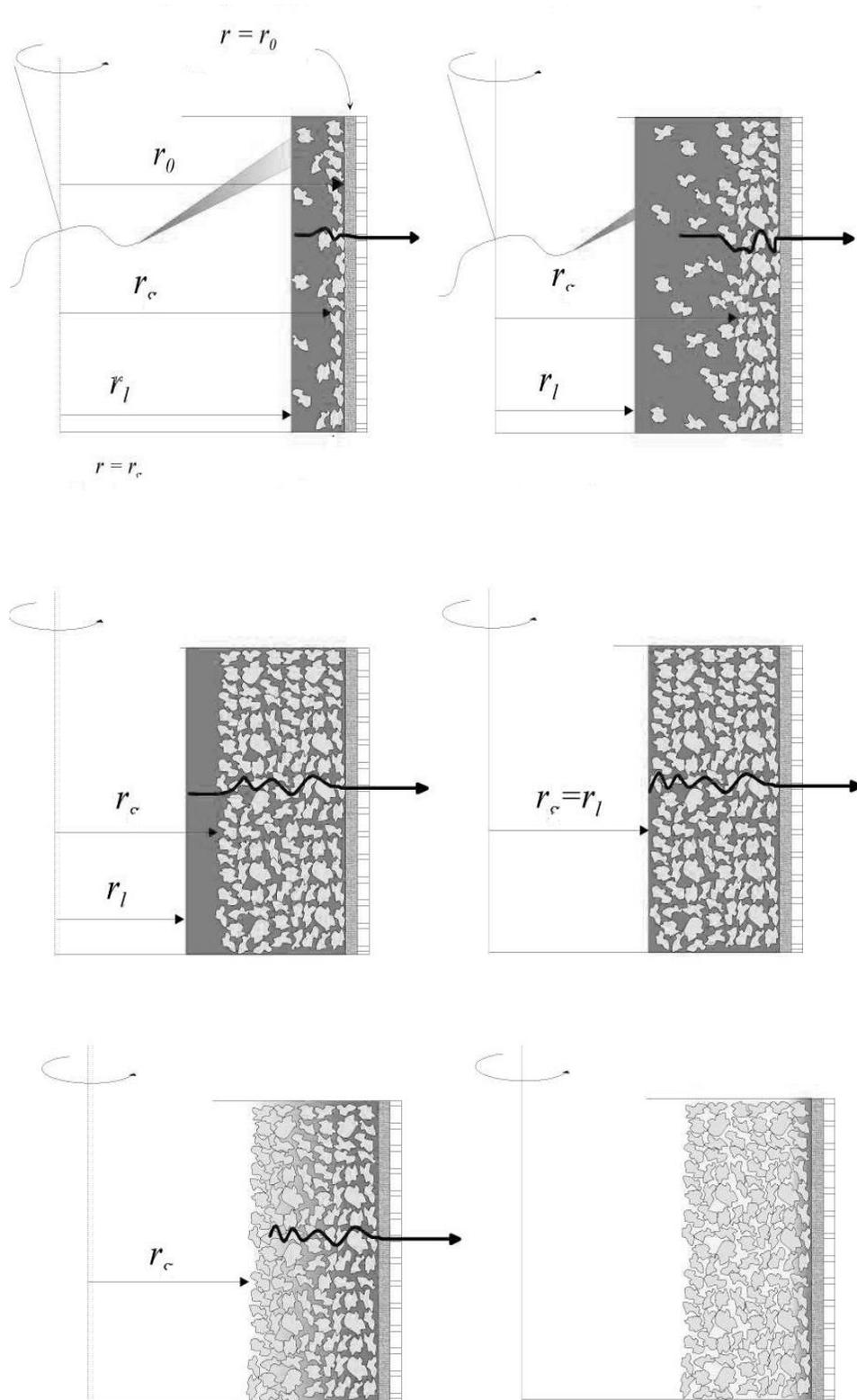


Fig. 3.3 Etapas del ciclo de centrifugado

Los flujos máxicos de filtrado fueron monitoreados a través de lecturas sucesivas de tiempo en una balanza electrónica Kern y el filtrado retenido en el tambor por una balanza Precisa. El equipo experimental cuenta con un sistema de adquisición de datos.

El espesor de la torta de filtración fue determinado experimentalmente durante cada operación de centrifugado graduando la base de la centrifuga en milímetros, como se muestra en la figura 3.4. Como no es posible ver la graduación durante la operación debido a la alta velocidad a la cual se está desplazando la suspensión, se coloca un Stroboscopio en la parte superior de la centrifuga de manera que pueda dar flashazos de luz intermitentemente y con ello se pueda ver el fondo de la centrifuga y como consecuencia se pueda medir el espesor a diferentes tiempos de operación.

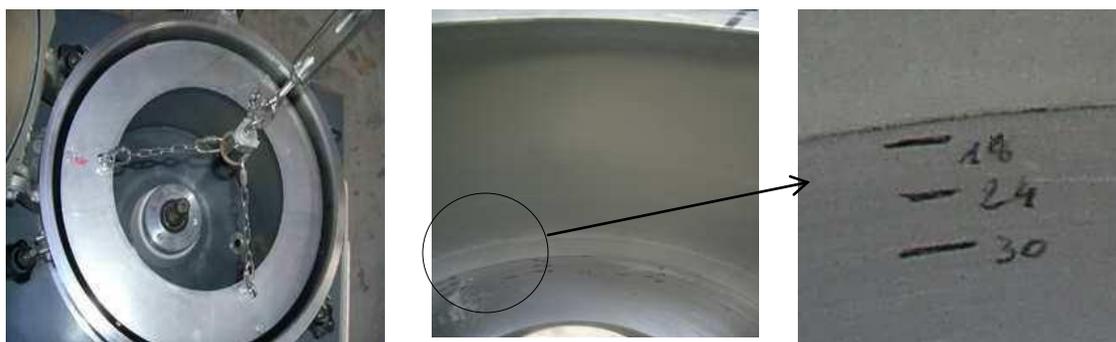


Fig. 3.4 Graduación del fondo de la centrifuga

Finalmente, una vez que se ha terminado el proceso de centrifugación, se procede a abrir la tapa de la centrifuga, colocando sobre la base superior de la centrifuga un dispositivo anclado al borde de la centrifuga con el cual se medirá el espesor de la torta formada en diferentes puntos de la pasta en su sección longitudinal mediante un captor de posición, el cual a través de un láser proporcionará una señal en milivolts, la cual se podrá traducir a milímetros, como se muestra en la figura 3.5. El propósito de la determinación experimental del espesor de la torta de filtración constituida es establecer la uniformidad de la torta de filtración.



Fig. 3.5 Determinación del espesor experimentalmente

El tamaño de partícula fue determinado mediante un equipo Cilas, obteniéndose la mayor concentración de tamaño de 24 micras. Como se muestra en la figura 3.6

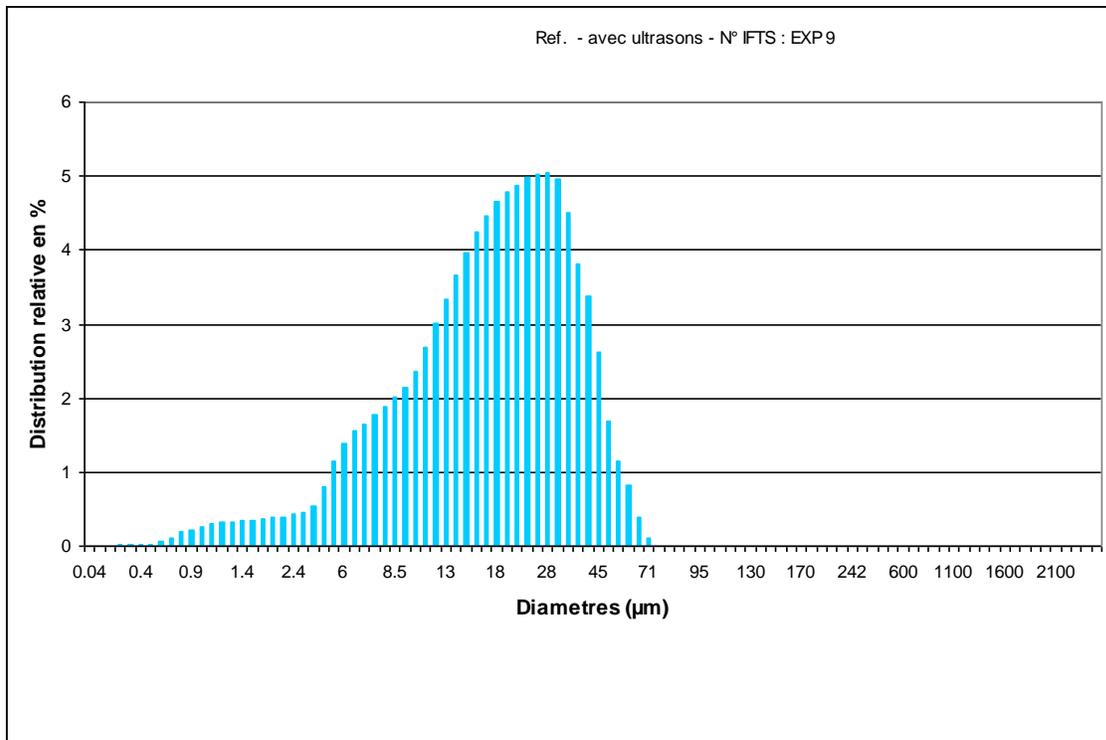


Fig. 3.6 Determinación del tamaño de partícula

Pudiéndose medir las características macroscópicas conocidas tales como el flujo de alimentación de la suspensión, el flujo de filtrado, la masa de filtrado retenido (cada una como funciones del tiempo); además de las características propias de cada sustancia en particular tales como la densidad (ρ) del agua y del talco, la masa de talco y la masa del agua, el volumen de talco y volumen de agua, la concentración de la suspensión (C), así como las dimensiones del tambor centrífugo tales como el radio interior del tambor, la altura y la velocidad de giro del proceso. Nos permitirán llevar a cabo un análisis cuantitativo que permita la predicción de los detalles del curso temporal de la torta constituida.

3.2 Balances de masa, formulación matemática

La concentración de sólidos es uno de los parámetros más importantes en la separación sólido / líquido, tiene una gran influencia en los valores numéricos de algunos de los términos constitutivos, por ejemplo, la resistencia al flujo de fluidos durante la filtración aumenta al aumentar la concentración de sólidos. En la mayoría de los casos se desea conocer la concentración de la fracción volumen.

Así, previo al desarrollo de las ecuaciones para determinar el espesor, la saturación y la permeabilidad de la torta de filtración, se plantean las ecuaciones para determinar la fracción másica de sólidos (f_{ms}), la fracción volumen de sólidos (f_{vs}), el flujo másico de alimentación integrado; los cuales son necesarios para determinar la masa de sólidos así como la masa de líquido contenidos en el tambor centrífugo.

La fracción másica de sólidos (f_{ms}) está dada por:

$$f_{ms} = \frac{\rho_s f_{vs}}{\rho_s f_{vs} + \rho_l (1 - f_{vs})} \quad \text{Ec. 3.1}$$

En donde ρ_s es la densidad del sólido seco (densidad del talco [kg_{talco}/m^3_{talco}]), ρ_l es la densidad del líquido (densidad del agua [kg_{agua}/m^3_{agua}]), f_{vs} es la fracción volumen de sólidos. El término $\rho_s f_{vs}$ indica la cantidad de sólido y el término $\rho_l (1 - f_{vs})$ indica la cantidad de agua.

El análisis dimensional indica que la f_{ms} está dada en [$m^3_{agua}/m^3_{suspensión}$].

Y la fracción volumen de sólidos (f_{vs}) está dada por:

$$f_{vs} = \frac{C}{\rho_s} \quad \text{Ec. 3.2}$$

La cual indica los m^3 de talco entre los m^3 de suspensión. Donde C es la concentración [$kg_{talco}/m^3_{suspensión}$] y ρ_s es la densidad del talco [kg_{talco}/m^3_{talco}].

El análisis dimensional indica que la f_{vs} está dada en [$m^3_{talco}/m^3_{suspensión}$].

Como no es posible conocer la cantidad de sólido y líquido que se está alimentando en un instante t , se integra el flujo másico de alimentación, teniéndose:

$$\int_0^t m_a dt = Q_a. \quad \text{Ec. 3.3}$$

Con el flujo másico de alimentación integrado y con la fms calculada, se puede entonces conocer la masa de sólidos (m_{sc}) contenida en la cesta del tambor centrífugo:

$$m_{sc} = \int_0^t m_a dt * fms \quad \text{Ec. 3.4}$$

Donde m_{sc} es la masa de sólidos contenidos en la cesta.

Conociendo la cantidad de sólidos contenido en la cesta del tambor centrífugo, podemos entonces determinar la cantidad de agua (m_{lc}) contenida en la cesta:

$$m_{lc} = m_c - m_{sc} \quad \text{Ec. 3.5}$$

El volumen total dentro de la cesta del tambor centrífugo estará entonces dado por:

$$V_{totalcesta} = \frac{m_{sc}}{\rho_s} + \frac{m_{lc}}{\rho_l} \quad \text{Ec. 3.6}$$

3.2.1 Determinación del radio líquido

El sistema considerado para efectuar los balances de masa que nos permitirán calcular el radio líquido, el radio sólido y el espesor de la torta de filtración es la centrífuga misma, en donde la acumulación dentro de la centrífuga se refiere al cambio de masa con respecto al tiempo y la transferencia a través de las fronteras se refiere a los flujos de alimentación y filtrado. Como el balance se formula para un instante de tiempo, la ecuación será una ecuación diferencial.

En la figura 3.7, podemos observar el corte de un cesto filtrante de radio r_b , en el que se ha retenido una torta de espesor ($r_b - r_c$), sobre la cual queda una capa de líquido retenido, de espesor ($r_c - r_l$). La dimensión ($r_b - r_l$) corresponde al ancho del borde superior del cesto y determina el máximo espesor de sólido o líquido retenible en la centrífuga.

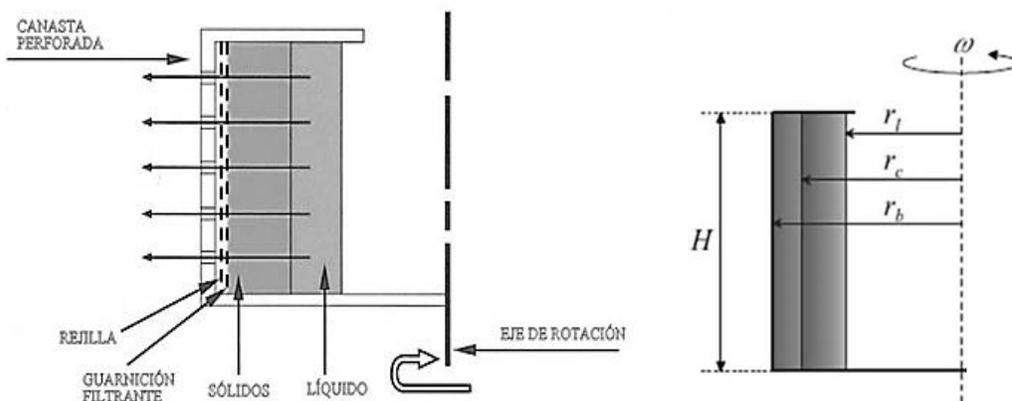


Fig. 3.7 Corte de una centrífuga filtrante

En el contexto de la filtración centrífuga, la torta filtrante se construye a partir de un espesor cero. La formulación matemática propuesta para determinar el espesor de la torta de filtración se basa en un balance general de masa, en donde la acumulación es igual a las entradas (flujo másico de alimentación) menos las salidas (flujo másico de filtrado). La siguiente ecuación ilustra un sistema de volumen especificado en el cual se efectuarán balances de materia. No interesan los detalles internos, sino solo el paso de materiales a través de las fronteras del volumen y el cambio global de materiales dentro del sistema.

$$\left\{ \begin{array}{c} \text{acumulación} \\ \text{dentro} \\ \text{del sistema} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} \text{entrada} \\ \text{por las fronteras} \\ \text{del sistema} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{c} \text{salida} \\ \text{por las fronteras} \\ \text{del sistema} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} \text{generación} \\ \text{dentro del} \\ \text{sistema} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{c} \text{consumo} \\ \text{dentro} \\ \text{del sistema} \end{array} \right\}$$

El termino acumulación se refiere a un cambio de masa dentro del sistema con respecto al tiempo, en tanto que la transferencia a través de las fronteras del sistema se refiere a las entradas y salidas. Por último, si el balance se formula para un instante de tiempo, la ecuación será una ecuación diferencial.

Es necesario determinar el rango de anillo líquido $r_l(t)$, a partir del cual se podrá conocer el espesor de la torta filtrante. La ecuación propuesta para el balance general de materiales realizado en la cesta de la centrífuga, es:

$$\frac{d}{dt} (\pi H (r_b^2 - r_l^2)) = Q_a - Q \quad \text{Ec. 3.7}$$

Donde la variación del volumen del anillo líquido con respecto al tiempo $[\frac{d}{dt} (\pi H (r_b^2 - r_l^2))]$, será igual a la diferencia entre el flujo de alimentación Q_a y el flujo de filtrado Q , donde H corresponde a la altura interna del tambor (constante), r_b es el radio del centro a la pared interna del tambor (constante) y r_l es el radio líquido, el cual varía con el tiempo. Como se requiere conocer $r_l(t)$, la ecuación anterior da:

$$r_b^2 - r_l^2(t) = \int_0^t \frac{Q_a - Q}{\pi H} dt \quad \text{Ec. 3.8}$$

La masa instantánea de filtrado por M , en:

$$\rho_l \int_0^t Q dt = M(t) \quad \text{Ec. 3.9}$$

Sustituyendo los flujos de alimentación y filtrado en términos de flujos másicos (a partir de la ecuación anterior), tenemos:

$$r_l(t) = \sqrt{r_b^2 + \frac{1}{\pi H} \left(\frac{M(t)}{\rho_l} - \int_0^t m_a dt \right)} \quad \text{Ec. 3.10}$$

La cual nos permite determinar el radio líquido de la torta.

De esta última expresión, el término que contiene la integral corresponde al flujo másico de alimentación en un instante t de la suspensión, y se determina discretizando el área bajo la curva determinada por el flujo másico de alimentación con respecto al tiempo.

3.2.2 Determinación del radio sólido

Para conocer el espesor de la torta a partir del radio líquido (r_l) calculado mediante la última ecuación, se determina el radio sólido (r_s) mediante la siguiente ecuación:

$$r_s = \sqrt{rb^2 - fms * \frac{\int_0^t ma}{\pi * H * \rho_{talco} * (1 - \varepsilon)}} \quad \text{Ec. 3.11}$$

3.2.3 Determinación del espesor

Conociendo el radio sólido, se determina entonces el espesor de la capa líquida (e_l) restando al radio sólido calculado el radio líquido calculado:

$$e_l = r_s - r_l \quad \text{Ec. 3.12}$$

El espesor de la capa sólida estará dado por la diferencia entre el radio interior del tambor centrífugo (r_b) y el radio sólido calculado:

$$e_s = r_b - r_s \quad \text{Ec. 3.13}$$

El espesor total de la torta de filtración entonces estará dado por el espesor de la capa líquida más el espesor de la capa sólida:

$$e_c = e_l + e_s \quad \text{Ec. 3.14}$$

3.2.4 Determinación de la Saturación

Una cuantificación del volumen vacío en la torta filtrante es dada por la porosidad ε , la cual define el volumen de poros que se encuentran en el volumen total de la torta.

La saturación (S) se determina con el propósito de establecer en qué momento inicia el retiro de humedad de la torta de filtración, el valor máximo de saturación es de 1. La ecuación para determinar la Saturación es:

$$S = 1 - \frac{m_{filtrado}}{\pi * H * (rb^2 - rs^2) * \varepsilon * \rho_l} \quad \text{Ec. 3.15}$$

Donde S es la saturación,

ε es la porosidad de la torta, la cual se calcula mediante la siguiente expresión, asumiendo que la porosidad cambia conforme crece la torta sólida:

$$\varepsilon = 1 - \frac{fms * Q_a / \rho_{talco}}{V_{torta}} \quad \text{Ec. 3.16}$$

Donde Q_a es el flujo de filtrado integrado,

V_{torta} es el volumen de la torta sólida, el cual es igual a $\pi \cdot H \cdot (rb^2 - rg^2)$

3.3 Deshidratación de la torta constituida

La segunda parte de esta investigación tiene como propósito deducir un modelo matemático que describa el transporte de aire y humedad en la torta constituida, se define la estructura de un medio poroso y los diferentes mecanismos de transporte que se dan en ellos. Para facilitar el análisis, en la literatura especializada se desprecia el transporte de humedad causado por la temperatura, deduciendo las ecuaciones básicas para la transferencia isotérmica de humedad a partir de la ley de conservación de la masa, combinándola con las ecuaciones de transporte y con las ecuaciones de estado. Se enuncian las ecuaciones fundamentales que gobiernan los fenómenos de transporte.

Se asume que la humedad se desplaza en fase líquida a través de los poros; el agua líquida y el agua condensada por capilaridad se desplazan por el gradiente de presión de agua en el poro originado por la presión capilar. En las centrífugas, se usa el gradiente de presión generado por el efecto centrífugo para separar suspensiones.

La suspensión alimentada sometida a filtración centrífuga es, en general, un sistema compuesto por una matriz sólida, la fracción líquida, y la fracción gaseosa (la cual se considera como fase pasiva). Los mecanismos de transporte de materia se dan de acuerdo a la fase y del tipo de agua.

A medida que la matriz porosa se deshidrata, la interconectividad entre los poros se vuelve irregular y discontinua. Cuanto más seco está el material, tanto más pequeños y discontinuos son los poros que contienen agua y mucho mayores son las fuerzas capilares. La cantidad de agua que se podrá retirar de los poros dependerá entonces de la estructura y distribución del tamaño de poros.

Los cambios en el contenido de humedad no solo afectan las fuerzas que dominan el transporte de agua, sino que también dificultan el camino del agua a través de los poros, debido a una disminución de la permeabilidad.

Volumen elemental representativo

El transporte en la torta de filtración se puede clasificar en dos tipos: la difusión que sigue la ley de Fick, que no depende primordialmente de la estructura del sólido y el movimiento capilar.

Uno de los conceptos importantes en el desarrollo de ecuaciones, en el proceso de secado de materiales porosos, es el concepto de volumen promedio o Elemento de volumen representativo (EVR) introducido por Whitaker (1977).

El volumen de un material poroso se puede asociar a una serie de puntos en el espacio. Cada uno de estos puntos contiene las tres fases, de tal manera que el volumen promedio puede ser determinado no importa en qué lugar del dominio del material nos encontremos, este siempre contendrá las tres fases, del mismo modo puede ser determinada el área representativa (EAR), (Bear y Buchlin, 1991). El elemento de volumen representativo debe ser debidamente grande para que las cantidades promedio sean definidas, y suficientemente pequeño para evitar las variaciones debidos a los gradientes macroscópicos y configuraciones de no equilibrio a nivel macroscópico.

Promediando volumétricamente las diferentes ecuaciones de transporte a nivel microscópico, se pueden obtener las ecuaciones que gobiernan el fenómeno a escala macroscópica.

En general, para el estudio del transporte de humedad en un medio poroso se realizan los siguientes supuestos:

- El proceso es isotérmico
- La matriz sólida es rígida, macroscópicamente isotrópica, inerte y homogénea,
- Se considera únicamente que es agua libre la que se desplaza de la matriz,
- El aire húmedo es un gas ideal, mezcla de aire seco y vapor de agua,
- El agua es un fluido newtoniano y de densidad constante
- El agua es pura, se desprecia el efecto de sales y otros contaminantes,
- Los efectos gravitacionales en el transporte son despreciables
- La cesta de la centrífuga gira a una velocidad constante

Balance de masa:

La modelización del drenado se basa en el desarrollo de una relación que expresa la evolución de la Saturación promedio de líquido en un medio poroso en el tiempo $S_l(t_0)$ y la determinación del perfil de Saturación al final $S_l(t_f)$.

El modelo de Darcy es una extensión de la ley de Darcy aplicada a la filtración centrífuga (en la que se da el transporte de una sola fase en un medio poroso) para abordar los problemas de drenado. El modelo tiene en cuenta los efectos capilares ya que el flujo de la fase de un fluido se ve obstaculizado por la presencia en los poros de la fase del otro fluido.

El modelo se basa en la ecuación de continuidad y la ley de Darcy generalizada:

$$\frac{\partial(\varepsilon S_l)}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\bar{v}_l) = 0 \quad \text{Ec. 3.17}$$

$$\bar{v}_l = -\frac{K_l k_{rl}}{\mu_l} \cdot \left[\nabla(-P_c) + \frac{1}{2} \rho_l \omega^2 (r_0^2 - r_g^2) \right] \quad \text{Ec. 3.18}$$

La entrada de una fase gaseosa en un medio poroso saturado de una fase fluida (inmiscible con el gas) causa los efectos capilares; el flujo en los poros de cada fase del fluido es función de la saturación. Se podría esperar que la presión capilar después que se ha retirado

líquido, provoque una compresión de los poros, sin embargo Bear y Whitaker (2006) muestran que un medio poroso durante el drenado no se comprime. La presión del gas se mantiene por debajo de la presión del sólido del medio poroso.

El flujo de una fase se ve obstaculizado por la presencia de la otra fase. Este fenómeno se tiene en cuenta a través de la permeabilidad del medio poroso sobre el fluido en cuestión.

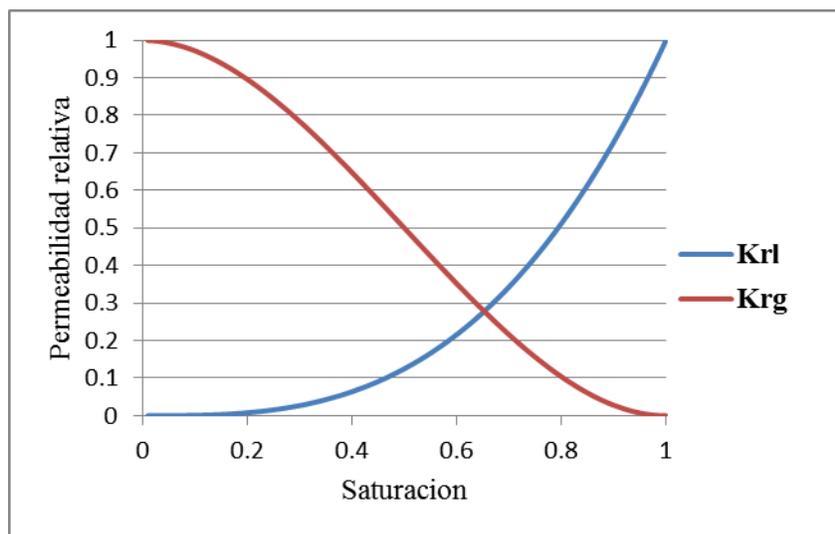


Fig. 3.8 Permeabilidad relativa del líquido y del gas en función de la saturación (Brooks and Corey, 1964)

La figura 3.8 representa la permeabilidad relativa de cada fase en función de la saturación de líquido. k_{rl} es la permeabilidad relativa del líquido y k_{rg} la permeabilidad relativa del gas. Se observa que al inicio del drenado (en $S_l=1$) la permeabilidad relativa de la fase líquida es máxima ($k_{rl}=1$), mientras que la del gas es mínima ($k_{rg}=0$). Cuando el líquido fluye, la fase gaseosa pasará por los poros más grandes, y el líquido por los poros más pequeños. Se puede observar que cuando k_{rl} aumenta k_{rg} disminuye.

En el caso del drenado por centrifugación, la diferencia de viscosidad entre la fase líquida y la fase gas, y el hecho de que la fase gas sólo ocupe el espacio de los poros abandonados por la fase líquida, permite tratar a la fase gaseosa como una fase inactiva.

La permeabilidad de la fase líquida está relacionada con la saturación local ya que la presión del líquido se ve afectada por los efectos capilares.

$$k_l = K k_{rl}(S_l) \quad \text{Ec. 3.19}$$

Antes de iniciar la etapa de drenado de la torta constituida, el medio poroso se encuentra totalmente saturado ($S_l = 1$), en consecuencia no hay ningún efecto capilar. En la primera fase del drenado aparecen en la superficie del medio poroso meniscos, en este punto, la presión capilar (P_c) es la presión de entrada (P_b), conforme el medio se va desaturando, la

presión capilar se incrementa y el flujo disminuye. La ecuación que define entonces la S_{rl} es:

$$S_{rl} = \left(\frac{P_b}{P_c}\right)^\lambda \quad \text{para } P_c > P_b \quad \text{Ec. 3.20}$$

Wakeman y Vince (1986) utilizan el modelo de Brooks y Corey (1994) que define las funciones para $P_c(S_l)$ y $K_{rl}(S_l)$. Determinando P_b mediante la relación:

$$P_b = \frac{4.6(1-\varepsilon)\sigma_l}{\varepsilon \bar{d}_p} \quad \text{Ec. 3.21}$$

Definiendo la presión capilar (P_c) y la permeabilidad relativa (k_{rl}):

$$P_c(S_{rl}) = P_g - P_l \quad \text{Ec. 3.22}$$

$$k_{rl} = S_{rl}^{\left(\frac{2+\lambda}{\lambda}\right)} \quad \text{Ec. 3.23}$$

Si aumenta la presión del gas en un capilar, la presión del líquido disminuye, aumentando la presión capilar, lo cual se aprecia en la figura 3.9. Como ya se ha mencionado, el gas sustituye parte del espacio ocupado por el líquido, por lo que la saturación disminuye con el aumento de la presión capilar.

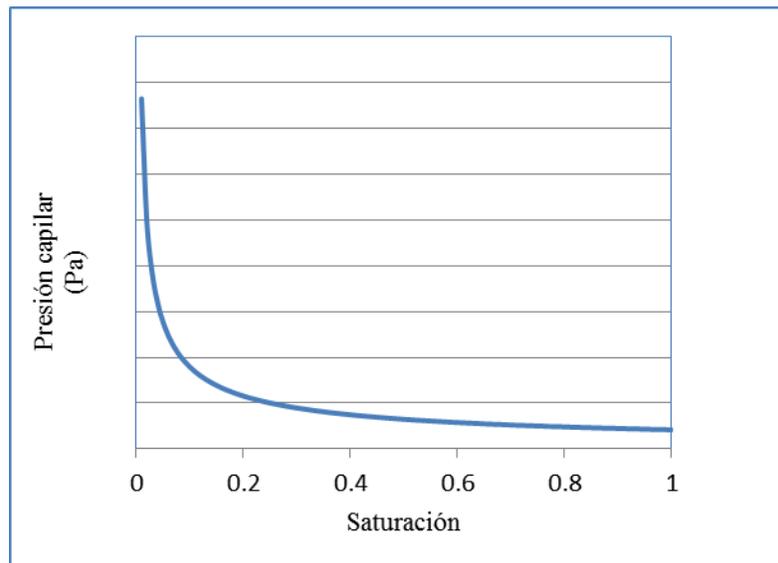


Fig. 3.9 Presión capilar en función de la Saturación (Brooks and Corey, 1964)

Con estas simplificaciones el proceso de transporte se realiza principalmente en un medio de poro abierto: Por capilaridad y por acción de la fuerza centrífuga.

Considérese una fracción del espesor de la torta sólida de área A , espesor L y densidad ρ . Dicha fracción está sujeta en ambos lados a diferentes contenidos de Saturación. Las superficies fronteras, en $x= 0$ y $x= L$, están localizadas dentro del sólido adyacente a las

interfases en todo momento. La variación de la Saturación sólo se da en la dirección x y puede expresarse como $S(x)$.

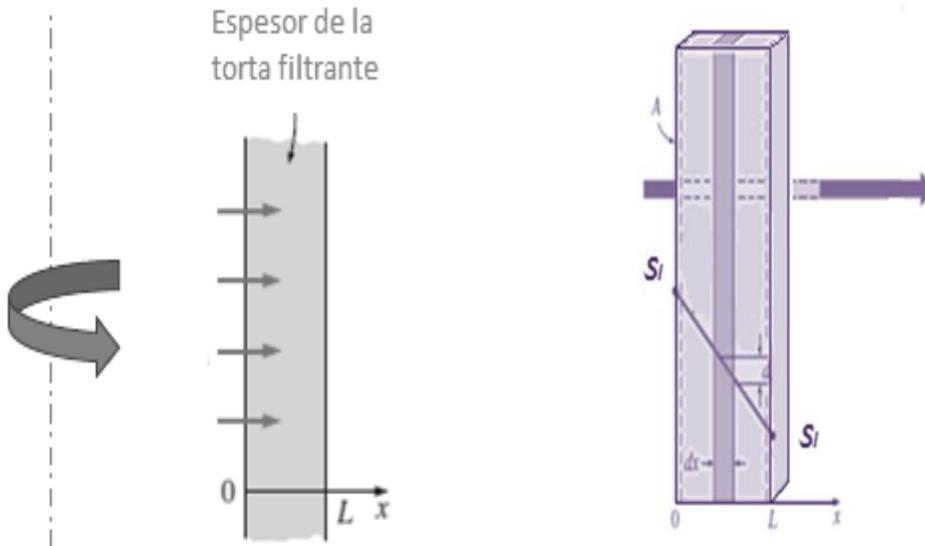


Fig. 3.10 Geometría a modelar

La geometría a modelar será el espesor de la torta de filtrado (Figura 3.8), asumiendo que el transporte de humedad se da en la dirección del espesor.

Se considera estado transitorio ya que la saturación cambia con respecto al tiempo. No existe reacción ya que el talco es inerte, por lo tanto el flujo másico que entra de i es igual al flujo másico que sale de i , y el flujo molar que entra de i es igual al flujo molar que sale de i .

Se considera el espacio total de poros abiertos conectados parcialmente llenos de agua (l). El grado de saturación de agua líquida S_l se define como la relación entre la porosidad inundada con agua líquida $\varepsilon_{o,l}$ y la porosidad abierta total ε_o .

$$S_l = \frac{\varepsilon_{o,l}}{\varepsilon_o} \quad \text{Ec. 3.24}$$

El contenido de agua líquida por unidad de volumen del medio poroso no saturado será:

$$\text{Agua líquida} \quad W_l = \varepsilon_o S_l \rho_l \quad \text{Ec. 3.25}$$

Así pues, el balance de masa para el agua líquida se puede escribir de la siguiente manera:

$$\text{Agua libre} \quad \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_l \bar{\rho}_l) + \nabla \cdot (\bar{\rho}_l \bar{v}_l) = 0 \quad \text{Ec. 3.26}$$

Donde ρ_l es la densidad del agua libre.

Dividiendo entre la densidad del sólido obtenemos:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\nabla \cdot \left\{ \frac{1}{\rho_s} (\bar{\rho}_l \bar{V}_l) \right\} \quad \text{Ec. 3.27}$$

Transporte de la fase líquida

La relación constitutiva de agua libre se asume que sigue siendo un comportamiento generalizado que se puede describir con la ley de Darcy para la cual la velocidad promedio de masa está dada por:

$$\bar{V}_l = -\frac{K_l \cdot k_{rl}}{\mu_l} \cdot (\nabla P_l^l + \rho_g g) \quad \text{Ec. 3.28}$$

Donde g designa a la fuerza de gravedad, P_l^l la presión en la fase líquida en el líquido, μ_l es la viscosidad dinámica, K es la permeabilidad absoluta y k_{rl} es la permeabilidad relativa del líquido. En este caso. El efecto de la fuerza de gravedad se hace nulo y es remplazado por la acción de la fuerza centrífuga. Quedando como sigue:

$$\bar{V}_l = -\frac{K_l \cdot k_{rl}}{\mu_l} \cdot (\nabla P_l^l + P_{cent}) \quad \text{Ec. 3.29}$$

La presión de agua libre queda descrita de la siguiente manera:

$$P_l^l = P_g^g - P_c \quad \text{Ec. 3.30}$$

Por lo tanto, el flujo de agua libre puede escribirse de la siguiente manera, despreciando los efectos de la gravedad:

$$\bar{V}_l = -\frac{K_l k_{rl}}{\mu_l} \cdot \left[\nabla(-P_c) + \frac{1}{2} \rho_l \omega^2 (r_0^2 - r_g^2) \right] \quad \text{Ec. 3.31}$$

Quedando:

$$\bar{V}_l = \frac{K_l k_{rl}}{\mu_l} \nabla \cdot P_c - \frac{K_l k_{rl}}{\mu_l} \nabla \cdot \left(\frac{1}{2} \rho_l \omega^2 (r_0^2 - r_g^2) \right) \quad \text{Ec. 3.32}$$

La presión capilar se calcula a partir de datos experimentales en función de la saturación.

Numerosos estudios de laboratorio han concluido que la permeabilidad efectiva de cualquier depósito de líquido es una función de la Saturación del fluido y de las características de formación de la humedad. k es el símbolo aceptado universalmente para la permeabilidad absoluta, k_l corresponde a la permeabilidad del líquido.

La permeabilidad absoluta es una característica del medio poroso y mide la capacidad del medio para transmitir fluidos. Cuando dos o más líquidos fluyen al mismo tiempo, la permeabilidad relativa de cada fase a una saturación relativa, es la relación entre la permeabilidad efectiva de cada fase y la permeabilidad absoluta:

$$k_{rl} = \frac{k_l}{k} \quad \text{Ec. 3.33}$$

Puesto que las permeabilidades efectivas pueden variar desde 0 hasta k , la relación de permeabilidades puede tener cualquier valor entre 0 y 1: $0 \leq k_{rl} \leq 1$

Condiciones límite

Al inicio del proceso de deshidratación de la torta filtrante, cuando el medio poroso está saturado:

En $t=0$, $S_{rl} = 1$ para $r_g \leq r \leq 1$

En los siguientes etapas del proceso, en $r=r_0$ para $t>0$ $\frac{\partial S_{rl}}{\partial r} = \text{Constante}$

Se asume que en la superficie del medio poroso, la saturación irreductible ($S_{rl}=0$) se alcanza en los primeros instantes del centrifugado, en $r=r_g$ para $t>0$, $S_{rl}=0$.

Lo que significa teóricamente que la presión capilar es infinita y que la presión del líquido es negativa, a partir de la ecuación:

$$P_c(S_{rl}) = P_g - P_l \quad \text{Ec. 3.34}$$

Cuando $P_g = P_{\text{atmosférica}}$

Ecuaciones de transporte

Se describe un flujo de dos fases en un medio poroso por la ecuación generalizada de Darcy. La dependencia de la permeabilidad con la saturación es tomada en cuenta a través de la permeabilidad relativa (k_{rl}) donde los efectos capilares son introducidos por medio de la presión capilar P_c . Se asume que:

- El flujo de líquido es unidimensional
- La fase gas es una “fase pasiva”
- La torta es considerada como un medio poroso homogéneo
 ϵ y k , constantes, entonces se tiene una torta incompresible.
- La variable principal es la Saturación líquida o la presión del líquido.
- Continuidad en la velocidad del líquido V_l .

En el caso de drenado por centrifugación, la diferencia de viscosidad entre la fase líquida y la fase gas, y el hecho de que la fase gas ocupe sólo el espacio de los poros abandonados por el agua, permiten tratar a la fase gaseosa como una fase pasiva.

Si asumimos condiciones isotérmicas e incompresibilidad, y que la transferencia de humedad se da en el espesor de la pasta, entonces se utilizarán dos variables de espacio

(x,y) y el término gradiente de las ecuaciones diferenciales parciales de transporte se reduce.

A continuación se definen las ecuaciones y parámetros empleados para la solución del modelo multifísico en Comsol Multiphysics versión 3.4. Modulo: Difusión.

Tabla 3.2 Expresiones del subdominio

Subdominio	Ecuación	Variable a resolver
Conservación total de humedad	$\partial S / \partial t = -c1 * (c2 - c3)$	S

Tabla 3.3 Expresiones escalares

Nombre	Expresión	Unidades
c1	$(k * krl) / (\text{epsi} * \text{visl})$	mol ³ /m ⁹
c2	$0.5 * \text{rho} * \text{omega}^2 * x$	M
c3	diff (c4,x)	
c4	diff (Pc,x)	
Pc	$13036 * S^2 - 28072 * S + 28780$	
krl	$1 * (S >= 1) + S^3 * (S < 1)$	mol ³ /m ⁹
Sprom	Sat/L	

Tabla 3.4 Ecuaciones de contorno

Contorno		2-3	1	4
Tipo		Aislamiento/Simetría	Flux	Flux
Nombre				
Flux entrante (N)	mol/(m ² ·s)	0	0	0
Coefficiente de transferencia de masa (kc)	m/s	0	1e-5	1e-5
Concentración de volumen (cb)	mol/m ³	0	0.32	0.42
Coefficiente de difusión (Dbnd)	m ² /s	0	0	0
Espesor (d)	m	1	1	1
Concentración (c0)	mol/m ³	0	0	0

Expresión de las condiciones de contorno:

$$\frac{\partial S}{\partial x} = kc(Cb - S)$$

Tabla 3.5 Malla

Número de grados de libertad	2513
Número de puntos de malla	665
Número de elementos	1184
Triangular	1184
Quadrilateral	0
Número de elementos de contorno	144
Número de elementos de vértice	4
Calidad mínima de elemento	0.8066
Índice de área de elemento	0.3051

Los experimentos se realizaron con talco en polvo (Luzenac), con un tamaño medio de partícula $T_{par} = 24 \mu\text{m}$, y densidad de sólidos $\rho_s = 2707 \text{ kg/m}^3$. El líquido utilizado fue agua con densidad $\rho_l = 1000 \text{ kg/m}^3$. Todos los experimentos se realizaron a temperatura ambiente del laboratorio de 20°C . La centrífuga utilizada en esta investigación fue una Centrífuga marca Robatel, con altura interior de 0.198 m y radio interior de 0.15 m, operando a una velocidad constante de 3000 rpm. Se realizaron tres experimentos, bajo las mismas condiciones de operación, obteniéndose resultados similares: espesor de la torta de 0.017 m y altura de 0.195 m.

Tabla3.6 Constantes

Nombre	Expresión	Descripción
K	2e-18	Permeabilidad intrínseca
Epsi	0.5	Porosidad
Visl	0.001	Viscosidad del líquido
Rhol	1000	Densidad del líquido
Omega	3000	Velocidad de centrifugación

Capítulo 4. Resultados

Se presentan, en la primera parte de este capítulo, los resultados obtenidos de las ecuaciones propuestas para determinar la evolución del radio líquido, radio sólido y espesor de la torta de filtrado. Se considera necesario presentar las gráficas que describen la evolución de la velocidad de centrifugación, ya que una velocidad de operación constante asegura la correcta determinación de las variables. El flujo másico de alimentación se presenta con el propósito de identificar cada etapa de la operación, así como de evaluar el procedimiento experimental. El flujo másico de filtrado evacuado así como el flujo másico de filtrado retenido permiten caracterizar el proceso para llevar a cabo los balances de masa.

La segunda parte corresponde a la determinación de la evolución de la Saturación utilizando el modelo fenomenológico resuelto en COMSOL Multiphysics Versión 3.4, comparándolo con el obtenido mediante los balances de masa utilizando los datos experimentales.

4.1 Flujo másico de alimentación

Las gráficas de las figuras 4.1, 4.2 y 4.3 muestran la evolución del flujo másico de alimentación, así como de la velocidad de centrifugación de los tres experimentos realizados bajo las mismas condiciones: fms 0.057, alimentación de la suspensión de 150 kg/hr y velocidad de operación de 3000 rpm.

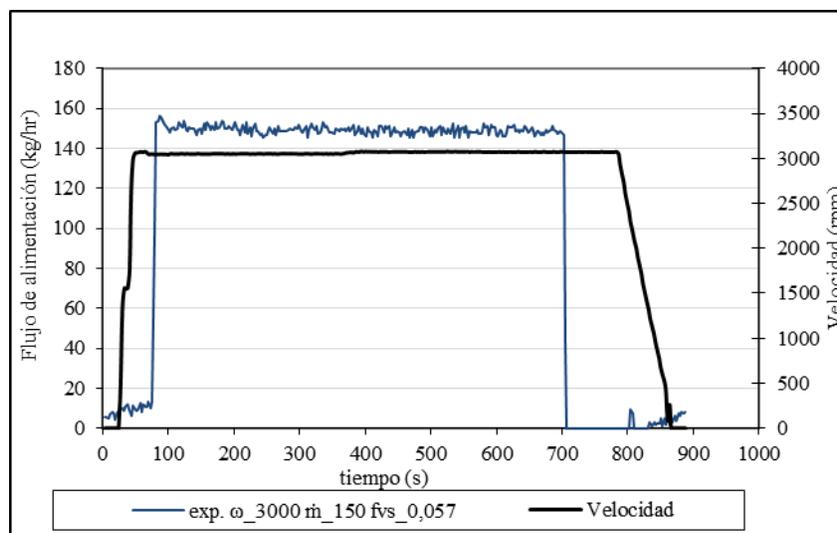


Fig. 4.1 Evolución del flujo másico de alimentación y de la velocidad de centrifugación con respecto al tiempo de la suspensión agua-talco, experimento1.

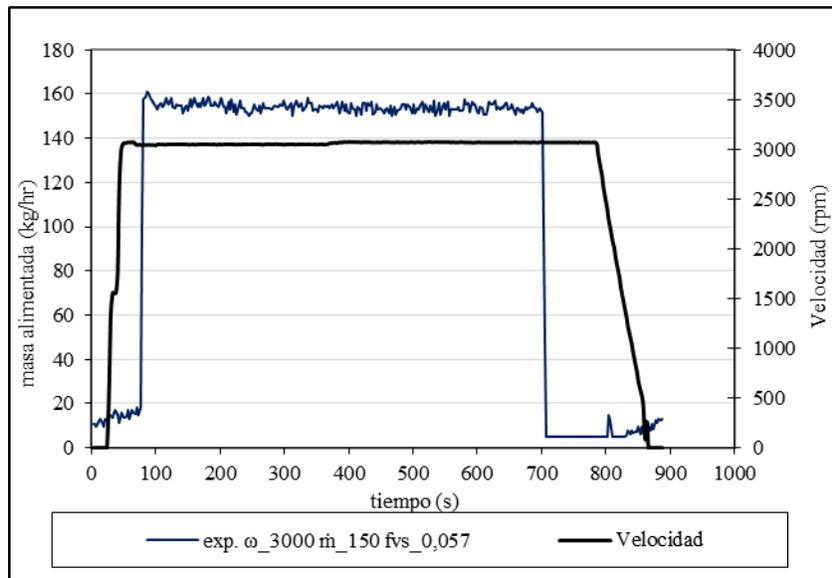


Fig. 4.2 Evolución del flujo másico de alimentación y de la velocidad de centrifugación con respecto al tiempo de la suspensión agua-talco, experimento 2.

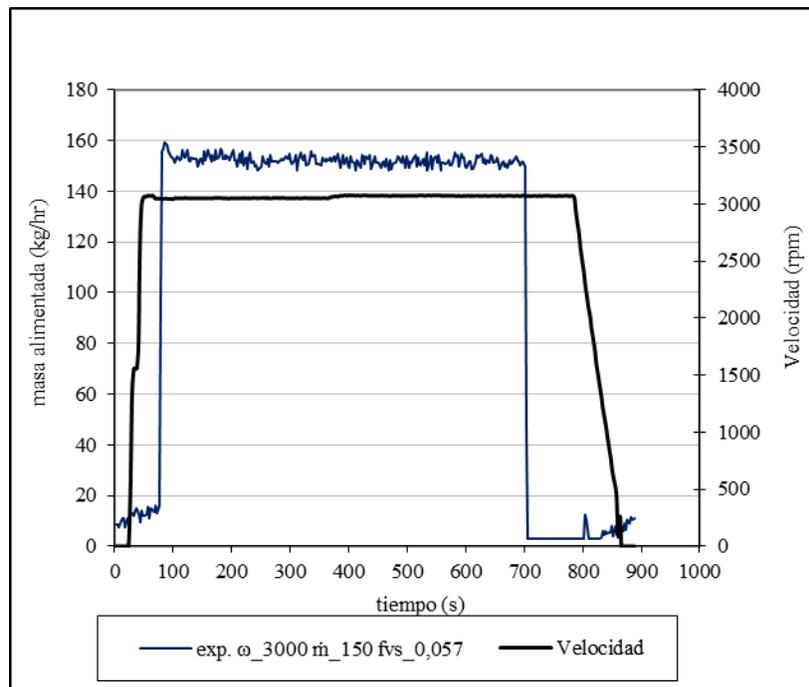


Fig. 4.3 Evolución del flujo másico de alimentación y de la velocidad de centrifugación con respecto al tiempo de la suspensión agua-talco, experimento 3.

Se observa en los tres experimentos que el flujo másico de alimentación y la velocidad de centrifugación permanecen en promedio constantes durante el proceso. Es importante resaltar este hecho ya que, la velocidad de operación determina la fuerza centrífuga aplicada sobre la suspensión y en consecuencia, la variación del flujo de filtrado por la compresibilidad de la torta de filtración. Las figuras permiten mostrar que las condiciones de operación fueron las mismas para cada experimento.

La figura 4.4 muestra el flujo másico de alimentación y de la velocidad de operación de los tres experimentos. Como puede observarse, los tiempos de operación, tanto de alimentación como de velocidad de centrifugación son los mismos. Con esto se asegura un mismo nivel de carga en cada experimento. Durante la alimentación de la suspensión, el tanque de almacenamiento es agitado constantemente, para evitar la precipitación de las partículas.

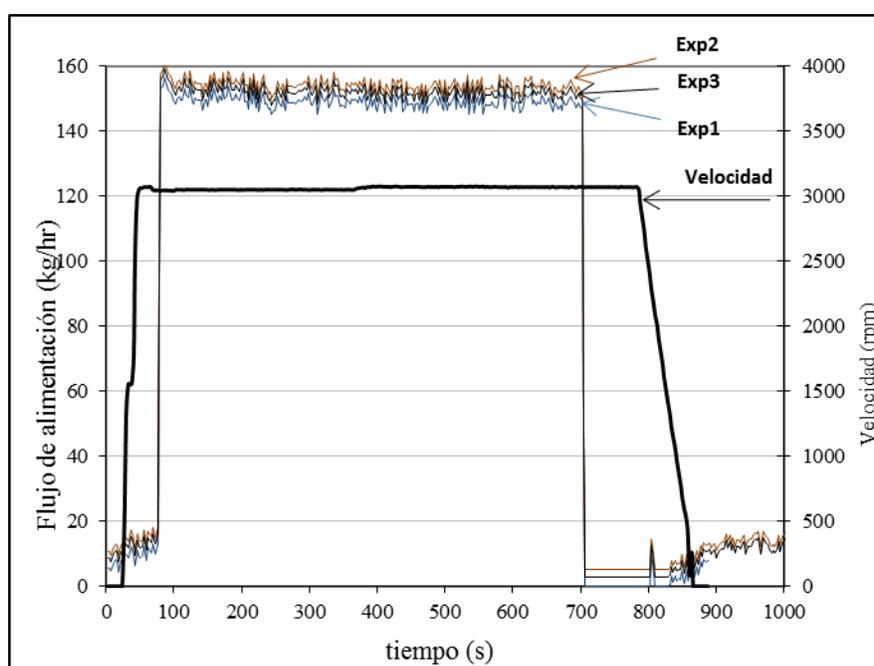


Fig. 4.4 Evolución del flujo másico de alimentación y de la velocidad de centrifugación con respecto al tiempo de la suspensión agua-talco, experimentos 1,2 y 3.

Al graficar el flujo másico de alimentación se puede observar consistencia en la operación ya que al estabilizarse la alimentación de la suspensión a la centrífuga, a los 80 segundos se mantiene en promedio constante a razón de 150 kg/hr, dejándose de alimentar a la centrífuga a los 700 segundos. La velocidad de rotación de 3000 rpm se alcanza a los 46 segundos del arranque y se mantiene en promedio constante hasta los 772 segundos.

4.2 Evolución del flujo másico de filtrado

Dos parámetros fundamentales en la determinación de los balances son: la masa de filtrado evacuado, que corresponde a la masa de filtrado obtenido a la salida del cesto centrífugo, idealmente agua libre de sólidos y la masa de filtrado retenido, la cual corresponde al

filtrado acumulado entre el tambor y la cesta. En general se considera para el balance de masa, un fluido con cero contenido de sólidos. Si bien, esta consideración puede generar desviaciones de lo real, una forma de considerarlo podría ser determinando la fracción de sólidos a las salida del cesto. En nuestro caso, lo hemos considerado ideal, pues la fracción de sólidos retenidos en el cesto fue importante.

La figura 4.5 que corresponde únicamente al experimento 1, se muestran dichas masas para apreciar su evolución durante el proceso.

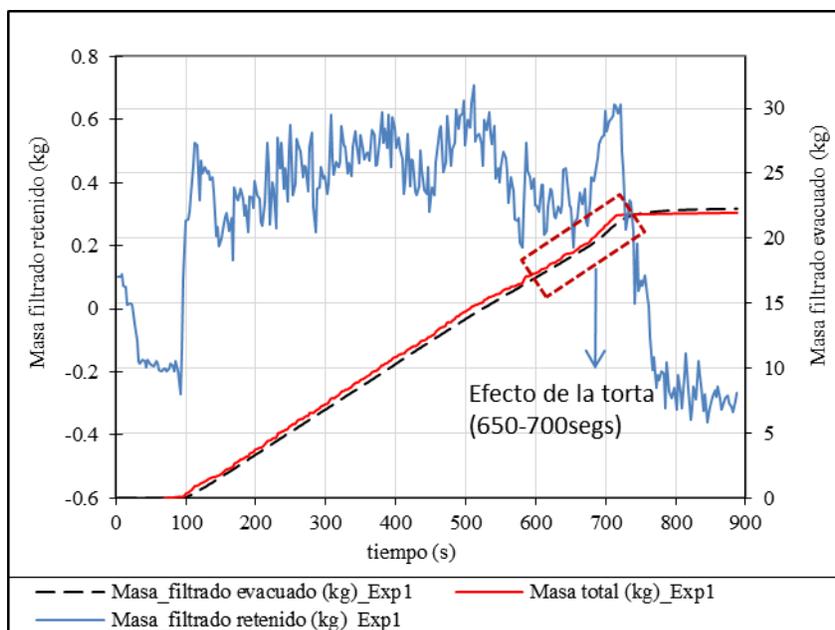


Fig. 4.5 Evolución del flujo másico de filtrado con respecto al tiempo de la suspensión agua talco. Experimento 1.

En la figura 4.5 se aprecia que la masa de filtrado evacuado (línea punteada en color negro) se mantiene uniforme durante la operación de centrifugado, de hecho su evolución es “casi lineal” graficada contra el tiempo. Sin embargo, sabemos que la conformación y consolidación de la torta tendrá un efecto de resistencia a la migración de humedad, la cual podemos observar si nos acercamos a los datos registrados entre 650 y 700 segundos, que son los últimos instantes de la alimentación de la suspensión. La masa de filtrado retenido varía notablemente (línea color azul), lo cual se atribuye a la vibración generada por la alta velocidad de rotación de la centrifuga. La cuantificación de la masa de filtrado retenido es de un promedio aproximado de 500 gr y la masa de filtrado evacuado registra aproximadamente 22.5 kg, de ahí que, al graficar la masa total (línea en color rojo) se aprecia una ligera variación con respecto a la masa de filtrado evacuado.

Los datos anteriores son importantes, pues son difíciles de obtener experimentalmente, debido a la configuración de la centrifuga, pues al interior tiene un carter y el cesto que gira a gran velocidad; de ahí la relevancia de analizar estas curvas.

La Figura 4.6 describe el desarrollo de la masa de filtrado total de los tres experimentos, observándose un comportamiento muy similar en cada uno de ellos ya que las líneas quedan superpuestas, lo cual asegura la repetitividad de los experimentos.

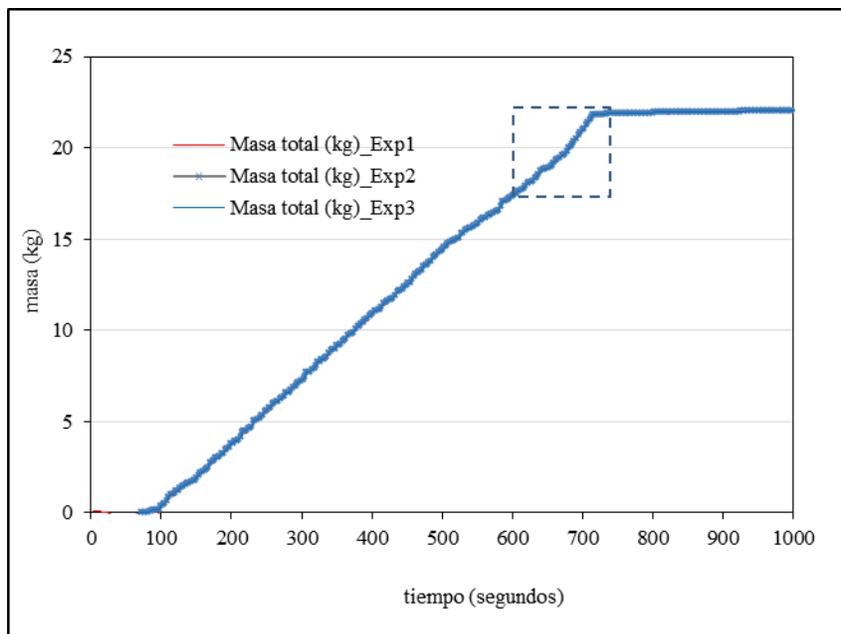


Fig. 4.6 Evolución del flujo másico de filtrado total con respecto al tiempo de la suspensión agua talco. Experimentos 1,2 y 3.

En la figura anterior volvemos a constatar el efecto que la consolidación de la torta filtrante tiene sobre la evacuación de líquido. Evacuar 22kg de líquido de una suspensión con fracción másica igual a 0.1428 toma aproximadamente 600 segundos aplicando una fuerza de 3000 revoluciones por minuto. Este dato es importante, pues si quisiéramos hacer lo mismo con un secado térmico, nos tomaría más tiempo y sobre todo, consumiría mucha más energía evaporar 22 kg de agua. Además se debe considerar que para evaporar esa cantidad de agua en suspensiones de interés cosmético, farmacéutico, etc., las temperaturas utilizadas afectarían las propiedades de los materiales en estudio.

Durante el proceso de alimentación, las partículas sólidas van acumulándose en las paredes del tambor formando un lecho poroso (torta filtrante). Los poros de este medio filtrante tendrán una forma tortuosa y serán mayores que las partículas que se están separando. A medida que avanza el proceso de filtración aumenta el espesor de la torta por lo que la resistencia al paso del fluido será cada vez mayor (incrementándose dicha resistencia progresivamente). Los factores más importantes de los que depende la velocidad de filtración son por tanto: la caída de presión desde la alimentación hasta el lado más lejano del medio filtrante, el área de la superficie filtrante, la viscosidad del filtrado y la resistencia de la torta filtrante. La figura 4.7 muestra la evolución del flujo de filtrado de los tres experimentos realizados, así como el flujo de alimentación de la suspensión.

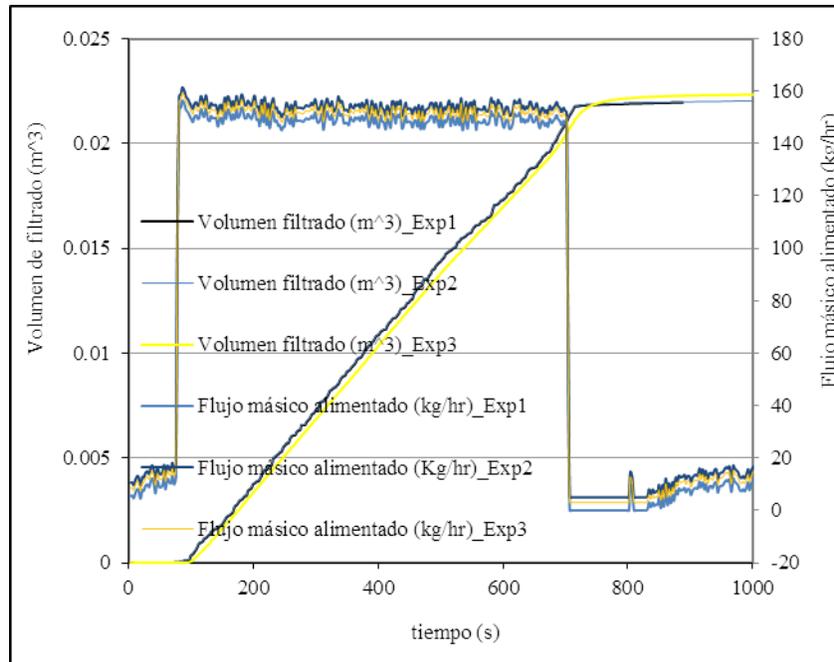


Fig. 4.7 Volumen de filtrado con respecto al tiempo de la suspensión agua talco. Experimentos 1,2 y 3.

La Figura 4.8 corresponde al experimento 2, pero únicamente se grafica el periodo de tiempo que va de los 600 a los 880 segundos (tiempo en el que se detiene la operación), con el propósito de ver a detalle esta última etapa del proceso de filtración y en donde no se observa que sea constante, sino que presenta una pendiente que se va incrementado muy lentamente (línea color azul). Este periodo es importante ya que determina la etapa de deshidratación de la torta, considerando que se ha dejado de alimentar suspensión a la centrifuga a los 700 segundos (línea color negro) y a partir de ahí se comienza a retirar la humedad residual que queda en la torta de filtración, apreciándose en este periodo un incremento gradual del volumen de filtrado. Así mismo se observa que después de detenida la alimentación, la evacuación de líquido continúa lentamente. No es visible a gran escala, pero la línea punteada muestra ese incremento en metros cúbicos.

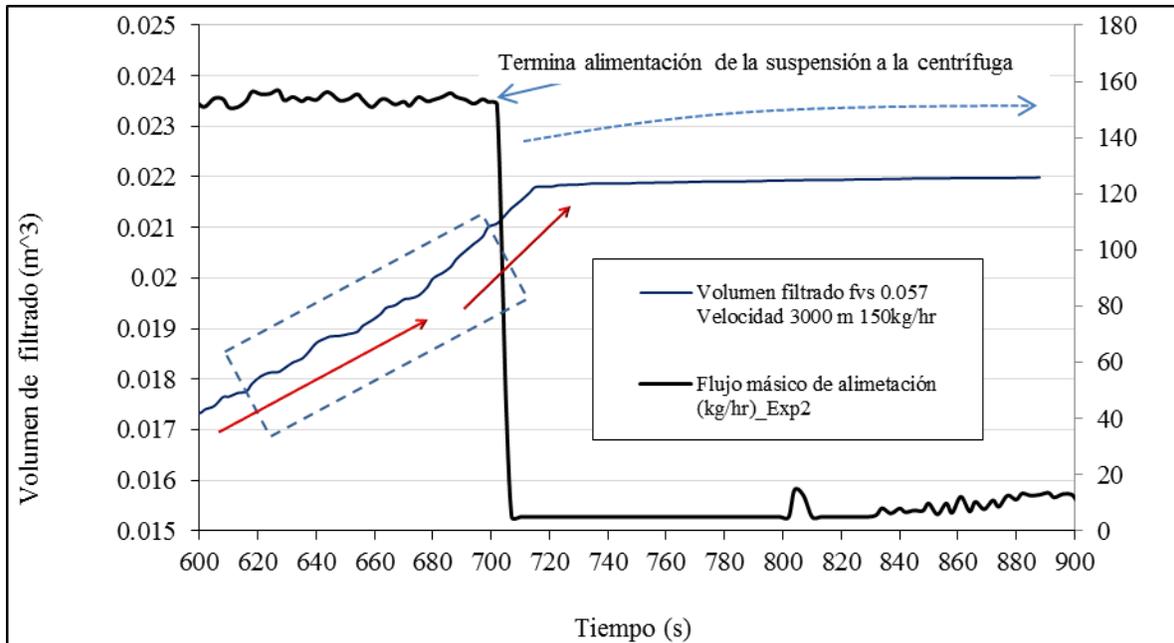


Fig. 4.8 Volumen de filtrado con respecto al tiempo de la suspensión agua talco. Experimentos 1,2 y 3.

En la figura 4.9 se compara la evolución del espesor de la torta filtrante con respecto al volumen de filtrado. El espesor de la torta depende de la geometría y estructura de las partículas, así como de la velocidad de deposición. La importancia entonces, de entender la formación de la torta al inicio del proceso es que, la velocidad de flujo es mayor al comienzo del proceso ya que la resistencia es mínima, elevadas velocidades de filtración iniciales pueden provocar la obturación de los poros causando una resistencia muy alta al paso del fluido y la orientación de las partículas en las etapas iniciales pueden influenciar de forma apreciable la estructura de toda la torta filtrante. De las observaciones dadas, se deduce la evolución del espesor de la torta de filtración mostrado en la figura 4.9.

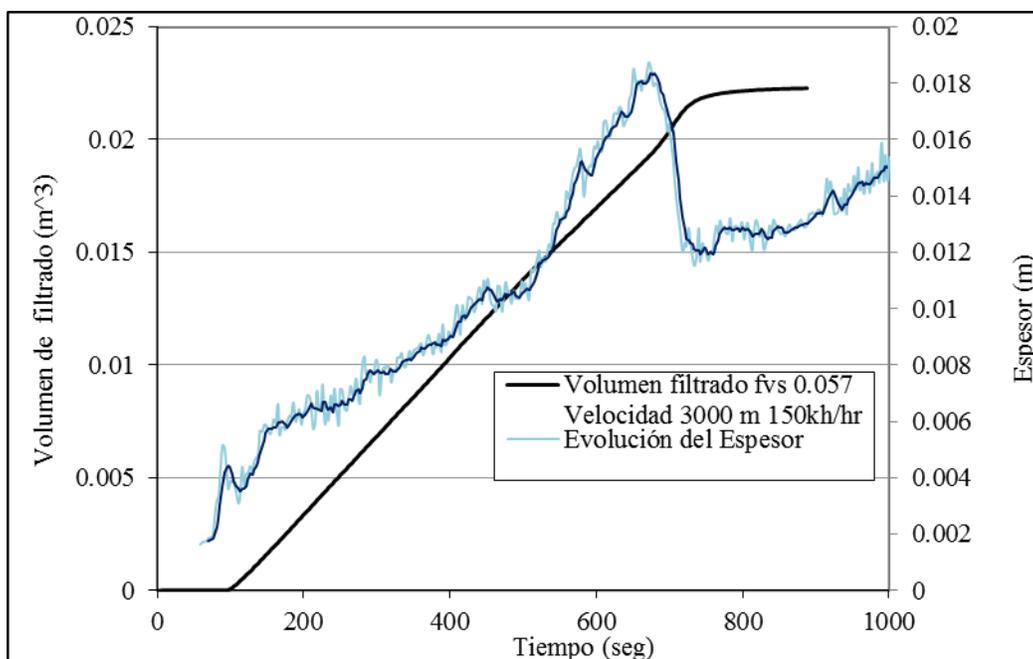


Fig. 4.9 Evolución del espesor de la torta de filtración y volumen de filtrado

Una vez que se ha suspendido la alimentación a la centrífuga, transcurren 11 segundos antes de que el flujo de filtrado se considere que alcanza el equilibrio, el cual se da a partir de los 713 segundos. Es en este periodo de tiempo que se desplaza la película de líquido formada sobre la superficie de la torta sólida y en el cual también se da el mayor desplazamiento de líquido en la torta (la saturación decrece rápidamente ya que los poros están llenos de agua y la permeabilidad es menor), a medida que los poros empiezan a perder agua, estos se comprimen por acción de la fuerza centrífuga, la permeabilidad de la torta aumenta y el paso de agua se hace más lento, tendiendo a un equilibrio.

Tarleton (1997) realizó experimentos con diferentes materiales en un equipo automatizado encontrando que las curvas de flujo volumétrico de filtrado obtenidas experimentalmente eran consistentes con las predicciones teóricas. Las gráficas que presenta Tarleton, son semejantes a las presentadas en este trabajo para el flujo de filtrado. Como consecuencia de la medición de los perfiles de concentración de sólidos en la celda del filtro, fue posible evaluar los cambios en el espesor de la torta del filtro con respecto al tiempo.

4.3 Evolución del radio líquido y sólido calculado contra el radio sólido medido

De la formulación propuesta en la metodología, se determina la variación del radio líquido, la cual se muestra en las gráficas de las figuras 4.9, 4.10 y 4.11 las cuales corresponden a los experimentos 1, 2 y 3 respectivamente. El radio líquido, inicia en 0.158 m que es el valor del centro a la pared interior de la centrífuga (espesor cero), a partir de ahí comienza a crecer hacia el centro de la centrífuga y numéricamente a reducirse hasta que se deja de alimentar suspensión, alcanzando así su valor máximo de 0.142 m, la tendencia, como es

de esperarse, no es lineal ya que la expresión que permite determinar el radio líquido es cuadrática.

El espesor de la torta calculado que resulta de la diferencia entre el radio interior de la cesta y el radio líquido calculado, tiene un valor aproximado de 0.017 m, ya que sus valores dependen de la variación del radio líquido. En las gráficas mostradas se muestra la evolución del radio líquido y el espesor, comparándose el espesor calculado con los datos del crecimiento de la torta tomados físicamente, para delinear la tendencia y corroborar la utilidad de las ecuaciones planteadas.

Los símbolos rojos representan los datos experimentales, mientras que las curvas son los resultados calculados. La masa de la torta aumenta rápidamente al principio de la filtración y poco a poco se acerca a un valor final, cuando la mayoría de las partículas sólidas se depositan en la pared del filtro.

En estas figuras se puede constatar que en los últimos segundos de la formación del radio sólido, hay una pendiente más intensa, lo cual explica una mayor resistencia al flujo a través de ella. Esto se ha discutido observando las figuras de flujo evacuado. Las desviaciones observadas entre los datos experimentales y los calculados (teóricos) son debidas al error que existe en la técnica de medición del radio con la ayuda del estroboscopio, además del error que existe al considerar que el fluido evacuado es sólo agua. En realidad en el líquido evacuado, existen partículas sólidas que logran pasar el filtro pues son mucho menores en tamaño a las 24 micras. Esto ha motivado a algunos trabajos para utilizar un segundo proceso de filtración para partículas más finas.

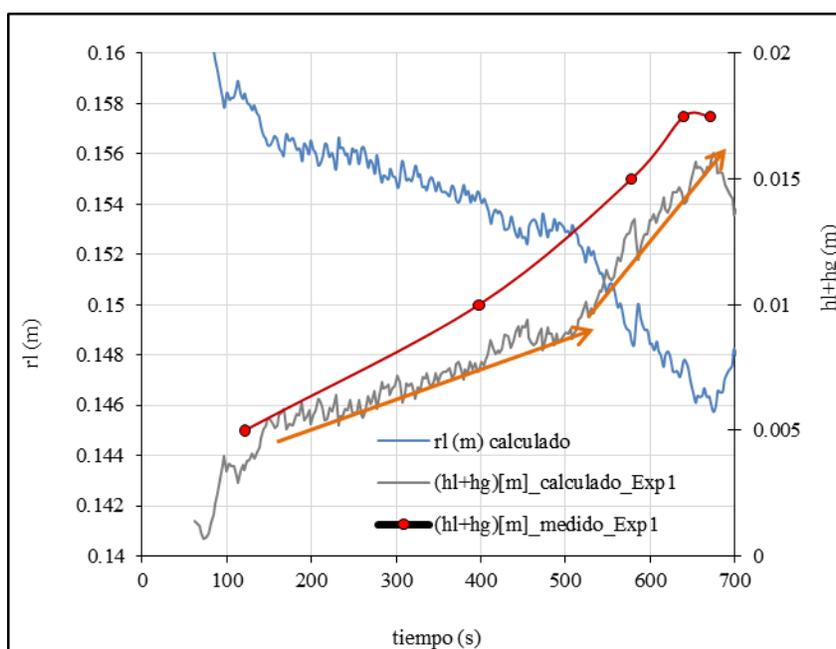


Fig. 4.10 Evolución del radio líquido y radio sólido calculados contra el radio sólido medido con respecto al tiempo de la suspensión agua talco. Experimento1.

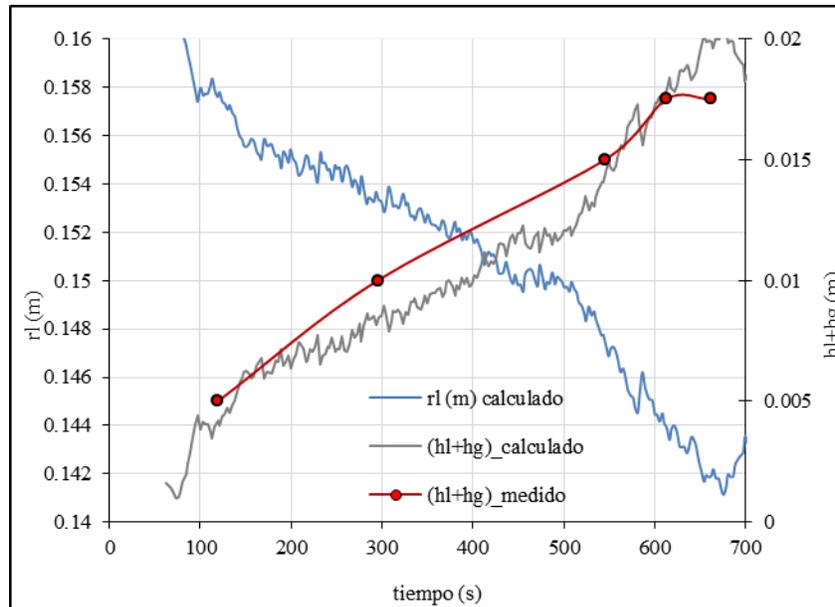


Fig. 4.11 Evolución del radio líquido y radio sólido calculados contra el radio sólido medido con respecto al tiempo de la suspensión agua talco. Experimento 2.

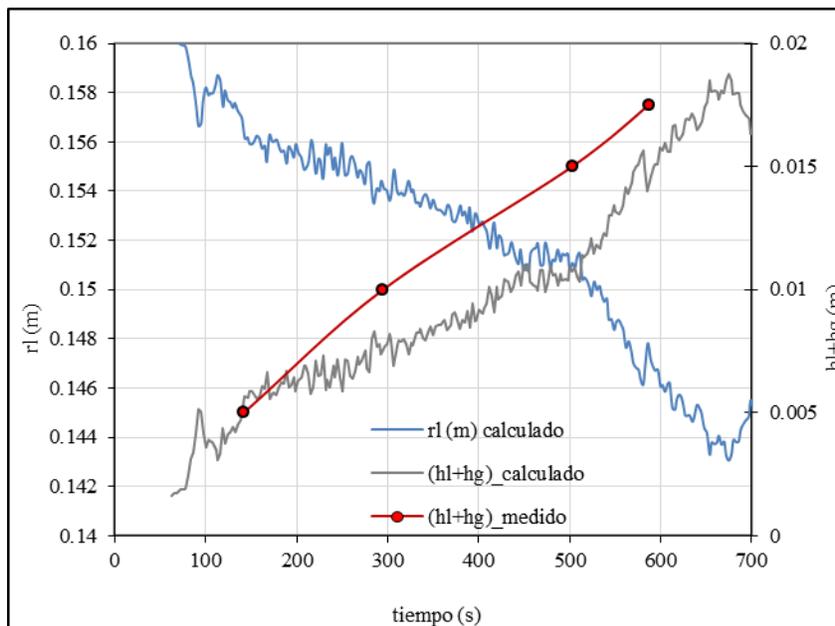


Fig. 4.12 Evolución del radio líquido y radio sólido calculados contra el radio sólido medido con respecto al tiempo de la suspensión agua talco. Experimento 3.

La Figura 4.12 compara el espesor medido experimentalmente en cada prueba observándose la variación unicamente en el tiempo, siendo los espesores medidos iguales en cada caso.

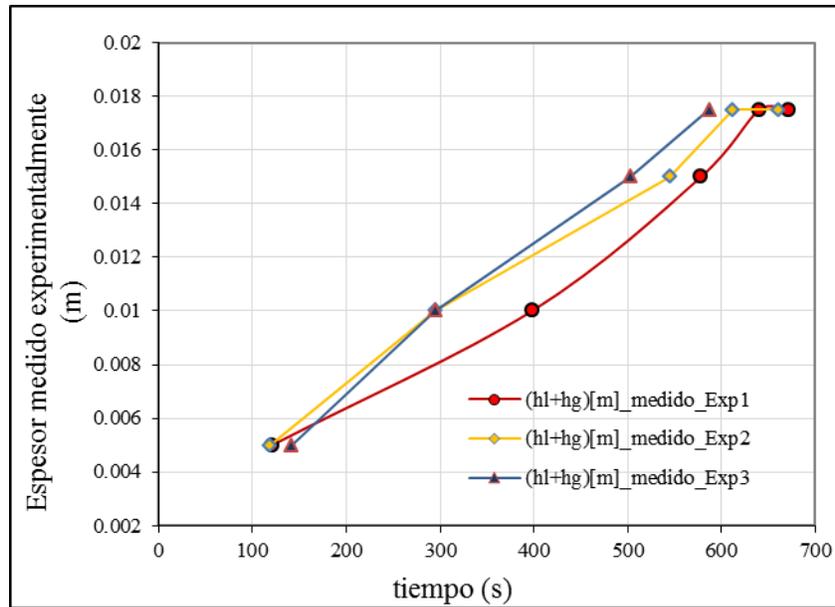


Fig. 4.13 Evolución del espesor calculado con respecto al tiempo de la suspensión agua talco. Experimentos 1, 2 y 3.

Las siguientes tablas contienen los datos tomados experimentalmente del espesor de la torta:

Tabla 5.1 Determinación experimental de espesor de la torta

tiempo (seg)	e (mm)	(hl+hg)_medido
121	5	0.005
398	10	0.01
578	15	0.015
640	17.5	0.0175
671	17.5	0.0175

Experimento 1. Espesor medido experimentalmente

tiempo (seg)	e (mm)	(hl+hg)_medido
119	5	0.005
295	10	0.01
545	15	0.015
612	17.5	0.0175
661	17.5	0.0175

Experimento 2. Espesor medido experimentalmente

tiempo (seg)	e (mm)	(hl+hg)_medido
142	5	0.005
295	10	0.01
503	15	0.015
587	17.5	0.0175

Experimento 3. Espesor medido experimentalmente

La exactitud de estos datos es debidamente confirmada mediante un muestreo del crecimiento de la torta sólida. Los puntos rojos son los puntos que se tomaron experimentalmente con ayuda del Stroboscopio, y los cuáles nos sirven para comparar la tendencia de la evolución del espesor de la torta.

4.4 Deshidratación de la torta

Una vez formada la torta de partículas sólidas, es necesario mantener rotando el cesto, pues ahora se debe evacuar la humedad contenida en dicha torta. Este momento es muy importante, pues es en donde inicia el proceso de deshidratación de la torta. En este proceso, la fuerza centrífuga así como las fuerzas capilares son los principales responsables

de la migración humedad. En este punto se considera a la torta como un medio saturado ($S=1$). Para realizar este cálculo, es necesario identificar con cuidado el momento en el cual inicia la desaturación, la cual se da momentos después de finalizada la alimentación de la suspensión. El cálculo deberá iniciar cuando los poros están completamente llenos de líquido. En la práctica, se realizó con la ayuda de un Stroboscopio, el cual permite observar el momento en el que cambia el brillo de la superficie de la torta. Por supuesto, este procedimiento podría mejorarse, algunas recomendaciones las daremos en el apartado correspondiente.

En la Figura 4.14 se presenta la evolución de los perfiles de Saturación obtenidos en los tres experimentos, con el fin de compararlos con los arrojados por el modelo multifísico. Se aprecia que la torta húmeda comienza en un estado completamente saturado, $S = 1$, hasta un punto en el equilibrio donde $S \approx 0.32$. Se observa que la Saturación desciende rápidamente al inicio, en aproximadamente 15 segundos y se comienza a estabilizar tendiendo a un equilibrio. En esta figura vemos una disminución de la saturación que va de 1 hasta 0.32 en aproximadamente 15 segundos. Lo anterior refleja lo rápido de este proceso.

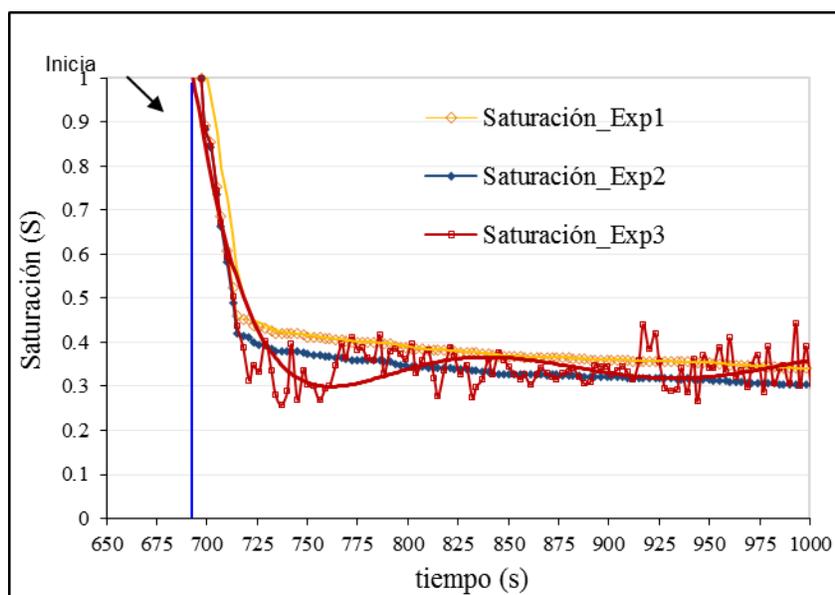


Fig. 4.14 Evolución de la Saturación con respecto al tiempo de la suspensión agua talco. Experimentos 1, 2 y 3.

En la figura 4.15 se incorpora en línea color azul, el perfil de Saturación promedio obtenido mediante el Modelo en Comsol Multiphysics. Este modelo se ha resuelto numéricamente, considerando la expresión de Darcy y la fuerza centrífuga. El modelo se resuelve en menos de 10 segundos utilizando una computadora personal con procesador Pentium 4. Se aprecia que al principio de la etapa de desaturación, en los primeros 40 segundos, la saturación desciende rápidamente, tendiendo al equilibrio a los 80 segundos aproximadamente, lo cual también se puede apreciar en los perfiles de saturación obtenidos experimentalmente.

Estas figuras confirman la eficacia de este tipo de procesos. Pues en realidad los datos experimentales y simulados revelan tiempos de de-saturación muy cortos respecto a otros procesos de separación por medio térmicos.

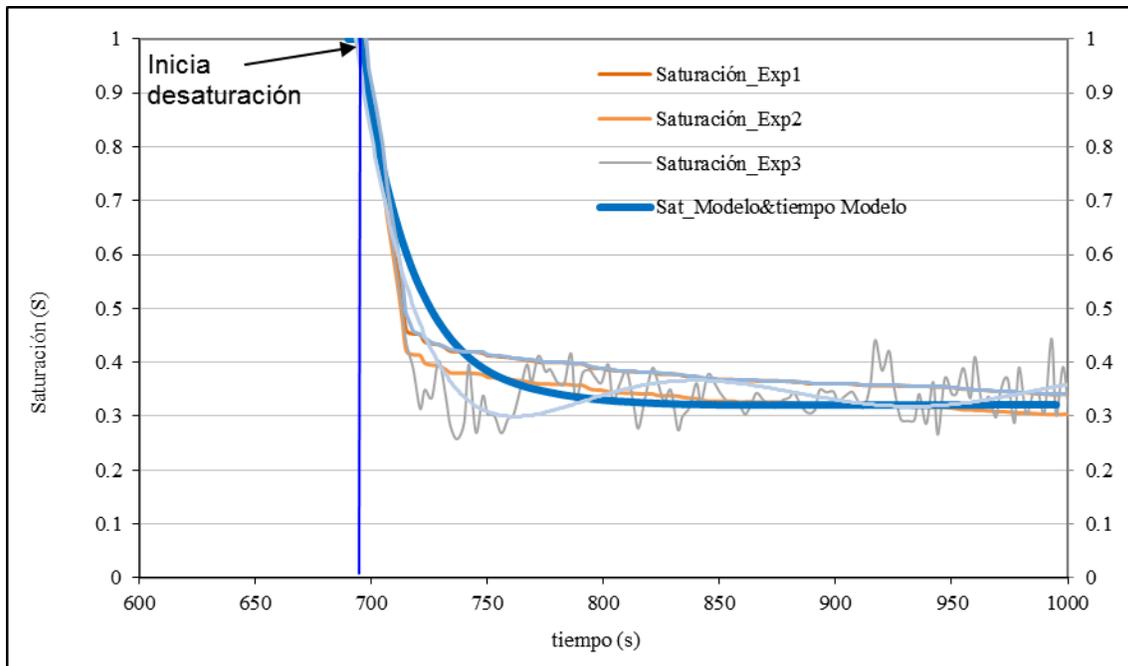


Fig. 4.15 Perfiles de Saturación determinados experimentalmente contra perfil obtenido del Modelo Comsol Multiphysics Versión 3.4 Modulo EDP

La figura 4.16 muestra la evolución de la Saturación promedio de la torta para un tiempo especificado de 150 segundos, que es el tiempo aproximado en el cual se evacúa la humedad de la torta constituida antes de detener el proceso de centrifugación.

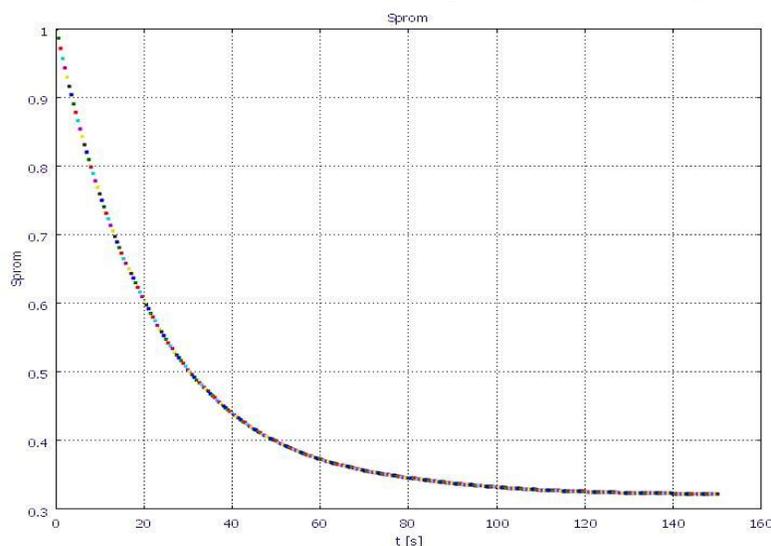


Fig. 4.16 Perfil de Saturación determinado por el Modelo en Comsol Multiphysics Versión 3.4 Modulo Difusión.

El modelamiento del drenado se basa en el desarrollo de una relación que expresa la evolución de la Saturación promedio del líquido en la torta filtrante a través del tiempo. Se observa que la Saturación parte de uno, que es el valor máximo de un estado saturado, y a partir de ahí comienza la fase de de-saturación o deshidratación, la cual alcanza un valor promedio de saturación de 0.32 en el equilibrio.

Es importante notar, que deshidratar una torta saturada de 3.99 kg, utilizando un secado térmico, tomaría más tiempo, pues es una pasta (una torta de sólidos consolidados). Además de que la energía sería mayor para evacuar la humedad. Este proceso de centrifugación toma 125 segundos, lo cual revela el gran interés por este tipo de procesos.

De acuerdo con Ruslim et al (2009), quien realizó experimentos con arenas de sílice variando la velocidad de rotación, la saturación disminuye con el aumento del factor g . considera que la saturación en este régimen también conocida como “saturación remanente” es la parte de líquido que se une más fuerte dentro de la torta por capilaridad del líquido, la cual no se puede retirar de manera significativa por fuerzas mecánicas. La saturación decrece rápidamente al principio de la etapa de deshidratación en los primeros segundos tendiendo luego a un equilibrio.

En la Figura 4.17 se presentan los perfiles de Saturación obtenidos en Comsol Multiphysics en el Modo EDP (Ecuaciones Diferenciales Parciales). Como se observa, la saturación no alcanza el valor de equilibrio de 0.32 como en los perfiles mostrados anteriormente, esto se debe principalmente a las condiciones de contorno especificadas, las cuales son un tema a desarrollar en el futuro, pues la pregunta es qué tipo de condiciones se aplican cuando una fuerza centrífuga es aplicada a una torta de sólidos compactados.

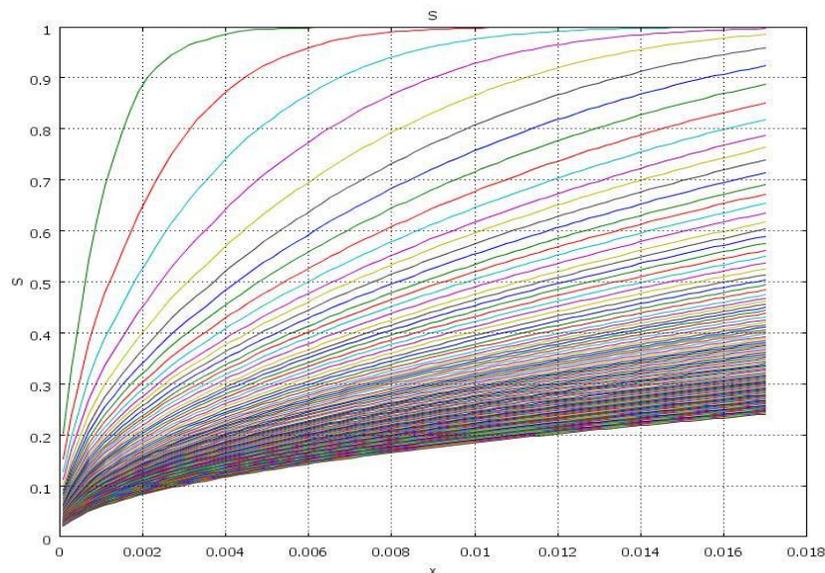


Fig. 4.17 Perfil de Saturación determinado por el Modelo en Comsol Multiphysics Versión 3.4 Modulo EDP

La permeabilidad de la torta puede controlar la velocidad de deshidratación. La deshidratación de la torta por la compresión y el reordenamiento de los sólidos en la matriz de la torta reducen la porosidad ε .

Las gráficas obtenidas para la evolución de la permeabilidad relativa del líquido en este trabajo se muestran en la figura 4.18, para la determinación de la permeabilidad y la presión capilar se utilizaron las ecuaciones propuestas por Brooks y Corey. La figura muestra el comportamiento de la permeabilidad relativa del líquido tomando para su solución los valores de la Saturación determinada mediante los valores obtenidos experimentalmente. Se observa que al inicio del drenado en $S=1$, la permeabilidad relativa de la fase líquida es máxima ($k_{rl}=1$).

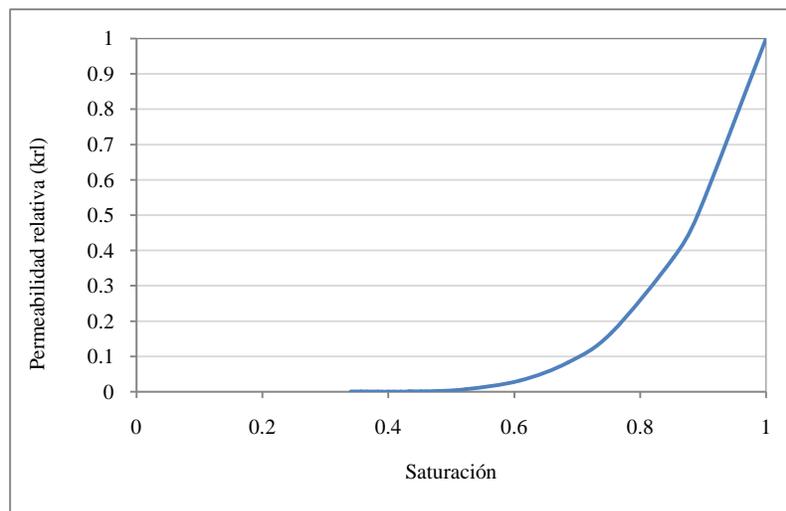


Fig. 4.18 Perfil de Permeabilidad relativa determinado a partir de datos experimentales.

La precisión de los modelos depende en gran manera de la permeabilidad relativa, la cual es función de la Saturación. El flujo de la fase líquida dependerá entonces de la facilidad con la cual esa fase podrá desplazarse dentro del medio poroso. En las gráficas se observa que la permeabilidad es mayor cuando se tiene un estado completamente saturado, es decir, en este punto el líquido fluye más fácilmente, sin embargo, a medida que la saturación disminuye, también la permeabilidad disminuye y en consecuencia el fluido se desplaza más lentamente.

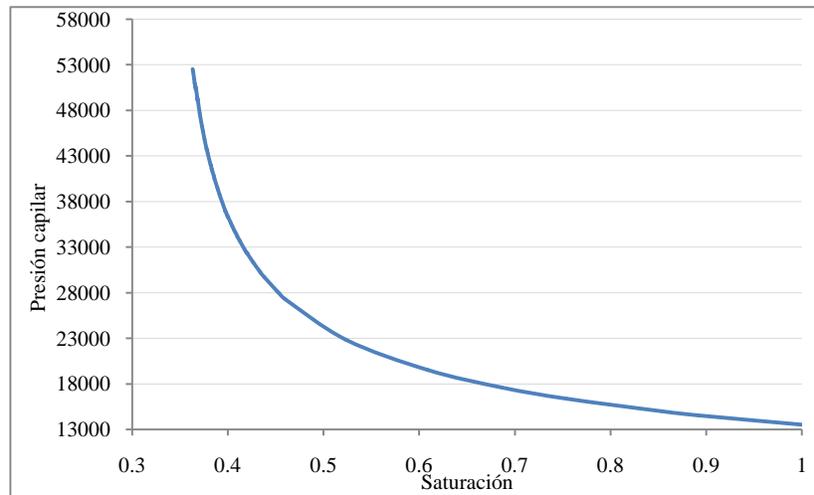


Fig. 4.19 Perfil de Presión capilar determinado con los datos experimentales.

Capítulo 5. Conclusiones

En este estudio se determinó la evolución del espesor de la torta de filtración al interior de un tambor centrífugo, así como la transferencia de humedad en la torta constituida. Para conocer la evolución del espesor de la torta fue necesario determinar el crecimiento del radio líquido a través de los balances macroscópicos de masa. Para facilitar el análisis se consideró al medio poroso como no compresible.

Es importante asegurar un flujo de alimentación así como una velocidad de rotación constante, ya que son parámetros que influyen en la determinación de las variables que nos permitirán conocer el crecimiento de la torta de filtración, así como la evolución de la Saturación.

Momentos antes de detener la alimentación se observó un efecto de la torta sobre la evacuación del líquido. Este efecto fue observado también en las curvas de evolución del espesor de la torta, la cual permite evacuar líquido lentamente aun después de detenida la alimentación.

La formulación de ecuaciones propuestas mediante balances de masa permitió determinar el espesor de la torta alcanzándose un valor máximo de 0.017 m. en un tiempo de operación de 600 segundos el cual es muy similar al valor determinado experimentalmente de 0.0175 m. La etapa de de-saturación inicia aproximadamente a los 700 segundos del proceso, alcanzándose una saturación mínima en la torta de 0.32 Dichas predicciones son consistentes con los datos de espesor tomados experimentalmente lo cual hace válidas las ecuaciones planteadas.

La determinación experimental del crecimiento del radio sólido es difícil y su medición requiere de gran precisión y exactitud, además de un dispositivo experimental adaptado. Los experimentos realizados muestran que los datos obtenidos para llevar a cabo los balances de masa son cercanos a lo real.

De las leyes de la mecánica aplicada a cualquier forma de poros, algunos autores lo han abordado en la escala macroscópica con ecuaciones complejas que implican parámetros difíciles de determinar experimentalmente. En el modelo resuelto en Comsol Multiphysics se consideró para la solución del modelo, que la centrífuga gira a una velocidad constante, que la gravedad se supone despreciable en el proceso de centrifugación, que el medio poroso es incompresible y homogénea y que la fase gas es una fase pasiva. Teniendo en cuenta estos supuestos, la ecuación de continuidad y la Ley generalizada de Darcy aplicada a la filtración (del flujo de una sola fase en medios porosos) nos llevan a la ecuación que describe la deshidratación mecánica de la torta. El Modelo tiene en cuenta los efectos capilares. La solución del Modelo depende de las condiciones iniciales y de frontera. Las curvas de permeabilidad relativa y presión capilar, así como el perfil de Saturación

obtenidos numéricamente cambian con el tiempo y son comparados con los perfiles obtenidos mediante los datos experimentales habiendo similitud en los perfiles.

Durante la deshidratación de la torta de filtración, se aprecia como en los primeros segundos la saturación desciende rápidamente, y luego tiende a un equilibrio, la reducción de la permeabilidad en esta fase es tan grande, que permite el desarrollo de fuertes fuerzas capilares que impiden la evacuación total de líquido en la torta (disminución de la saturación). La entrada de la fase gaseosa en el medio poroso saturado causa los efectos capilares, se podría esperar que al retirar la fase humectante se provoque una compresión del medio poroso, sin embargo Bear y White (2006) muestran que un medio poroso durante el drenado no se comprime. A bajas presiones capilares sólo los poros más grandes pueden ser desaturados, cuando aumenta la presión capilar se hace accesible el flujo por los poros más pequeños, y cuando la presión capilar tiende al infinito, la saturación tiende a la saturación irreductible. En el perfil de Saturación obtenido se aprecia que el proceso de deshidratación de la torta sólo implica 180 segundos a partir de que se deja de suministrar la suspensión a la centrífuga (que es a los 700 segundos) tendiendo al equilibrio. La principal caída en la saturación se da en aproximadamente 15 segundos.

Predecir el tiempo al cual ha dejado de formarse la torta de filtración, así como el tiempo de deshidratación permite tener un mejor entendimiento de los mecanismos que intervienen en esta operación. Con la información generada, se pueden tomar decisiones para mejorar dicha operación. Se puede en ciertos casos aumentar la calidad del sólido retenido y la disminución del contenido de humedad en el mismo, los cuales son factores de importancia en diversas ramas de la industria.

La filtración centrífuga es una operación compleja que no puede ser analizada simplemente en función de una variable, sin tener en cuenta la influencia de las demás. Para su comprensión se debe partir de los fundamentos teóricos establecidos, de manera que se puedan interrelacionar las variables que intervienen en el proceso. Cualquier alteración en las variables implicará un cambio en los parámetros de la operación.

El modelo matemático predice correctamente la evolución de la saturación. Sin embargo un conocimiento más exacto de la curva de presión capilar mejorará los resultados.

Aunque se han llevado a cabo estudios similares empleando como partículas de estudio al talco, la peculiaridad de este trabajo radica en la obtención de datos experimentales para llevar a cabo los balances de masa y deducir de esta manera, ecuaciones que permitan predecir el comportamiento del espesor de la torta filtrante durante el proceso. La solución de la ecuación que permite determinar la porosidad y la saturación toma en cuenta los datos experimentales, para luego poder compararla con la saturación obtenida mediante el modelo numérico. En trabajos ya realizados no se encontró curvas con datos experimentales que permitan llevar a cabo una comparación.

Finalmente, es importante resaltar el hecho que durante esta operación se evacúan aproximadamente 20 litros de líquido en sólo 700 segundos de operación.

Recomendaciones

Es importante mencionar algunos aspectos que en futuros trabajos permitirán mejorar los resultados.

1. Mejorar la técnica para determinar de manera precisa la evolución de la torta al interior del tambor centrífugo durante el proceso de centrifugación.
2. Medir la turbiedad y contenido de sólidos del líquido evacuado
3. Con respecto al procedimiento de medición experimental de la evolución del espesor del radio sólido, podría pensarse en colocar en la parte superior de la cesta, una cámara que grabe en continuo esa evolución. De esta forma podría analizarse la imagen y detectar el instante preciso en el cual inicia el proceso de de-saturación.
4. Sería muy apropiado pensar en el uso de sensores de posición para medir la evolución del radio sólido durante la operación.
5. Determinación del índice de distribución de poros experimentalmente para este caso en particular, el cual es un parámetro importante en la solución del modelo.
6. Implementar nuevas técnicas para la determinación de tamaño de poro y de presión capilar en tortas constituidas por partículas finas.
7. Con respecto al modelo matemático, es necesario estudiar a profundidad el establecimiento de las condiciones límites que involucren la presión real del sistema y el efecto de resistencia de la torta y el filtro.

Bibliografía

Ahmed K. Helmy, A.K., Ferreiro, E.A., Bussetti, S.G. (2005). The surface energy of talc, *Journal of Colloid and Interface Science* 285, pp: 314–317.

Anlauf, H. (2007). Recent developments in centrifuge technology, *Separation and Purification Technology*. pp: 242–246

Barr J.D., White L.R. (2006a). Centrifugal Drum Filtration: I. A Compression Rheology Model of Cake Formation, *AIChE Journal*, Vol. 52, No.2, pp. 545-556.

Bear, J., Whitaker, S. (2006). *Gas Transport in Porous Media*, pp: 1-13.

Bear, J., Buchlin J-M. (1991). *Modelling and Applications of Transport Phenomena in porous Media*.

Bender W. (1983). Das Auswaschen von Filterkuchen. *Chem-Ing-Tech.*; pp: 55: 823–829.

Brooks R.H., Corey A.T. (1964). Hydraulic properties of porous media, *Colorado State University Hydrology Paper N°3*, pp: 27.

Buscall R., White L.R. (1987). The Consolidation of Concentrated Suspensions. Part 1. The Theory of Sedimentation. *J. Chem. Soc., Faraday Trans.* 83, 873-891.

Ciesielczyk F., Krysztafkiewicz A., Jesionowski, T. (2007). Magnesium silicates – adsorbents of organic compounds, *Applied Surface Science* : pp 8435–8442

Couturier, S., Valat, M., Vaxelaire, J., Puiggali, J.R. (2007). Enhanced expression of filter cakes using a local thermal supply, *Separation and Purification Technology*, pp: 321–328.

Gerl, S., Korger, V., Stahl, W., Krumrey, T. (1994). Steam-pressure filtration—a process for combined mechanical/thermal dewatering of filter cake, *Aufbereitungs-technik*, pp: 563–572.

Hicyilmaz, C., Ulusoy, B., Yekeler, M. (2004). Effects of the shape properties of talc and quartz particles on the wettability based separation processes.

Hosten, C., San, O. (2002). Reassessment of correlations for the dewatering characteristics of filter cakes, *Minerals Engineering* 15 pp: 347–353.

Hwang K.J., Chu W.T., Lu W.M. (2001). A method to determine the cake properties in centrifugal dewatering. *Separation Science and Technology*, 36(12):2693-2706.

Iwata, M., Igami, H., Murase, T. (1991). Combined operation of electroosmotic dewatering and mechanical expression, *J. Chem. Eng. Jpn*, pp: 399–401.

Kuo-Jen Hwanga*, Ku-Haw Choua (2006). Effect of Cake Compression on the Performance of Centrifugal Dewatering Drying Technology: *An International Journal* Volume 24, Issue 10, pp 1263-1270

Kang W., Chung W-Y. (2009). Liquid water diffusivity of wood from the capillary pressure moisture relation. *The Japan Wood Research Society*, 55(1), 91-99.

Lee, D.J., Wang, C.H. (2000). Theories of cake filtration and consolidation and implications to sludge dewatering, *Vol. 34, No. 1*, pp. 1-20.

Mahmoud A., Fernandez, A., Chituchi, A., Arlabosse, A. (2008). Thermally assisted mechanical dewatering (TAMD) of suspensions of fine particles: Analysis of the influence of the operating conditions using the response surface methodology, *Applied Surface Science* 253, pp: 8435–8442.

Mayer, E. (2000). Cake filtration theory and practice, *Chemical Engineering Journal*, pp: 233–236.

McCabe W. L., Smith J. C. (1991), *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*, pp: 1023.

Mihoubi, D., Vaxelaireb, J., Zagrouba, F., Bellagi, A. (2003). Mechanical dewatering of suspensión. *Desalination* 158 pp: 259-265

Perré P., Turner (1999). Transpore: A generic heat and mass transfer computational model for understanding and visualizing the drying of porous media. *Drying Technology*, 17 (7 y 8), 1273- 1289.

Robatel, M., Borel, P. (1989). Centrifugation, *Généralitiés. Theorie* pp A 5 550-1, 3, 4.

Ruslim, F., Nirschl H., and Stahl W., Carvin P. (2009). The Influence of Temporal Cake Moisture Content on a Discontinuous Washing Process in the Centrifugal Field. *AIChE Journal*. Vol.55 No.3. PP 650-651.

Saveyn,H., Pauwels, G., Timmerman, R., Van der Meeren, P. (2005). Effect of polyelectrolyte conditioning on the enhanced dewatering of activated sludge by application of an electric field during the expression phase, *Water Res*, pp: 3012–3020.

Sharma K. R. (2010) *Transport Phenomena in Biomedical Engineering, Artificial organ design and development and tissue engineering.*

Smythe, M.C., Wakeman, R.J. (2000). The use of acoustic fields as a filtration and dewatering aid, *Ultrasonics*, pp: 657–661.

- Stadager C. (1995). Die Entfeuchtung von Filterkuchen durch die Kombination von Zentrifugal- und Gasdruckkraft. PhD Thesis, University of Karlsruhe (TH).
- Stolarski, M., Fuchs, B., Bogale Kassa, S., Eichholz, C., Nirschl, H. (2006). Magnetic field enhanced press-filtration, Chem. Eng. Sci, pp: 6395–6403.
- Sutherland, K. (2009). Filtration and separation technology: What's new with centrifuges?. Filtration-Separation: pp 30-31.
- Tarleton, E.S. (1992). The role of field-assisted techniques in solid/liquid separation, Filtr. Pp: 246–252.
- Tarleton E. S. (1997). Predicting the Performance of Pressure Filters. Filtration and separation.
- Tiller F.M., Hsyung N.B., Cong, D.Z. (1995). Role of porosity in filtration : XII. Filtration with sedimentation, AIChE Journal, 41, 5, pp. 1153-1164.
- Turner I, Perré P. (2004) Vacuum Drying of Wood with Radiative Heating (Comparison between Theory and Experiment). AIChE Journal, 50(1), 108-118.
- Truscott S., and Turner, I. (2005) A heterogeneous three-dimensional computational model for wood drying. Applied Mathematical Modelling 29(8),381-410.
- Vignote-Peña S., Martínez-Rojas I. (2006) Tecnología de la madera (Vol.1) MADRID
- Wakeman R.J., Vince A. (1986). Engineering Model for the Kinetics of Drainage for Centrifuge Cakes, Chem. Eng. Res. Des., pp. 104-108.
- Wakeman RJ, Attwood GJ. (1990). Simulations of dispersion phenomena in filter cake washing. Trans IChemE. Pp: 161–171.
- Wakeman R. (1998). Washing thin and nonuniform filter cakes: effects of wash liquor mal distribution. Filtration, pp: 185–190.
- Wakeman R.J., Tarleton E.S. (1999), Filtration. Equipment selection modeling and process simulation, Elsevier Editions.
- Wakeman, R. (2007). The influence of particle properties on filtration, Separation and Purification Technology : pp: 234–241.
- Whitaker S. (1986a). Flow in porous media I : A theoretical derivation of Darcy's law, Transport in porous media,1, 3-25.
- Whitaker S. (1986b). Flow in porous media II : The governing equations for immiscible two-phase flow, Transport in porous media, 1, 105-125.

Whitaker, S. (1977). Simultaneous heat, Mass and Momentum Transfer in Porous Media: a theory of Drying.

Presentaciones realizadas

01-04 de Mayo del 2012 XXXIII Encuentro Nacional y II Congreso Internacional de la AMIDIQ, San José del Cabo, BCS.

Estudio de la filtración centrífuga de una suspensión agua-talco.

Raymundo Alvarado Velasco¹, Sadoth Sandoval Torres².

^{1,2}Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca Instituto Politécnico Nacional. (CIIDIR-IPN, Unidad Oaxaca). Calle Hornos 1003. Santa Cruz Xoxocotlán. C.P. 71230. Oaxaca. México.

rjjealvarado@hotmail.com, sadothsan@yahoo.com

Introducción.

La filtración centrífuga se utiliza como técnica de separación de productos sólidos dispersos en una fase líquida, lo cual permite obtener sólidos lo más secos posibles gracias a la utilización de una presión elevada. Sin embargo, la torta formada presenta una resistencia al flujo del fluido debido a que la resistencia aumenta al comprimirse la torta, por lo cual, la separación mecánica de suspensiones con partículas finas puede ser difícil y prolongada. La evolución del espesor de la torta de filtración en una centrífuga fue evaluada mediante los balances generales de masa, para ello se caracterizó la torta de filtración. Los datos experimentales han sido obtenidos a partir de la filtración centrífuga de una suspensión agua talco con una fracción volumen de sólidos de 0.057, alimentación de la suspensión de 150 kg/hr y velocidad de rotación de 3000 rpm. El análisis de los datos se realizó en términos de saturación de la torta para delinear la tendencia de la desaturación. Las curvas obtenidas mediante las ecuaciones propuestas se comparan con datos tomados experimentalmente de la evolución del espesor de la torta.

Metodología.

Se plantean las ecuaciones para determinar la fracción másica de sólidos (f_{ms}), la fracción volumen de sólidos (f_{vs}), y el flujo másico de alimentación integrado; necesarios para determinar la masa de sólidos y de líquido contenidos en el tambor centrífugo. La formulación matemática propuesta para determinar el **espesor de la torta de filtración** se basa en un balance general de masa. Para esto, se determina el rango de anillo líquido $r_l(t)$, a partir del cual se podrá conocer el espesor de la torta filtrante. La ecuación es:

$$\frac{d}{dt}(\pi H(r_b^2 - r_l^2)) = Q_a - Q$$
 Sustituyendo los flujos de alimentación y filtrado en términos de flujos másicos (a partir de la ecuación anterior), tenemos:

$$r_l(t) = \sqrt{r_b^2 + \frac{1}{\pi H} \left(\frac{M(t)}{\rho_l} - \frac{\int_0^t m_a dt}{\rho_{sus}} \right)}$$

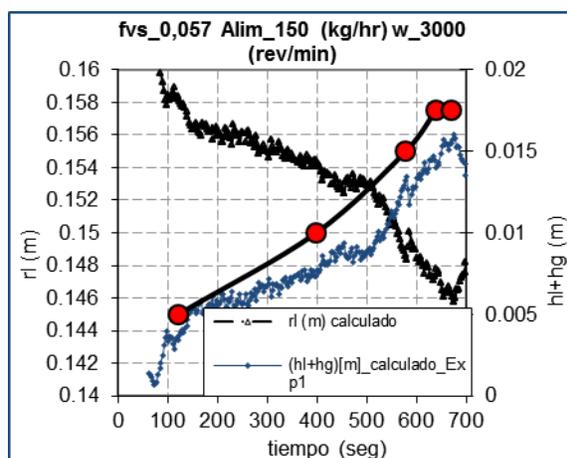
Donde $M(t)/\rho_l$ es el flujo másico de filtrado y $\int_0^t m_a dt / \rho_{sus}$ es el flujo másico de alimentación. El espesor total de la torta de filtración entonces estará dado por el espesor de la capa líquida más el espesor de la capa sólida.

Determinación de la Saturación. La ecuación para determinar la Saturación es:

$$S = 1 - \frac{m_{\text{filtrado}}}{\pi \cdot H \cdot (r_b^2 - r_s^2) \cdot \varepsilon \cdot \rho_l}$$

Donde r_b^2 es el radio interior de la centrífuga y r_s^2 es el radio sólido, el cual varía en función del tiempo.

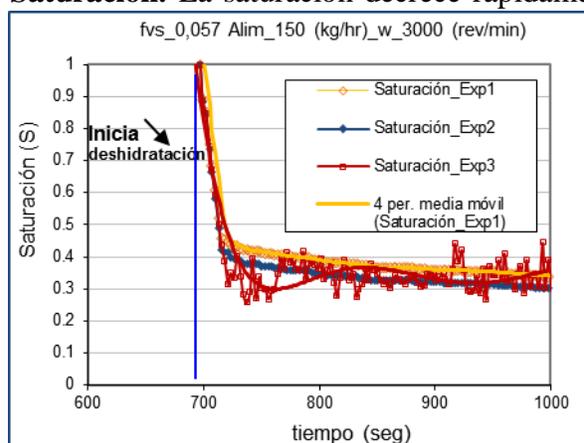
Resultados. Evolución del radio líquido y sólido calculado contra el radio sólido medido. El espesor de la torta alcanza un valor máximo de 0.017 m. En las gráficas se compara el espesor calculado con los datos tomados experimentalmente, para delinear la



Grafica 5.12 Comportamiento del radio líquido y radio sólido calculados contra el radio sólido medido con respecto al tiempo de la suspensión agua talco. Experimento1.

tendencia y corroborar la utilidad de las ecuaciones planteadas. La exactitud de estos datos es debidamente confirmada mediante un muestreo del crecimiento de la torta sólida utilizando un Stroboscopio, el cual aparenta detener el movimiento cíclico para así poder tomar las lecturas en el fondo del tambor. Los símbolos en color rojo representan los datos tomados experimentalmente y los símbolos en color azul los datos calculados. Se aprecia además el punto máximo de crecimiento de la torta, a partir del cual ésta empieza a comprimirse por acción de la fuerza centrífuga para retirar la humedad de la misma, en este punto ya no se alimenta suspensión a la centrífuga.

Saturación. La saturación decrece rápidamente al principio de la etapa de deshidratación



Grafica 5.17 Comportamiento de la saturación con respecto al tiempo de la suspensión agua talco. Experimentos 1, 2 y 3.

en los primeros segundos tendiendo luego a un equilibrio (0.32). De acuerdo con Ruslim et al (2009), quien realizó experimentos con arenas de sílice variando la velocidad de rotación, la saturación disminuye con el aumento del factor g. considera que la saturación en este régimen también conocida como “saturación remanente” es la parte de líquido que se une más fuerte dentro de la torta por capilaridad del líquido, la cual no se puede retirar de manera significativa por fuerzas mecánicas..

La permeabilidad disminuye haciendo más difícil la migración de humedad al cerrarse los poros por efecto de la presión centrífuga. La permeabilidad de la torta puede controlar la velocidad de deshidratación. Las predicciones para determinar el radio líquido y sólido, así como el espesor de la torta de filtración mediante las ecuaciones propuestas son consistentes con las obtenidas experimentalmente.

Referencias:

[9] Wakeman RJ. Washing thin and nonuniform filter cakes: effects of wash liquor mal distribution. Filtr Sep.1998:185–190.

- [10] Couturier, S., Valat, M., Vaxelaire, J., Puiggali, J.R. 2007, Enhanced expression of filter cakes using a local thermal supply, Separation and Purification Technology : pp 321–328.
- [11] Ruslim, F., Nirschl H., and Stahl W., Carvin P., 2009, The Influence of Temporal Cake Moisture Content on a Discontinuous Washing Process in the Centrifugal Field. AIChE Journal. Vol.55 No.3. PP 650-651.