

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA Y
METALÚRGICA



ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA
METALÚRGICA

**“DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE
FILTRACIÓN DE UNA PULPA DE CONCENTRADO DE
PLOMO EN UN FILTRO CERÁMICO MINIPILOTO”**

TESIS

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO METALURGISTA**

JORGE RIVERA, Alberto Martín
MAYTA BALLÓN, Orlando Luis

LIMA – PERÚ

2004

INDICE

	Página
RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	3
CAPITULO I	
GENERALIDADES	4
3.5. MARCO CONCEPTUAL PARA LOS SISTEMAS DE SEPARACIÓN SÓLIDO-LIQUIDO	4
4.3 OPERACIONES DE SEPARACIÓN SÓLIDO-LIQUIDO EN MINERIA	6
4.4 MECANISMOS DE LA SEPARACIÓN SÓLIDO-LIQUIDO	7
3.2 SELECCIÓN DE TÉCNICAS DE SEPARACIÓN SÓLIDO-LIQUIDO	11
3.3 EQUIPOS UTILIZADOS EN LA SEPARACIÓN SÓLIDO-LIQUIDO	11
CAPITULO II	
SISTEMAS PARTICULADOS	13
7.1. PROCESO DINAMICO EN UN SISTEMA PARTICULADO	13
2.1.1 Componente fluido	15
2.1.2 Presión de poros	16
2.1.3 Componente sólido	17
2.1.4 Esfuerzo sólido efectivo del sólido	18
2.1.5 Presión total	21
2.2. FUERZA DE INTERACCION EN EL EQUILIBRIO	22
8.3. DISCONTINUIDADES	23
5.4 PROCESO DINAMICO	23
CAPITULO III	
SFLUJO EN LECHO POROSO	25
6.2. PROCESO DINAMICO EN UN LECHO POROSO RIGIDO	25
8.5.1 Balances locales	26
8.5.2 Ecuación constitutiva de la fuerza resistiva	26
8.5.3 Ley de Darcy	27
8.5.4 Ley de Forcheimer	27
6.3. PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DE UN LECHO POROSO RIGIDO	28
8.5.1 Ecuaciones de Forcheimer y Darcy	31
3.2.2 Ecuaciones de Forcheimer y Darcy en términos de la altura piezométrica	32
6.4. MODELO CAPILAR DE UN LECHO POROSO RIGIDO	33
3.4. PROCESO DINAMICO EN UN LECHO POROSO RIGIDO	36

3.5.	FLUJO BIFÁSICO EN UN LECHO POROSO RIGIDO	37
3.5.1	Ecuaciones constitutivas de las presiones	40
3.5.2	Ecuaciones constitutivas de las fuerzas resistivas	43
3.5.3	Flujo a presión en medio poroso no-saturado	44
1.1.1	Saturación residual y saturación efectiva	46

CAPITULO IV FILTRACIÓN **49**

4.1.	DEFINICIÓN, EQUIPOS Y OPERACIÓN	49
4.1.1	Filtración de formación de queque	49
4.1.2	Filtración sin formación de queque	50
4.1.3	Filtración profunda	51
4.1.4	Variables de operación	52
4.2.	EQUIPOS PARA LA FILTRACIÓN	54
4.2.1	Filtros al vacío	55
	Filtros de tambor	55
	Filtros de discos	56
	Filtros de bandeja	58
	Filtros de banda horizontal	58
4.2.2	Equipos de filtración a presión	59
	Filtros prensa de placas verticales	60
	Filtros prensa de placas horizontales	64
	Filtros prensa de discos	70
4.2.3	Filtros hiperbáricos	71
4.3.	MEDIOS FILTRANTES	72
1.1.1	Telas	73

CAPITULO V TEORIA DE FILTRACIÓN **80**

5.1.	FORMACIÓN DEL QUEQUE	81
5.2.	FILTRACIÓN A PRESION CONSTANTE	84
5.2.1	Tiempo de filtración	85
5.2.2	Espesor del queque	87
5.3.	FILTRACIÓN A VOLUMEN CONSTANTE	90
5.3.1	Secado o soplado del queque	91
5.3.2	Tiempo de soplado	94
1.1.	FLUJO DE AIRE	95
5.5.	PARÁMETROS DE FILTRACIÓN Y SU MEDICION	96
5.5.1	Porosidad del queque	96
5.5.2	Permeabilidad del queque y resistencia específica del medio filtrante	98
5.5.3	Efecto del tamaño de partículas	99
1.1.1	Saturación residual y curva de capilaridad	100
1.1.2	Permeabilidad relativa	100

CAPITULO VI	
TECNOLOGÍA CERAMEC	102
6.1. TEORIA DE LA FILTRACIÓN	102
6.1.1 Ley de Darcy	102
6.1.2 Superando las tres resistencias	104
6.1.3 Influencia de la viscosidad en la filtración	105
a) Filtración a presión	106
b) Filtración al vacío	107
6.1.4 Permeabilidad del medio filtrante vs. el porcentaje de sólidos en la pulpa	107
6.1.5 Influencia del tamaño y forma de las partículas	110
6.1.6 El fenómeno capilar y su influencia en la filtración capilar	111
6.2. FILTRO CERAMEC	113
6.2.1 Descripción	113
1.0.0 Medio filtrante	114
2.0.0 Estructura de la placa cerámica	116
a) Fabricación de la placa cerámica	117
b) Placas cerámicas	118
c) Tipos de placas cerámicas	118
3.0.0 Etapas del proceso de filtración a presión	120
a) Formación del queque	120
b) Lavado del queque	121
c) Secado del queque	122
d) Descarga del queque	122
e) Retrolavado del queque	123
f) Limpieza automática periódica	123
CAPÍTULO VII	
DESARROLLO DE LAS PRUEBAS	124
1.1. PRUEBA DE FILTRACIÓN A PRESIÓN	124
1.2. PRUEBA DE FILTRACIÓN AL VACÍO	126
1.3. PRUEBA DE FILTRACIÓN LEAF TEST	127
ESQUEMA DE TRABAJO PARA LAS PRUEBAS DE FILTRACIÓN	129
CAPÍTULO VIII	
CÁLCULOS Y RESULTADOS	130
8.6. CARACTERIZACIÓN DE LA PULPA	130
8.6.1 Características físico-químicas de la pulpa concentrado Pb.	130
8.7. ANÁLISIS DE LEYES DEL CONCENTRADO DE PLOMO	130
8.8. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL CONCENTRADO DE PLOMO	130
1.0.0 Determinación de los tamaños promedio del concentrado de Plomo a partir del Análisis granulométrico	131

2.0.0	Análisis granulométrico del queque de las pruebas de filtración al vacío	132
3.0.0	partículas del queque de las pruebas de filtración al vacío a partir del Análisis granulométrico	132
8.9.	DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO PROMEDIO DE LAS PARTÍCULAS MEDIANTE EL EMPLEO DEL MICROSCOPIO	133
1.0.	PRUEBAS EXPERIMENTALES	137
1.0.0	Pruebas de filtración al vacío	137
1.0.0.0	Reportes de humedades y producción del queque	138
2.0.0.0	Pruebas de filtración al vacío variando la velocidad de giro de la placa cerámica con una pulpa a 80% de sólidos	144
b)	Prueba de filtración al vacío a una velocidad de giro de la placa cerámica de 1,5 RPM	145
c)	Prueba de filtración al vacío a una velocidad de giro de la placa cerámica de 2,5 RPM	146
d)	Prueba de filtración al vacío a una velocidad de giro de la placa cerámica de 4,6 RPM	146
2.0.0.0	Pruebas de filtración al vacío operando de mayor a menor presión con una pulpa a 50% de sólidos	148
3.0.0.0	Cálculo de la permeabilidad del medio filtrante	149
4.0.0.0	Cálculo de la permeabilidad del queque con distintos modelos	152
a)	Modelo de Fernando Concha	152
b)	Modelo de Ergun	153
c)	Modelo de Kozeny & Carman	154
d)	Modelo de Massarani	156
5.0.0.0	Resistencia específica del queque y medio filtrante	159
a)	Resistencia específica del queque y medio filtrante mediante la ecuación de Wakeman & Tarleton	159
6.0.0.0	Cálculo de espesores del queque a distintos porcentajes de sólidos	166
7.0.0	Pruebas de filtración a presión	171
8.0.0.0	Reportes de humedades y producción del queque	172
9.0.0.0	Permeabilidad del queque	179
a)	Modelo de Massarani	179
10.0.0.0	Cálculo de la resistencia específica del queque y medio filtrante	182
a)	Resistencia específica del queque y medio filtrante mediante la ecuación de Wakeman & Tarleton	182

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1. MARCO CONCEPTUAL PARA LOS SISTEMAS DE SEPARACIÓN SÓLIDO - LÍQUIDO

La separación sólido-líquido por métodos mecánicos forma parte de una gran área de técnicas de separación de fases sólidas, líquidas y gaseosas. Este tipo de separación aparece en un extenso número de procesos industriales en los diversos campos de la economía. A ella pertenece la eliminación de agua desde suspensiones en la industria, la recuperación de agua en procesos de la minería, la purificación de aguas domiciliarias, la eliminación de polvo, la desgasificación de líquidos y la eliminación de espumas, entre muchos otros procesos. Es pertinente poner los procesos de separación sólido-líquido dentro del contexto de las operaciones de separación de fases.

Las tablas 1.1 y 1.2 muestran procesos de separación de materiales sólido, líquido y gaseoso en fase dispersa y continua. En los procesos de separación sólido-líquido que nos interesan, el componente líquido siempre se encuentra en fase continua mientras que el componente sólido puede estar en forma dispersa o continua. En una suspensión que se alimenta a un espesador, el sólido está en forma dispersa en la etapa de sedimentación, pero se considera como fase continua en la etapa de consolidación. En el caso de filtración el sólido se encuentra disperso en la alimentación al filtro, pero en fase continua una vez que se formó el queque.

Dentro del contexto de la separación sólido-líquido, denominaremos **Sistema Particulado** a toda mezcla de materiales en que el sólido esté formado de partículas, estén estas en estado disperso o continuo. Cuando las partículas

CAPITULO 2

SISTEMAS PARTICULADOS

2.1 PROCESO DINÁMICO EN UN SISTEMA PARTICULADO

Consideremos un conjunto de partículas sólidas íntimamente mezcladas con un fluido bajo las siguientes suposiciones:

- (i) Las partículas sólidas son todas pequeñas, con respecto a la vasija que las contiene, y de la misma densidad, tamaño y forma.
- (ii) Las partículas individuales y el fluido son incompresibles.
- (iii) No hay transferencia de masa entre el sólido y el fluido.
- (iv) La única fuerza de cuerpo o fuerza externa es la gravedad.
- (v) Las partículas están contenidas en un vasija impermeable y con paredes sin fricción ante líquidos y sólidos.

En un sistema como el descrito las variables se reducen a una dimensión espacial z y el tiempo t . El movimiento de cada uno de los componentes de la mezcla puede ser descrito mediante los balances de masa y momentum lineal:

$$\text{Balance de masa del componente} \quad \frac{\partial}{\partial t}(\rho_\alpha \varphi_\alpha) + \nabla \cdot (\rho_\alpha \varphi_\alpha v_\alpha) = \bar{g}_\alpha \quad [2.1]$$

$$\text{Balance de masa de la mezcla} \quad \nabla \cdot q = \sum_{\alpha=1}^2 \frac{\bar{g}_\alpha}{\rho_\alpha} \quad [2.2]$$

$$\text{Balance de momentum lineal} \quad \rho_\alpha v_\alpha = \nabla \cdot T_\alpha + b_\alpha + m_\alpha \quad [2.3]$$

$$\text{Restricción} \quad \sum_{\alpha=1}^2 (m_\alpha + \bar{g}_\alpha v_\alpha) = 0 \quad [2.4]$$

En estas expresiones las variables de campo $\varphi_\alpha(r,t)$, $v_\alpha(r,t)$ y $T_\alpha(r,t)$ representan la fracción volumétrica, la velocidad y los esfuerzos del componente

α , $b_\alpha(r,t)$ es la fuerza ejercida por el medio ambiente sobre el componente α , $m_\alpha(r,t)$ es la fuerza de interacción entre componentes y $\bar{g}_\alpha(r,t)$ mide la velocidad con que los otros componentes entregan masa al componente α por unidad de volumen. El operador $\nabla \cdot$ representa la divergencia.

El primer término de la ecuación [2.1] es la velocidad de variación de la masa del componente α , el segundo es el flujo de masa del componente α y el tercero corresponde a la velocidad con que los otros componentes entregan masa al componente α . En la ecuación [2.2], el término de la izquierda representa la variación espacial de la velocidad volumétrica de la mezcla por unidad de masa. El primer término de la ecuación [2.3] es la aceleración del componente α , mientras que los términos de la derecha representan la fuerza total ejercida sobre el componente α (de contacto, exterior y la interacción). La restricción representada por [2.4] indica que el intercambio de masa y de fuerzas entre componentes no debe crear una fuerza neta en la mezcla y que el aumento de momentum de algún componente se compensa con la pérdida de otros.

En discontinuidades las expresiones [2.1] a [2.3] deben ser reemplazadas por las condiciones de salto:

$$\sigma[\varphi_\alpha] = [\varphi_\alpha v_\alpha \cdot e_l] \quad [2.5]$$

$$\sigma[\varphi_\alpha v_\alpha] = [\varphi_\alpha v_\alpha (v_\alpha \cdot e_l)] - [T_\alpha \cdot e_l] \quad [2.6]$$

En que $\sigma = v_s \cdot e_l$ es la velocidad de desplazamiento de la discontinuidad.

Denominemos $\alpha = 1 = s$ al componente sólido y $\alpha = 2 = f$ al componente fluido. Como, en virtud de las suposiciones (i) y (ii) la densidad de cada componente es constante, se puede dividir las tres ecuaciones por este término. Por otra parte, según (iii) no hay intercambio de masa entre componentes y por (iv) la fuerza de cuerpo es la gravedad. Finalmente, según (v) el movimiento es

uni-dimensional. Entonces, las ecuaciones [2.1] a [2.3] se reducen a los balances de:

$$\text{Masa del componente fluido} \quad \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \nabla \cdot (\varphi v_s) = 0 \quad [2.7]$$

$$\text{Balance de masa de la mezcla} \quad \nabla \cdot q = 0, \text{ con } q = \varphi v_s + (1 - \varphi)v_f \quad [2.8]$$

$$\text{Momentum lineal del sólido} \quad \rho_s \varphi v_s = \nabla \cdot T_s + \rho_s \varphi g + m \quad [2.9]$$

$$\text{Momentum lineal del fluido} \quad \rho_f (1 - \varphi)v_f = \nabla \cdot T_f + \rho_f (1 - \varphi)g - m \quad [2.10]$$

Donde r es el vector posición, $\varphi(r,t)$ es la fracción volumétrica de sólidos y $v_s(r,t)$, $v_f(r,t)$, $T_f(r,t)$, m y g son las velocidades, las fuerzas de contacto y de interacción entre componentes y el vector constante gravitacional g .

En la mayoría de los casos de interés práctico, no hay aceleración en el flujo, o esta es muy pequeña comparada con los otros términos de las ecuaciones [2.9] y [2.10]. Además, la fuerza de interacción m se puede descomponer en una fuerza estática, o de equilibrio, m_e y en una fuerza dinámica m_d , dependiente del movimiento. Con esta restricción y definiciones, las ecuaciones [2.9] y [2.10] pueden ser escritas en la forma:

Balance de momentum lineal del sólido:

$$0 = \nabla \cdot T_s + \rho_s \varphi g + m \quad [2.11]$$

Balance de momentum lineal del fluido:

$$0 = \nabla \cdot T_f + \rho_f (1 - \varphi) g - m \quad [2.12]$$

2.1.1 Componente fluido

Para todo tipo de fluido, los esfuerzos pueden ser separados en una parte de equilibrio y una parte dependiente del movimiento.

$$T_f = -p_f (1-\phi)I + T_f^E \quad [2.13]$$

Donde p_f es la presión parcial, o simplemente la presión, del componente fluido y T_f^E es el esfuerzo viscoso del fluido. Reemplazando en la ecuación [2.13] el balance de momentum lineal del fluido resulta:

$$\nabla p_f = \nabla \cdot T_f + \rho_f (1 - \phi) g - m_e - m_d \quad [2.14]$$

En flujos en sistemas particulados hay dos variables relacionadas con fricción. Una de ellas es el esfuerzo viscoso T_f^E que representa la fricción interna dentro del fluido y la otra la fuerza de interacción m , que corresponde a la fricción entre el fluido y el sólido. La experiencia demuestra (Marle, 1967; Whitaker, 1967, 1986) que la fricción fluido-fluido es mucho más pequeña que la fricción sólido-fluido y, por lo tanto puede ser despreciada en la ecuación [2.14] la que se reduce a:

$$\nabla p_f = \rho_f (1 - \phi) g - m_e - m_d \quad [2.15]$$

Despreciar el término viscoso en la ecuación constitutiva de los esfuerzos representados por la ecuación [2.13] equivale a considerar el fluido como un *fluido elástico*.

2.1.2 Presión de Poros

La presión p_f del fluido es una variable definida en superficies que abarca el componente fluido en su totalidad. Recordar que el componente sólido y el fluido son medios continuos superpuestos. Por esta razón, la presión del fluido no es mensurable experimentalmente, ya que solamente parte de la superficie y volumen del lecho poroso está ocupado por cada componente. La variable experimental asociada al flujo en lecho poroso es la presión de poros.

En mecánica de fluidos se ha demostrado que, para una mezcla sólido-fluido, la presión del fluido es continua en superficies permeables, esto es, en superficies que dejan pasar el fluido pero retienen el sólido. Por esta razón la presión en los poros de un lecho poroso, que recibe el nombre de *presión de poros* “ p ”, se puede medir mediante un manómetro. La figura 2.1 muestra la forma de medir la presión de poros:

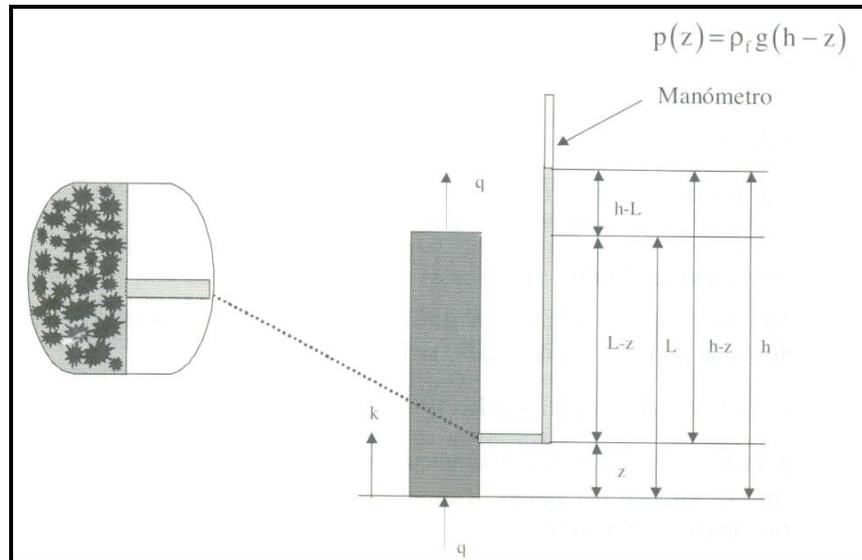


Figura 2.1 Medición de la presión de poros

Procesos que se desarrollan en sistemas particulados generalmente dependen de la presión en exceso sobre la presión hidrostática, ya que a esta presión de equilibrio el proceso llega a su fin. Es por ello que se introduce el concepto de *presión de poros en exceso* (sobre la hidrostática), o simplemente *presión en exceso*, “ p_e ”, definida por:

$$p_e(z) = p(z) - \rho_f g z (L - z) \quad [2.16]$$

2.1.3 Componente Sólido

En general, las propiedades del componente sólido de un medio particulado dependen fuertemente de la concentración de este componente. Es así como en

sistemas diluidos las partículas tienen mayor libertad de movimiento, mientras que en medios concentrados, estas son obstaculizadas en su movimiento por la presencia de otras partículas. La variable característica que separa estas dos formas de comportamiento es la concentración crítica φ_c , que se define como aquella concentración en que las partículas entran en contacto directo unas con otras. A concentraciones menores de la crítica en contacto directo unas con otras. A concentraciones menores de la crítica el medio se denomina **suspensión** y toda fuerza de contacto entre partículas se efectúa por intermedio del fluido. A concentraciones mayores de la crítica el medio recibe el nombre de **medio poroso, lecho poroso o sedimento** y los esfuerzos en el sólido puede ser transmitidos de partícula a partícula directamente. En estos casos se forma una especie de esqueleto que transmite el esfuerzo en el sólido.

Tomando en consideración estas características, supondremos que el esfuerzo en el sólido es constante para concentraciones menores que la crítica y se comporta como un sólido elástico e isotrópico para valores mayores. Por lo tanto, la componente del esfuerzo T_s puede ser descrito en términos de la presión del sólido p_s en la forma (Bustos et al 1999):

$$T_s = -p_s I \quad \text{con } p_s = \begin{cases} -\beta & \text{para } \varphi < \varphi_c \\ -(\beta + p_s(\varphi)) & \text{para } \varphi \geq \varphi_c \end{cases} \quad [2.17]$$

Donde φ_c se denomina concentración crítica. Así, el balance de momentum lineal del componente sólido se transforma en:

$$\nabla p_s = \rho_s \varphi g + m_e + m_d \quad [2.18]$$

2.1.4 Esfuerzo efectivo del sólido

Al igual que en el caso del fluido, la presión en el componente sólido no es una variable mensurable experimentalmente. Cuando una fuerza compresiva se aplica a un medio poroso a concentraciones mayores a la crítica, el esfuerzo total

es soportado inmediatamente por el fluido que llena los intersticios entre las partículas aumentando la presión de los poros. El gradiente de presión establecido en el agua que llena los poros y el exterior del sedimento, esto es la presión de poros en exceso, inicia el flujo de agua desde el sedimento hacia fuera de él. Este flujo es acompañado por una disminución de la presión de poros y un traspaso progresivo del esfuerzo al esqueleto sólido. Esto, a su vez, produce una deformación del medio poroso, la magnitud de la cual, depende de la relación constitutiva entre esfuerzo y deformación del material sólido y cuya velocidad está gobernado por su permeabilidad.

Se denomina *consolidación* del medio poroso al proceso transciende de traspaso del esfuerzo aplicado desde el agua que llena los poros del lecho poroso al esqueleto sólido produciendo su asentamiento. La figura mostrada a continuación es un análogo mecánico de la consolidación.

La figura 2.1 muestra las diversas longitudes que asume un resorte sometido a determinadas cargas. En la figura inferior cada resorte es sumergido en agua contenida en un cilindro con un pistón, sin fricción, y una llave.

- Figura 1: inicialmente el sistema está en equilibrio, con la llave abierta y sin peso.
- Figura 2: la llave se cierra y se coloca un peso de 20 kg. Como el agua es incompresible, la presión en el agua (presión de poros), soporta el peso total sin producir deformación en el resorte (esqueleto sólido).
- Figura 3: la llave se abre y el agua sometida a presión sale como un chorro con una velocidad controlada por el exceso de presión entre el interior y el exterior (presión de poros en exceso a la hidrostática) y por la fricción entre el agua y el tubo de salida.

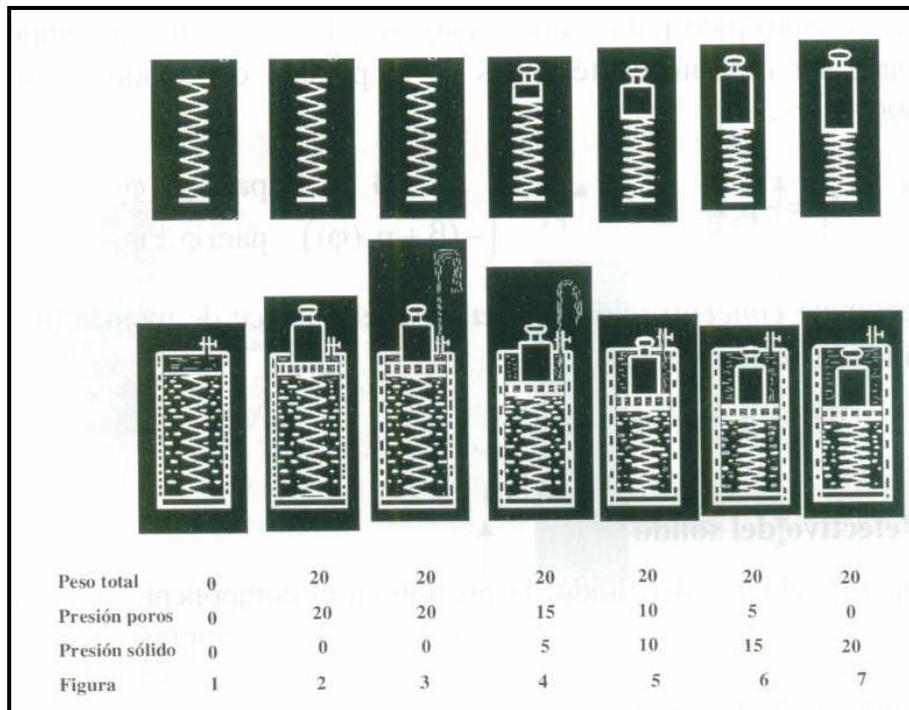


Figura 2.2 Representación mecánica de la consolidación

- Figura 4: a medida que el agua sale, el pistón baja en forma paulatina comprimiendo al resorte, el que comienza a asumir parte de la presión externa. Aquí asume 5 Kg. y su largo es el correspondiente a la figura superior sometido a 5kg. Entretanto el agua tiene una presión de 15 Kg.
- Figura 5: sale más agua, el pistón sigue bajando, el resorte asume 10 Kg. y el agua 10 Kg.
- Figura 6: continúa saliendo agua, el pistón baja, el resorte asume 15 Kg. y el agua solamente 5 Kg.
- Figura 7: el agua deja de salir del pistón. Este ha llegado a la longitud correspondiente al peso de 20 Kg., mientras que el agua no soporta ningún peso y tiene la presión estática.

El proceso completo, esquematizado por las figuras 1 a 7, ha transferido los 20 Kg. de carga del pistón desde el agua al resorte, esto es, desde la presión de poros al esfuerzo efectivo del sólido.

2.1.5 Presión total

La presión total p_t en un sistema particulado, al igual que en el esquema mecánico anterior, es la suma de la presión soportada por el fluido más la presión soportada por el sólido:

$$p_t = p_f + p_s \equiv p + \sigma_e \quad [2.19]$$

donde p_s y p_f son las presiones de los componentes sólido y fluido de la mezcla, considerados como medios continuos superpuestos ocupando el mismo volumen, y p y σ_e son la presión de poros y el esfuerzo efectivo del sólido definidos, el primero, sólo en el fluido contenido en los poros y el segundo sólo en el esqueleto sólido. La relación entre las variables teóricas y las experimentales se puede obtener al calcular la fuerza ejercida por el fluido en una superficie de área S :

$$\int_S p_f dS = \int_{S_f} p dS_f = \int_S p(\varepsilon_s dS) \quad [2.20]$$

Donde S_f es el área de una sección del lecho poroso conteniendo solamente fluido, S es, el área total del lecho poroso que incluye el sólido y el fluido y ε_s es la porosidad superficial. Si se supone que la porosidad superficial ε_s (fracción de la superficie de la sección del lecho poroso formada por fluido) es igual a la porosidad volumétrica ε (fracción de volumen del lecho poroso formado por fluido) $\varepsilon_f \equiv \varepsilon = 1 - \varphi$, la ecuación [2.20] se puede escribir en la forma:

$$\int_S p_f dS = \int_S p(1 - \varphi) dS \quad [2.21]$$

De donde resulta:

$$p_f = (1 - \varphi) p \quad [2.22]$$

y, usando la ecuación [2.19] se obtiene :

$$p_s = \varphi p + \sigma_e \quad [2.23]$$

Substituyendo las presiones del sólido y fluido por sus equivalentes experimentales desde las ecuaciones [2.22] y [2.23], los balances locales de momentum lineal [2.18] y [2.15] se obtiene:

$$\nabla (\varphi p) + \nabla \sigma_e = \rho_f \varphi g + m_e + m_d \quad [2.24]$$

$$\nabla ((1 - \varphi)p) = \rho_f (1 - \varphi) g - m_e - m_d \quad [2.25]$$

2.2 FUERZA DE INTERACCIÓN EN EL EQUILIBRIO

Consideremos el balance de fuerzas del componente fluido [2.25] en el equilibrio. En este caso sabemos que la fuerza de interacción dinámica $m_d = 0$ y que la presión de poros es la presión hidrostática $p(z) = \rho_f g (L - z)$, donde L es la altura de la columna de agua. Reemplazando en [2.25] resulta:

$$(1 - \varphi) \rho_f g - p \nabla \varphi \Big|_{\text{equilibrio}} = \rho_f (1 - \varphi) g - m_e$$

$$m_e = p \nabla \varphi \Big|_{\text{equilibrio}} \quad [2.26]$$

Suponiendo que la forma funcional de esta ecuación es siempre válida, podemos escribir:

$$m_e (r, t) = p \nabla \varphi \quad [2.27]$$

Reemplazando [2.27] en los balances de fuerza [2.25] y [2.24] se obtiene:

$$\nabla p = \rho_f g - \frac{m_d}{1 - \varphi} \quad [2.28]$$

$$\nabla \sigma_e = \Delta p \varphi g + \frac{m_d}{1 - \varphi} \quad [2.29]$$

En términos de la presión de poros en exceso p_e , la expresión para el fluido se reduce a:

$$\nabla p_e = - \frac{m_d}{1-\varphi} \quad [2.30]$$

Combinando [2.29] y [2.30] podemos sustituir [2.29] por:

$$\nabla p_e + \nabla \sigma_e = \Delta p \varphi g \quad [2.31]$$

2.3 DISCONTINUIDADES

Es bien conocido el hecho que suspensiones desarrollan discontinuidades. Por esta razón debemos establecer las ecuaciones de salto que reemplazan a las ecuaciones de campo locales en estas discontinuidades.

$$\sigma[\varphi] = [\varphi v_s \cdot e_I] \quad [2.32]$$

$$\sigma[\varphi v_s] = [\varphi v_s (v_s \cdot e_I)] - [(\varphi \{p_e + p_f g (L-z)\} + \sigma_e) e_I] \quad [2.33]$$

2.4 PROCESO DINÁMICO

Resumiendo los resultados anteriores, se puede decir que el flujo a través de un sistema particulado puede ser representado por las siguientes variables de campo: la fracción volumétrica de sólidos $\varphi(z,t)$, la velocidad del sólido y del fluido $v_s(z,t)$ y $v_f(z,t)$, la presión de poros en exceso $p_e(z,t)$, el esfuerzo efectivo del sólido $\sigma_e(z,t)$ y la fuerza dinámica de interacción entre el sólido y el fluido $m_d(z,t)$. Se dice que estas seis variables de campo constituyen un *proceso dinámico* si, en las regiones donde las variables son continuas, cumplen:

1.- Las ecuaciones locales de campo:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \nabla \cdot (\varphi v_s) = 0 \quad [2.34]$$

$$\nabla \cdot \mathbf{q} = 0, \text{ con } \mathbf{q} = \varphi \mathbf{v}_s + (1 - \varphi) \mathbf{v}_f \quad [2.35]$$

$$\nabla \sigma_e = \Delta \rho \varphi g + \frac{m_d}{1 - \varphi} \quad [2.36]$$

$$\nabla p_e = - \frac{m_d}{1 - \varphi} \quad [2.37]$$

2.- En las discontinuidades cumplen las condiciones de salto:

$$\sigma[\varphi] = [\varphi \mathbf{v}_s \cdot \mathbf{e}_I] \quad [2.38]$$

$$\sigma[\varphi \mathbf{v}_s] = [\varphi \mathbf{v}_s (\mathbf{v}_s \cdot \mathbf{e}_I)] - [(\varphi \{p_e + \rho_f g (L - z)\} + \sigma_e) \mathbf{e}_I] \quad [2.39]$$

3.- Se debe establecer ecuaciones constitutivas para σ_e y m_d para describir el comportamiento del material y completar el conjunto de seis ecuaciones que describen cuantitativamente el fenómeno:

$$m_d = m_d (\varphi, v_s, q,) \quad [2.40]$$

$$\sigma_e = \sigma_e (\varphi, v_s, q,) \quad [2.41]$$

CAPÍTULO 3

FLUJO EN LECHO POROSO

En 1856 Darcy propuso la primera correlación experimental para el flujo de un fluido viscoso incompresible a través de un medio poroso formado por partículas sólidas. Darcy estableció una relación lineal entre el flujo volumétrico por unidad de área y la caída de presión a través del lecho. Forcheimer (1901) observó que la correlación de Darcy no es universalmente válida, sino que su aplicabilidad se restringe a flujos lentos y propuso una extensión de esta relación para flujos mayores. Desde entonces, la regiones de flujo a bajas velocidades se denominan flujo de Darcy y las de alta velocidad, flujo de Forcheimer. Además del trabajo de estos dos pioneros del tema, han contribuido a él Kozeny (1927) y Carman (1937).

La mejor manera de analizar el flujo a través de medios porosos es dividirlo en dos partes dependiendo de si la matriz de partículas sólidas, a través de la cual escurre el fluido, es rígida o deformable.

3.1 PROCESO DINÁMICO EN UN LECHO POROSO RÍGIDO

Consideremos un conjunto de partículas sólidas a través del cual escurre un fluido bajo las siguientes suposiciones:

- (i) Las partículas sólidas son todas pequeñas, con respecto a la vasija que las contiene, y de la misma densidad, tamaño y forma.
- (ii) Las partículas individuales y el fluido son incompresibles.
- (iii) No hay transferencia de masa entre el sólido y el fluido.
- (iv) La única fuerza del cuerpo es la gravedad.
- (v) Las partículas están contenidas en una vasija impermeable y con paredes sin fricción ante líquidos y sólidos.

Agreguemos ahora que:

- (vi) Las partículas forman un esqueleto sólido rígido e inmóvil.

Una mezcla de partículas y fluido que obedece las restricciones establecidas por (i) a (vi) se denomina *lecho poroso incompresible*. Como en este caso el fluido es el único componente activo es conveniente usar la porosidad ε como variable en vez de la fracción volumétrica de sólidos φ : $\varepsilon = 1 - \varphi$. Por otra parte, la velocidad del sólido es nula $v_s = 0$.

3.1.1 Balances locales

El flujo a través de un lecho poroso rígido puede ser descrito mediante los balances de masa y momentum lineal para el fluido y mezcla. Tomando en cuenta las indicaciones anteriores, podemos escribir:

$$\text{Balance e masa del componente fluido } \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \nabla \bullet (\varepsilon v_f) = 0 \quad [3.1]$$

Balance de masa de la mezcla

$$\nabla \bullet q = 0, \text{ con } q = \varepsilon v_f \text{ y } v_s = 0 \quad [3.2]$$

$$\text{Balance de momentum lineal del fluido: } \nabla p_e = -\frac{m_d}{\varepsilon} \quad [3.3]$$

Donde r es el vector posición, $\varepsilon(r,t) = (1 - \varphi(r,t))$ es la porosidad del lecho, $v_f(r,t)$ es la velocidad del fluido, $q(r,t)$ es la velocidad volumétrica de la mezcla, en este caso, la velocidad espacial del fluido, $p_e(r,t)$ es la presión de poros en exceso y $m_d(r,t)$ es la fuerza resistiva que el fluido ejerce sobre el sólido.

3.1.2 Ecuación Constitutiva de la fuerza resistiva

Es razonable suponer que la fuerza resistiva, originada por el flujo del fluido a través del lecho poroso, es una función de la porosidad ε , de la velocidad relativa entre el sólido y del fluido v_r :

$$m_d = m_d (\varepsilon, v_r) \quad [3.4]$$

La función más general para m_d es de la forma:

$$m_d = -\alpha (\varepsilon, |v_r|) v_r \quad [3.5]$$

Donde el coeficiente de resistencia $\alpha (\varepsilon, |v_r|)$ puede ser expandido en serie de Taylor en la forma:

$$\alpha (\varepsilon, |v_r|) = \alpha_0 (\varepsilon) + \alpha_1 (\varepsilon) |v_r| + \alpha_2 (\varepsilon) |v_r|^2 + \dots \quad [3.6]$$

3.1.3 Ley de Darcy

Si la velocidad relativa sólido-fluido es pequeña, es posible conservar solamente el primer término de la expansión en serie del coeficiente de resistencia, dando como resultado:

$$m_d = -\alpha_0 (\varepsilon) v_r \quad [3.7]$$

La expresión [3.7] recibe el nombre de **Ley de Darcy** y corresponde a una relación lineal entre la fuerza hidrodinámica y la velocidad relativa entre el fluido y el esqueleto sólido. Sustituyendo la Ley de Darcy en el balance de momentum lineal del fluido [3.3] se obtiene:

$$\nabla p_e = \frac{\alpha(\varepsilon)}{\varepsilon} v_r \quad [3.8]$$

3.1.4 Ley de Forcheimer

Si la velocidad relativa sólido-fluido adquiere valores mayores, es necesario utilizar otro término de la expansión en serie del coeficiente de resistencia, entonces:

$$m_d = - (\alpha_0 (\varepsilon) + \alpha_1 (\varepsilon) |v_r|) v_r \quad [3.9]$$

Esta es la Ley de Forcheimer. Sustituyendo en el balance de momentum lineal del fluido obtenemos:

$$\nabla p_e = \left(\frac{\alpha_0 (\varepsilon)}{\varepsilon} + \frac{\alpha_1 (\varepsilon)}{\varepsilon} |v_r| \right) v_r \quad [3.10]$$

Esta ecuación representa el balance de fuerzas en el flujo a través de un lecho poroso a velocidades mayores.

3.2 PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DE UN LECHO POROSO RÍGIDO

Para relacionar los parámetros α_i con la geometría del lecho poroso, apliquemos la ecuación [3.10] al caso bien conocido de flujo horizontal en un lecho poroso de porosidad ε constante. Ver figura 3.1, donde $\nabla p_e = (\partial p_e / \partial z)k$ y $q = qk$, con $q > 0$.

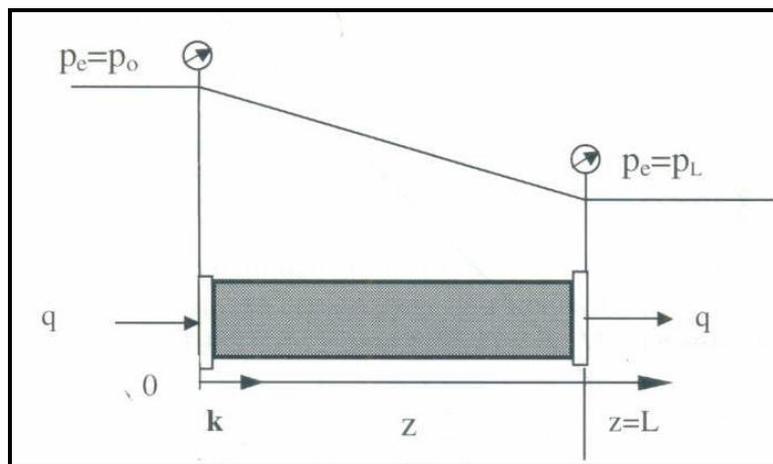


Figura 3.1 Medición de parámetros de resistencia en un lecho poroso rígido homogéneo horizontal (Tomado del Manual de Filtración y Separación, Fernando Concha, 1era Edición, 2001)

Como ε es constante, de la ecuación [3.1], se deduce que la velocidad del fluido es constante y la velocidad espacial, o velocidad de percolación, $q = \varepsilon v_f$ también es constante. Por otra parte, como $v_s = 0$, $v_r = -v_f$ y el balance de momentum lineal se puede escribir de [3.10] en la forma:

$$\frac{\partial p_e}{\partial z} = - \left(\frac{\alpha_0(\varepsilon)}{\varepsilon^2} + \frac{\alpha_1(\varepsilon)}{\varepsilon^3} q \right) q \quad [3.11]$$

Integrando esta ecuación con las siguientes condiciones de frontera: $p_e(z = 0) = p_0$ y $p_e(z = L) = p_L$, donde $\Delta p_e = p_0 - p_L$, obtenemos:

$$\int_{p_0}^{p_L} dp = - \left(\frac{\alpha_0(\varepsilon)}{\varepsilon^2} + \frac{\alpha_1(\varepsilon)}{\varepsilon^3} q \right) q \int_0^L dz$$

$$p_L - p_0 = - \Delta p_e = - \left(\frac{\alpha_0(\varepsilon)}{\varepsilon^2} + \frac{\alpha_1(\varepsilon)}{\varepsilon^3} q \right) q L \quad [3.12]$$

Dividiendo ambos miembro de [3.12] por qL , resulta:

$$\frac{1}{q} \frac{\Delta p_e}{L} = \frac{\alpha_0(\varepsilon)}{\varepsilon^2} + \frac{\alpha_1(\varepsilon)}{\varepsilon^3} q \quad [3.13]$$

Graficando la ecuación [3.13] con q como abscisa y $\Delta p_e / qL$ como ordenada se obtiene una línea recta en que el valor de la ordenada para $q = 0$ es $\alpha_0(\varepsilon) / \varepsilon^2$ y la pendiente de la recta es $\alpha_1(\varepsilon) / \varepsilon^3$.

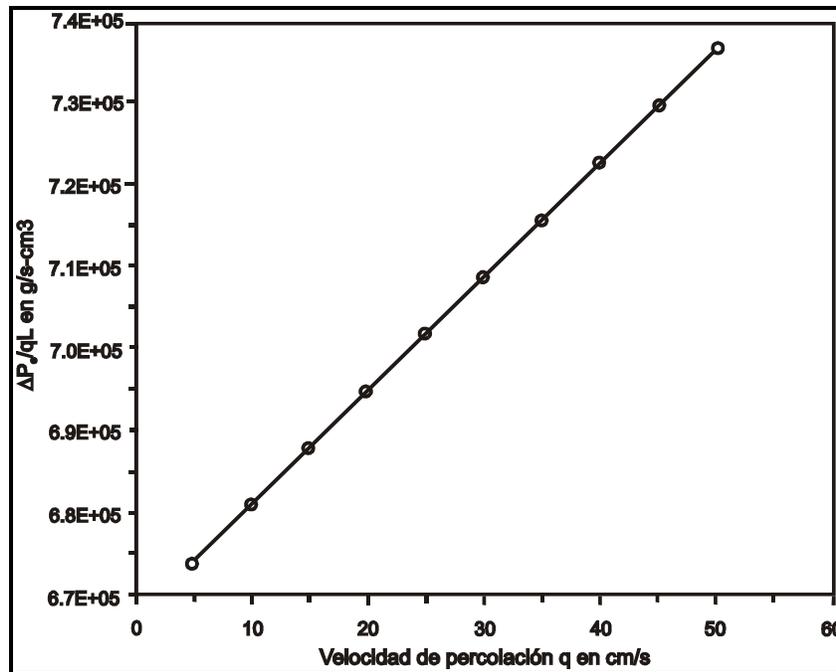


Figura 3.2 Mediciones de los parámetros geométricos de un lecho poroso rígido formado por partículas de cuarzo de 28/35 (Massarani 1984) (Tomado del Manual de Filtración y Separación, Fernando Concha, 1era Edición, 2001)

Se acostumbra a escribir ambos parámetros en términos del coeficiente de permeabilidad $k(\varepsilon)$ y propiedades del fluido. Según Massarani (1984):

$$\frac{\alpha_0(\varepsilon)}{\varepsilon^2} \equiv \frac{\mu}{k(\varepsilon)} \quad \text{y} \quad \frac{\alpha_1(\varepsilon)}{\varepsilon^3} \equiv \frac{p_f c(\varepsilon)}{\sqrt{k(\varepsilon)}} \quad [3.14]$$

Donde k es la permeabilidad, medida en Darcy ($1 \text{ Darcy} = 10^{-3} \text{ cm}^2$). Con estas definiciones, los parámetros de la recta en la figura 3.2 son: el valor de la ordenada para $q = 0$ es $\mu / k(\varepsilon)$ y la pendiente de la recta es $p_f c(\varepsilon) / \sqrt{k(\varepsilon)}$. Tanto k como c son funciones de ε . El orden de magnitud de $k(\varepsilon)$ y $c(\varepsilon)$ pueden observarse en la tabla 3.1.

Tabla N° 3.1 Orden de magnitud de $k(\varepsilon)$ y c (Massarani 1984) (Tomado del Manual de Filtración y Separación, Fernando Concha, 1era Edición, 2001)

Medio	ε	$k(\varepsilon)$ [cm ²]	$c(\varepsilon)$ [-]
Arenisca de petróleo	0,03	1.0×10^{-12}	3×10^5
Placa metálica porosa	0,26	1.0×10^{-7}	15
Concentrado de cobre	0,43	5.0×10^{-9}	
Arena de cuarzo de 28/35 mallas	0,42	1.5×10^{-6}	1,7
Balotines de vidrio de 6mm	0,40	4.0×10^{-4}	0,49

Con las definiciones [3.14], la ecuación [3.11] se puede escribir en la forma más conocida:

$$\frac{\partial p_e}{\partial z} = - \left(\frac{\mu}{k(\varepsilon)} + \frac{p_f c(\varepsilon)}{\sqrt{k(\varepsilon)}} |q| \right) q \quad [3.15]$$

Integrando esta expresión se obtiene:

$$\frac{\Delta p_e}{L} = \frac{\mu}{k(\varepsilon)} q + \frac{p_f c(\varepsilon)}{\sqrt{k(\varepsilon)}} q^2 \quad [3.16]$$

Para describir la funcionalidad de la permeabilidad k y del parámetro c con la porosidad se ha propuesto varias ecuaciones, entre ellas las más conocidas son las de Kozeny (1927) y Carman (1937), de Ergun (1952) y de Massarani (1989).

3.2.1. Ecuaciones de Forcheimer y de Darcy

Si sustituimos los valores de α_0 y α_1 desde [3.14] en [3.9] y en [3.11] se obtiene:

$$m_d = \frac{\mu \varepsilon}{k(\varepsilon)} \left(1 + \frac{p_f \sqrt{k(\varepsilon)} c(\varepsilon) |q|}{\mu} \right) q \quad [3.17]$$

$$\nabla p_e = \frac{\mu}{k(\varepsilon)} \left(1 + \frac{p_f c(\varepsilon) \sqrt{k(\varepsilon)} |q|}{\mu} \right) q \quad [3.18]$$

Esta última expresión se denomina ecuación de Forcheimer.

El segundo término de los paréntesis de [3.17] y [3.18] tiene la forma de un número de Reynolds. Definiendo el *número de Reynolds de percolación* Re^* :

$$Re^* = \frac{p_f c(\varepsilon) \sqrt{k(\varepsilon)} |q|}{\mu} \quad [3.19]$$

Podemos escribir ambas ecuaciones en la forma:

$$m_d = \frac{\mu \varepsilon}{k(\varepsilon)} (1 + Re^*) q \quad [3.20]$$

$$\nabla p_e = -\frac{\mu}{k(\varepsilon)} (1 + Re^*) q \quad [3.21]$$

El número de Reynolds de percolación mide la desviación de la fuerza resistiva de la ley de Darcy. Efectivamente, si $Re^* \ll 1$, la ecuación [3.20] se transforma en la ley de Darcy:

$$m_d = \frac{\mu \varepsilon}{k(\varepsilon)} q \quad [3.22]$$

y [3.21] se reduce a la ecuación de Darcy:

$$\nabla p_e = -\frac{\mu}{k(\varepsilon)} q \quad [3.23]$$

3.2.2. Ecuaciones de Forcheimer y de Darcy en términos de altura piezométrica

En ocasiones es conveniente expresar las ecuaciones de Darcy o Forcheimer en términos de la altura piezométrica en vez de la presión de poros en

exceso. Como $p_e = \rho_f g (h - h_0)$, donde $\rho_f g h_0$ es la presión hidrostática, reemplazado en [3.21] resulta:

$$\nabla h = -\frac{\mu}{\rho_f g K(\varepsilon)} (1 + \text{Re}^*) q$$

Definiendo la conductividad hidráulica $K(\varepsilon)$, medida en cm/s, mediante la expresión:

$$K(\varepsilon) = \frac{\rho_f g K(\varepsilon)}{\mu} \quad [3.24]$$

Las ecuaciones de Forcheimer y Darcy se transforman en:

$$\nabla h = -\frac{1}{K(\varepsilon)} (1 + \text{Re}^*) q \quad [3.25]$$

$$\nabla h = -\frac{1}{K(\varepsilon)} q \quad [3.26]$$

3.3. MODELO CAPILAR DE UN LECHO POROSO RÍGIDO

El modelo capilar de un medio poroso rígido, también conocido como modelo de Blake-Kozeny o Carman-Kozeny, se basa en considerar los poros del lecho como un conjunto de tubos capilares de sección transversal arbitraria. Se supone que el fluido sigue la ley de Poiseuille. Para este flujo el gradiente de presión está dado en términos de la velocidad promedio en los tubos \bar{v} por:

$$\nabla p_e = -\frac{\mu \beta}{R_h^2} \bar{v}$$

La velocidad promedio en los tubos \bar{v} corresponde a la velocidad intersticial v_f , por lo que $\bar{v} = q / \varepsilon$ y la ecuación se transforma en:

$$\nabla p_e = - \frac{\mu \beta}{\varepsilon R_h^2} q \quad [3.27]$$

Donde R_h , es el radio hidráulico, definido como el área de sólido mojada por el fluido, dividida por el perímetro del tubo sólido mojado y β es la tortuosidad, un factor adimensional que depende de la sección transversal del ducto en el atado de tubos. Entonces, para un lecho de partículas:

$$\begin{aligned} R_h &= \frac{\text{área mojada}}{\text{perímetro mojado}} \times \frac{L}{L} \\ &= \frac{\text{volumen de poros} / \text{volumen del lecho}}{\text{superficie de partículas} / \text{volumen del lecho}} \end{aligned}$$

$$R_h = \frac{\varepsilon}{S_p/V} = \frac{\varepsilon}{S_p(1-\varepsilon)/V(1-\varepsilon)} = \frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon)S_p/V_p} = \frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon)\bar{S}}$$

Donde \bar{S} es la superficie específica por unidad de volumen de lecho. Reemplazando esta expresión en la ecuación [3.27] obtenemos:

$$\nabla p_e = - \frac{\mu(1-\varepsilon)^2 \beta \bar{S}^2}{\varepsilon^3} q$$

De aquí resulta que la permeabilidad queda expresada por:

$$k(\varepsilon) = \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2 \beta \bar{S}^2} \quad [3.28]$$

Si las partículas fueran esféricas, entonces la superficie específica quedaría expresada por $\bar{S} = 6/d_p$ y la permeabilidad por:

$$k(\varepsilon) = \frac{\varepsilon^2 d_p^2}{36(1-\varepsilon)^2 \beta} \quad [3.29]$$

Donde d_p es el diámetro de la esfera. Para partículas no esféricas, la expresión sigue siendo válida, pero ahora d_p es el diámetro de permeabilidad del medio poroso, esto es, el diámetro de partículas esféricas que tienen la misma permeabilidad que el medio poroso.

Por otra parte, cuando las partículas no son esféricas se puede usar el concepto de esfericidad ψ . Este se define como la razón entre la superficie de una partícula y la superficie de su esfera equivalente, esto es, de aquella esfera que tiene el mismo volumen de la partícula. Entonces:

$$\psi = \frac{S_e}{S_p} = \frac{S_e}{S_p} \frac{V_p}{V_e} = \frac{S_e/V_e}{S_p/V_p} = \frac{6/d_e}{\bar{S}}$$

Por lo tanto:
$$\bar{S} = \frac{6}{\psi d_e} \quad [3.30]$$

Donde d_e es el diámetro equivalente volumétrico, es decir, el diámetro de una esfera que tiene el mismo volumen que la partícula. En este caso, la permeabilidad resulta ser:

$$k(\varepsilon) = \frac{\varepsilon^3 d_e^2 \psi^2}{36(1-\varepsilon)^2 \beta} \quad [3.31]$$

También es posible utilizar el diámetro volumétrico-superficial, o diámetro de permeabilidad, para describir la superficie específica \bar{S} de un medio poroso. Según la definición:

$$\bar{S} = \frac{\alpha_s \int x^2 f(x) dx}{\alpha_v \int x^3 f(x) dx} = \frac{\alpha_s \int (1/x) f(x) dx}{\alpha_v \int f(x) dx} = \frac{\alpha_s \int f(x)}{\alpha_v \int x} dx = \frac{\alpha_s}{\alpha_v} \frac{1}{x_{12}} \quad [3.32]$$

\bar{x}_{12} es el tamaño de permeabilidad ya que, junto a los factores de forma superficial α_s y volumétrico α_v permiten calcular la superficie específica \bar{S} . Sustituyendo [3.32] en [3.28] obtenemos (Concha 1973):

$$k(\varepsilon) = \frac{\varepsilon^3 \bar{x}_{12}^2}{\beta(1-\varepsilon)^2 (\alpha_s / \alpha_v)^2} \quad [3.33]$$

Tabla 3.2 Valores del parámetro β (Tomado del Manual de Filtración y Separación, Fernando Concha, 1era Edición, 2001)

Tipo de conducto	β	Referencia
Circular	2	Becker (1963)
Elíptico	2.00 - 2.46	Becker (1963)
Triangular equilátero	1.67	Becker (1963)
Lecho de partículas con $0.3 \leq \varepsilon_0 \leq 0.5$	5	Coulson y Richardson (1968)

Otros modelos propuestos son los de Ergun (1952) y de Massarani (1989).

Modelo de Ergun para $0.35 < \varepsilon < 0.45$: $k(\varepsilon) = \frac{\varepsilon^3 (d_e \psi)^2}{170(1-\varepsilon)^2} \quad [3.34]$

Modelo de Ergun para $0.35 < \varepsilon < 0.45$: $c(\varepsilon) = \frac{0.143}{\varepsilon^{3/2}} \quad [3.35]$

Modelo de Massarani (1989):

$$c(\varepsilon) = \frac{1}{\varepsilon^{3/2}} \left\{ 0.13 \left(\frac{k_0}{k} \right)^{0.37} + 0.10 \left(\frac{k_0}{k} \right)^{0.01} \right\}^{0.98}, \quad k_0 = 10^{-6} [\text{cm}^2] \quad [3.36]$$

3.4 PROCESO DINÁMICO EN UN LECHO POROSO RÍGIDO

El escurrimiento estacionario de un fluido newtoniano en un lecho poroso rígido queda representado por las siguientes variables de campo $\varepsilon(r,t)$, $q(r,t)$ y $p_e(r,t)$. Estas variables constituyen un proceso dinámico si cumplen las siguientes ecuaciones:

$$\varepsilon(r,t) = \varepsilon_0 \quad \text{y} \quad q(r,t) = q_0 \quad [3.37]$$

$$\nabla p_e = - \frac{\mu}{k(\varepsilon_0)} (1 + \text{Re}^*) q_0 \quad [3.38]$$

Donde $\text{Re}^* = \rho_f c(\varepsilon_0) \sqrt{k(\varepsilon_0)} |q_0| / \mu$ y donde ε_0 , $k(\varepsilon_0)$ y $c(\varepsilon_0)$ son la porosidad, permeabilidad y parámetro de resistencia del lecho poroso, mientras que ρ_f y μ son la densidad y viscosidad del fluido y p_e es la presión de poros en exceso a la hidrostática.

Si el escurrimiento es lento, la ecuación [3.38] se reduce a:

$$\nabla p_e = - \frac{\mu}{k(\varepsilon_0)} q_0 \quad [3.39]$$

3.5 FLUJO BIFÁSICO EN UN LECHO POROSO RÍGIDO

El flujo conjunto de un líquido y un gas en un medio poroso es de gran importancia en muchos procesos, tales como la filtración, el escurrimiento en suelos y la recuperación de petróleo. En esta sección analizaremos el escurrimiento de agua y aire en un medio poroso rígido, tal como se presenta en la fase de deshumidificación o soplado en el proceso de filtración. Los primeros trabajos en esta línea fueron presentados en el ámbito del escurrimiento de agua en suelos no-saturados por Raats y Klute (1968).

Consideremos un lecho poroso rígido por el cual escurre una mezcla de agua y aire. Las seis suposiciones del inicio de este capítulo siguen siendo válidas. La porosidad del sólido es ε y definiremos como "s" la fracción de volumen de poros del sólido que contiene agua y la denominaremos **saturación** . Por lo tanto, la fracción de aire contenida en los poros será (1-s). Entonces, las fracciones de agua y aire contenidas en la mezcla sólido-fluido serán εs y $\varepsilon(1-s)$. Al igual que antes, el sólido se considerará inmóvil y $v_s = 0$.

Los balances locales generales para cada componente son:

$$\text{Balance de masa: } \frac{\partial \bar{p}_\alpha}{\partial t} + \nabla \bullet (\bar{p}_\alpha v_\alpha) = 0 \quad [3.40]$$

Donde \bar{p}_α y v_α son la densidad de masa y velocidad del componente α del medio poroso. Para una mezcla aire líquido podemos escribir:

$$\text{Para el líquido: } \bar{p}_\alpha = \rho_l \varepsilon s$$

$$\text{Para el aire: } \bar{p}_\alpha = \rho_a \varepsilon (1 - s)$$

$$\text{Para el sólido: } \bar{p}_\alpha = \rho_s (1 - \varepsilon)$$

Con estas definiciones, los balances de masa para los componentes resultan ser:

$$\text{Para el agua: } \frac{\partial}{\partial t} (\rho_l \varepsilon s) + \nabla \bullet (\rho_l \varepsilon s v_l) = 0 \quad [3.41]$$

$$\text{Para el aire: } \frac{\partial}{\partial t} (\rho_a \varepsilon (1 - s)) + \nabla \bullet (\rho_a \varepsilon (1 - s) v_a) = 0 \quad [3.42]$$

Como el medio poroso es rígido, no hay movimiento del sólido.

Sumando las expresiones [3.41] y [3.42] se obtiene la ecuación de continuidad de la mezcla de fluidos, agua y aire:

$$\frac{\partial p_f}{\partial t} + \nabla \bullet (p v_f) = 0$$

Con p_f y v_f definidos por:

$$p_f = \rho_l \varepsilon s + \rho_a \varepsilon (1 - s) \quad [3.43]$$

$$p_f v_f = \rho_l q_l + \rho_a q_a \quad [3.44]$$

Donde

$$q_l = \varepsilon s v_l \quad \text{y} \quad q_a = \varepsilon (1 - s) v_a \quad [3.45]$$

Balance de momentum lineal:

$$\bar{p}_\alpha \dot{v}_\alpha = \nabla \cdot T_\alpha + b_\alpha + m_\alpha \quad [3.46]$$

Donde \dot{v}_α , T_α , b_α , y m_α son la aceleración, los esfuerzos, la fuerza de cuerpo y la fuerza de interacción para cada componente. Para la mezcla de un líquido y aire en el medio poroso tenemos:

$$\text{Para el agua:} \quad \rho_\ell \varepsilon \dot{v}_l = \nabla \cdot T_\ell + \rho_\ell \varepsilon g - m_\ell \quad [3.47]$$

$$\text{Para el aire:} \quad \rho_a \varepsilon (1-s) \dot{v}_a = \nabla \cdot T_a + \rho_a \varepsilon (1-s) g - m_a \quad [3.48]$$

Donde m_ℓ y m_a son las fuerzas de interacción entre componentes.

Consideremos flujos lentos en estado estacionario, tal que los términos de aceleración sean despreciables. Además, tomaremos en cuenta el hecho que la fricción entre fluidos es mucho menor que aquella de interacción entre éstos y el sólido y, por ello, despreciaremos los esfuerzos extra del líquido y del aire. Con estas simplificaciones las ecuaciones de momentum se reducen a:

$$\nabla p_\ell = p_\ell \varepsilon g - m_\ell \quad [3.49]$$

$$\nabla p_a = p_a \varepsilon (1-s) g - m_a \quad [3.50]$$

Sumando estas dos expresiones resulta la ecuación tradicional de un fluido, para una mezcla sólido-fluido:

$$\nabla p_f = p_f g - m \quad [3.51]$$

Donde $\rho_f = p_\ell \varepsilon + \rho_a \varepsilon (1-s)$ es la densidad de la mezcla de fluidos, $m = -(m_\ell + m_a)$, es la fuerza que la mezcla de fluidos ejerce sobre el sólido y $p_f = p_a + p_\ell$ es la presión total ejercida por los fluidos.

3.5.1 Ecuaciones constitutivas de las presiones

Las presiones p_ℓ y p_α son variables asociadas a cada componente considerado como medio continuo que ocupa todo el espacio de la mezcla. Por esta razón ellas no son variables mensurables experimentalmente. Si denominados p a la presión de poros, esto es, la presión del líquido en los poros y p_g la presión mensurable del aire, ambos valores experimentales, se debe cumplir que:

$$p_\ell = \varepsilon s p \quad \text{y} \quad p_\alpha = \varepsilon (1 - s) p_g \quad [3.52]$$

Cuando se encuentran en un tubo capilar tres fases, como el caso de un líquido, que moja al sólido, y un gas, que no lo moja, se genera una fuerza en la frontera de las tres fases, denominada **fuerza capilar**, que depende de las tensiones interfaciales de los tres componentes.

En general, la diferencia de presión entre la fase gaseosa y la fase líquida se denomina **presión capilar** y depende de la tensión superficial del líquido y del radio de curvatura del menisco. La presión capilar está dada por la ecuación de Young-Laplace (Schubert 1982).

$$p_c = p_g - p = \gamma_{\ell g} \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad [3.53]$$

Donde $\gamma_{\ell g}$ y p_ℓ son la tensión superficial y la densidad del líquido, respectivamente y r_1 y r_2 son los radios de curvatura del menisco.

Como un ejemplo, coloquemos los extremos de cuatro tubos capilares de diferente diámetro interior en un líquido que moja la superficie del sólido, el líquido se eleva en los capilares a altura diferentes, como se indica en la figura 3.3a.

Para un capilar, el radio de curvatura es $d/2$ y la ecuación [3.53] se reduce a $p_c = 4\gamma_{lg} (1/d) \cos \theta$, donde θ es el ángulo de contacto. La magnitud de la fuerza capilar será $f_c = p_c/(\pi d^2/4)$, esto es, $f_c = \pi d \gamma \cos \theta$. La altura a la que asciende el líquido depende del balance entre la fuerza capilar y la fuerza gravitacional, con $f_g = p_l \pi d^2 h$ la magnitud de esta fuerza, resultando en $h = \gamma_{lg} \cos \theta / p_l d$. Es así como el líquido sube más alto en los capilares más finos.

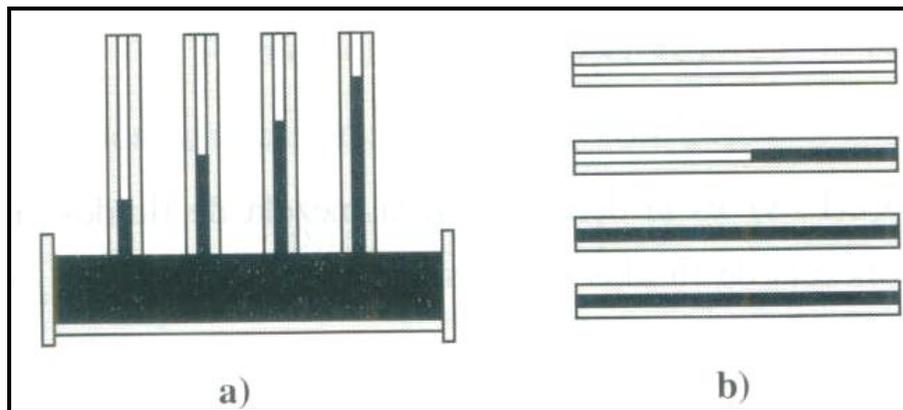


Figura 3.3 Capilaridad: a) Tubos capilares verticales, b) Tubos capilares horizontales (Tomado del Manual de Filtración y Separación, Fernando Concha, 1era Edición, 2001)

Si los tubos capilares se colocan en posición horizontal sumergidos totalmente en el líquido y se les aplica un gradiente de presión Δp , el líquido escurrirá por cada tubo con un flujo volumétrico Q de acuerdo a la ecuación de Poiseuille, $\Delta p = 8 \mu L Q / \pi R^4$. Si los tubos llenos de líquido se alzan fuera del líquido y se los coloca en posición horizontal en una corriente de aire bajo un gradiente de presión $\Delta p/L$, como se indica en la figura 3.3b, se establecerá un balance entre la fuerza del aire $f_{aire} = \Delta p \pi d^2 / 4L$ y las fuerzas capilares $f_{capilar} = \pi d \gamma \cos \theta$. Si la fuerza del aire es mayor que la capilar, el aire desplazará al líquido, como en los tubos 1 a 2, pero cuando las fuerzas estén equilibradas no habrá escurrimiento, ver tubos 3 y 4. El diámetro del capilar cuando esto ocurre se obtiene $d = 4L \gamma \cos \theta / \Delta p$. Aumentando la presión, el diámetro del tubo que permanecerá saturado disminuye.

Volviendo ahora a un medio poroso, consideremos el modelo capilar, en el cual se supone que el medio está constituido por un conjunto muy grande de capilares de diversos diámetros distribuidos al azar. Si el medio poroso está saturado de un líquido mojante y sometido a un gradiente de presión, todo el líquido fluiría por los capilares de acuerdo a su diámetro y a las propiedades del líquido. Si el medio saturado es sometido ahora a una corriente de aire, el aire desplazaría el líquido de los capilares más grandes. Existiría un tamaño de tubo en el que se alcanzaría el equilibrio y el líquido permanecería estancado debido a las fuerzas capilares. Por los capilares más pequeños no habría desplazamiento los más pequeños permanecen saturados de líquido. Para un gradiente de presión determinado, habrá una cantidad de líquido mojante retenido en los tubos capilares, que dependerá del gradiente de presión del aire, del tamaño de los capilares y de la tensión interfacial. Esta cantidad de líquido constituye la saturación residual designada por s_{∞} . Para un medio poroso no saturado, la presión capilar es función de la saturación, además de las variables antes mencionadas. La figura 3.4 muestra una curva típica de presión capilar versus saturación.

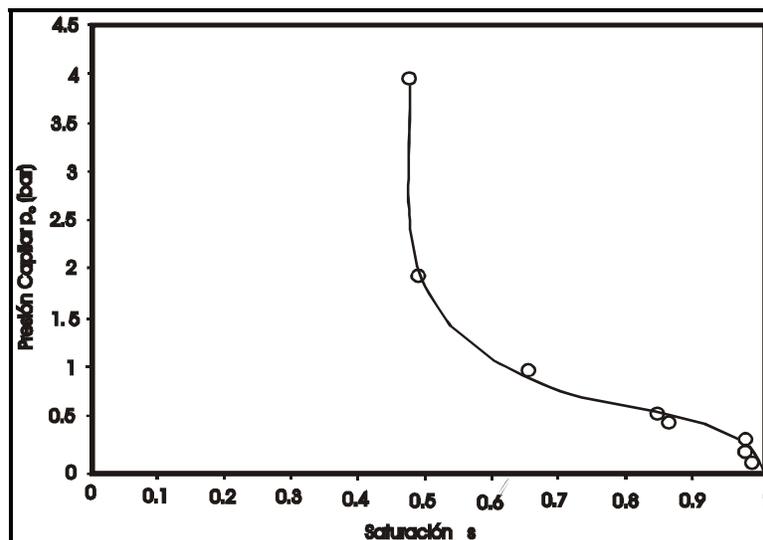


Figura 3.4 Presión capilar versus saturación para un concentrado de cobre. Los círculos son datos experimentales de un concentrado de cobre y la línea la ecuación [3.54] (Tomado del Manual de Filtración y Separación, Fernando Concha, 1era Edición, 2001)

Esta curva se puede representar mediante la siguiente ecuación:

$$p_c = p_{50} \left(-\frac{s_\infty - s}{1 - s} \right)^{1/\lambda} \quad [3.54]$$

Donde p_{50} , s_∞ y λ son constantes. Para detalles ver ecuaciones [3.71] a [3.73].

3.5.2 Ecuaciones constitutivas de las fuerzas resistivas

Es sabido que las fuerzas de interacción entre un sólido y un fluido son mucho mayores que las fuerzas entre fluidos. Este hecho permite suponer que las ecuaciones constitutivas para las fuerzas resistivas son función de la porosidad, de la saturación y, de las velocidades relativas entre los componentes fluidos y el sólido. Como el sólido está inmóvil, la velocidad relativa entre los fluidos y el sólido será las de los fluidos mismos. Por otra parte, supondremos que la fuerza resistiva de un componente depende solamente de las variables indicadas de ese componente. Entonces:

$$m_\ell (|q_\ell|, \varepsilon, s) = \left(\frac{\alpha_0(\varepsilon, s)}{\varepsilon^2} + \frac{\alpha_1(\varepsilon, s)}{\varepsilon^3} |q_\ell| \right) q_\ell \quad [3.55]$$

$$m_a (|q_a|, \varepsilon, s) = \left(\frac{\beta_0(\varepsilon, s)}{\varepsilon^2} + \frac{\beta_1(\varepsilon, s)}{\varepsilon^3} |q_a| \right) q_a \quad [3.56]$$

Reemplazando las expresiones [3.52], [3.55] y [3.56] en las ecuaciones [3.49] y [3.50] resulta:

$$\nabla(\varepsilon s p) = p_\ell \varepsilon s g - \left(\frac{\alpha_0(\varepsilon, s)}{\varepsilon^2} + \frac{\alpha_1(\varepsilon, s)}{\varepsilon^3} |q_\ell| \right) q_\ell \quad [3.57]$$

$$\nabla(\varepsilon(1-s)p g) = p_a \varepsilon(1-s) g - \left(\frac{\beta_0(\varepsilon, s)}{\varepsilon^2} + \frac{\beta_1(\varepsilon, s)}{\varepsilon^3} |q_a| \right) q_a \quad [3.58]$$

3.5.3 Flujo a presión en medio poroso no-saturado

Cuando el gradiente de presión es más importante que el gradiente de saturación ($\partial p / \partial z \gg \partial s / \partial z$) y ($\partial p g / \partial z \gg \partial s / \partial z$), podemos despreciar el gradiente de saturación de las ecuaciones de momentum lineal [3.57] y [3.58]. El resultado es:

$$\nabla p = p_\ell g - \left(\frac{\alpha_0(\varepsilon, s)}{s\varepsilon^3} + \frac{\alpha_1(\varepsilon, s)}{s\varepsilon^4} |q_\ell| \right) q_\ell \quad [3.59]$$

$$\nabla p g = p_a g - \left(\frac{\beta_0(\varepsilon, s)}{\varepsilon^3(1-s)} + \frac{\beta_1(\varepsilon, s)}{\varepsilon^4(1-s)} |q_a| \right) q_a \quad [3.60]$$

Definiendo las *permeabilidades relativas* $k_\ell(\varepsilon, s)$ y $k_a(\varepsilon, s)$ y los *parámetros adimensionales* $c_{r\ell}(\varepsilon, s)$ y $c_{p\alpha}(\varepsilon, s)$, de cada componente en la forma:

$$k_\ell(\varepsilon, s) = \frac{\mu_\ell / k(\varepsilon)}{\alpha_0(\varepsilon, s) / \varepsilon^3 s} \quad \text{y} \quad k_a(\varepsilon, s) = \frac{\mu_a / k(\varepsilon)}{\beta_0(\varepsilon, s) / \varepsilon^3 (1-s)} \quad [3.61]$$

$$c_\ell(\varepsilon, s) = \frac{\sqrt{k(\varepsilon)} / p_\ell}{\beta_0(\varepsilon, s) / \varepsilon^4 s} \quad \text{y} \quad c_a(\varepsilon, s) = \frac{\sqrt{k(\varepsilon)} / p_a}{\beta_1(\varepsilon, s) / \varepsilon^4 (1-s)} \quad [3.62]$$

Donde $k(\varepsilon)$ es la permeabilidad del medio poroso, que depende exclusivamente de la estructura de éste y es independiente del tipo de fluido y régimen de flujo.

Con estas definiciones podemos escribir:

$$\nabla p = p_\ell g - \left(\frac{\mu_\ell}{k(\varepsilon)k_\ell(\varepsilon s)} + \frac{c_\ell(\varepsilon, s)p_\ell}{\sqrt{k(\varepsilon)}} |q_\ell| \right) q_\ell \quad [3.63]$$

$$\nabla p g = \left(\frac{\mu_a}{k(\varepsilon)k_a(\varepsilon s)} - \frac{c_a(\varepsilon, s)p_a}{\sqrt{k(\varepsilon)}} |q_a| \right) q_a \quad [3.64]$$

Donde p es la presión de poros y p_g la presión de aire, ambas variables mensurables. En la ecuación [3.64] se ha tomado en consideración que el gradiente de presión del aire es mucho mayor que el peso del aire en el lecho.

Si el flujo es lento, esto es si se cumple que $p_i c_i(\varepsilon, s) \sqrt{k(\varepsilon)} |q| / \mu_i \ll 1$, para $i = \ell$, las ecuaciones [3.63] y [3.64] se reducen a:

$$\nabla p = p_\ell g - \frac{\mu_\ell}{k(\varepsilon)k_\ell(\varepsilon, s)} q_\ell \quad [3.65]$$

$$\nabla p_g = - \frac{\mu_a}{k(\varepsilon)k_a(\varepsilon, s)} q_a \quad [3.66]$$

De acuerdo a su definición, la permeabilidad relativa puede ser determinada, midiendo el flujo del fluido respectivo en un medio no saturado. Tobinaga y Freire (1980) dan los resultados que se muestran en la figura 3.5 para la permeabilidad relativa del agua en el flujo de una mezcla de aire y agua por varios suelos. Se observa que las permeabilidades relativas medidas resultaron ser independientes de las propiedades del suelo y se las puede escribir en términos de la saturación, para todos los casos estudiados por ellos, en la forma:

$$k_\ell(s) = 1.36 \times 10^{-6} \times \exp(13.6s)$$

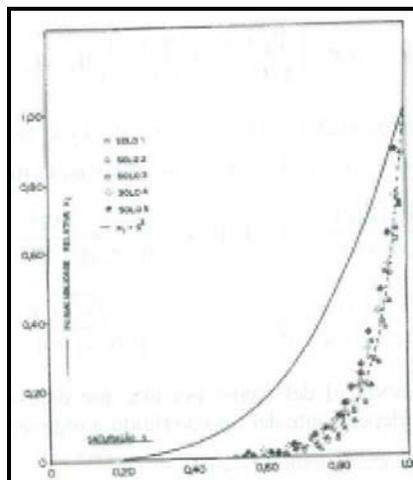


Figura 3.5 Permeabilidad relativa k_ℓ del agua en el flujo de una mezcla de agua y aire en suelos no-saturados (Tobinaga y Freire 1980) (Tomado del Manual de Filtración y Separación, Fernando Concha, 1era Edición, 2001)

3.5.4 Saturación residual y saturación efectiva

La saturación efectiva s_e define al sistema bifásico y queda expresada por:

$$s_e = \frac{1-s}{1-s_\infty} \quad [3.67]$$

Donde s_∞ es la saturación residual. La saturación efectiva se puede correlacionar con la presión capilar a través de una ecuación logística:

$$s_e = \frac{1-s}{1-s_\infty} = \left\{ 1 + \left(\frac{P_c}{P_{50}} \right)^\lambda \right\}^{-1} \quad [3.68]$$

Donde p_{50} es el valor de p_c para $s_e = 0.5$ y $\lambda = 2.1972/\ln(p_{25}/p_{75})$. Para la saturación podemos escribir entonces:

$$s = s_\infty + (1 - s_\infty) \times \frac{\left(P_c / P_{50} \right)^\lambda}{1 + \left(P_c / P_{50} \right)^\lambda} \quad [3.69]$$

La saturación residual s_∞ se relaciona al balance entre la fuerza de presión y la fuerza capilar. La variable adimensional que relaciona estas fuerzas es el número de capilaridad. Este número ha sido definido en diferentes formas. Por ejemplo, de las definiciones en la sección 3.2.1 de este informe, se puede obtener el siguiente número de capilaridad N_c :

$$N_c = K \frac{d(-\Delta p)}{\gamma \cos \theta} \quad [3.70]$$

Donde K es una constante.

La recta de la figura 3.6 muestra la dependencia de la saturación residual del número de capilaridad, la cual puede ser expresada por (Brown 1955):

$$s_{\infty} = \frac{1}{86.3} N_c^{-0.264}$$

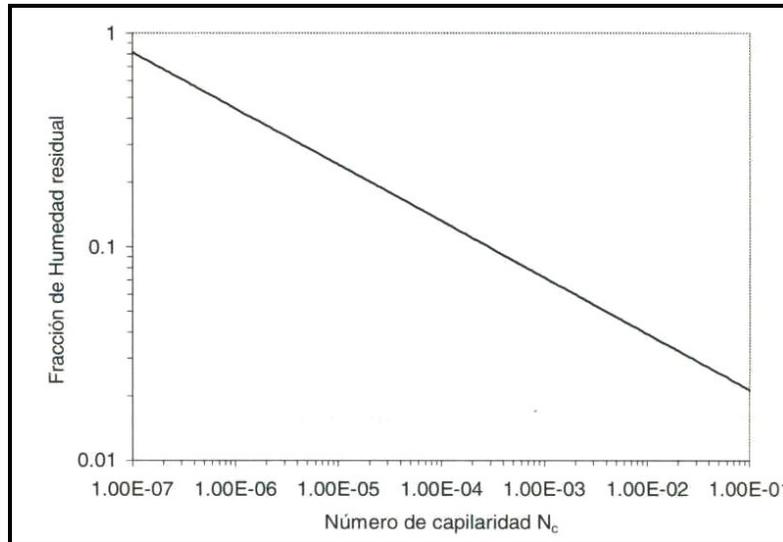


Figura 3.6 Saturación residual s_{∞} versus índice de capilaridad N_c para lechos porosos de gran espesor (Brown 1955) (Tomado del Manual de Filtración y Separación, Fernando Concha, 1era Edición, 2001)

Los valores pequeños de saturación residual corresponden a medios de alta porosidad, mientras que los valores altos pertenecen a medios de baja porosidad. En general podríamos escribir:

$$s_{\infty} = k N_c^{-n} \quad [3.71]$$

Donde k y n se pueden obtener de un gráfico como el de la figura 3.6

Wakeman (1976) definió el número de capilaridad en la forma:

$$N_{\text{cap}} = \frac{\varepsilon_{av} \bar{x}^2 (\Delta p)}{(1 - \varepsilon_{av})^2 L \gamma}$$

CAPITULO 4

FILTRACIÓN

4.1. DEFINICIÓN, EQUIPOS Y OPERACIÓN

Filtración es el proceso de separación sólido-fluido mediante el cual el sólido es separado del fluido en una suspensión haciéndolo pasar a través de un lecho poroso, denominado *medio filtrante*. El lecho retiene las partículas mientras que el fluido pasa a través del medio filtrante y recibe el nombre de *filtrado*.

Para establecer el flujo a través del medio filtrante es necesario aplicar un gradiente de presión como fuerza impulsora. Existen varias formas para aplicar este gradiente de presión, por ejemplo: 1) la gravedad, 2) el vacío, 3) una presión, 4) un vacío y una presión combinados, 5) una fuerza centrífuga y 6) un gradiente de saturación. La mayor parte de estas formas de aplicar presión da lugar a diferentes tipos de equipos de filtración, los que se reciben el nombre de *filtros*.

Se puede distinguir tres clases de filtración: a) la filtración con formación de queque, b) la filtración sin formación de queque y c) la filtración profunda.

4.1.1. Filtración con formación de queque

La filtración con formación de queque se caracteriza porque el sólido de la suspensión es retenido en la superficie del medio filtrante como una capa denominada *queque*. Esto se produce naturalmente cuando los poros del medio filtrante tienen un tamaño menor que las partículas. Cuando este no es el caso, es necesario cubrir el medio filtrante con una delgada capa de material fibroso, denominada *ayuda de filtración*, que bloquea el paso de las partículas a través del medio filtrante. En este tipo de filtración, el flujo de suspensión es perpendicular a la superficie del medio filtrante.

CAPÍTULO 5

TEORÍA DE FILTRACIÓN

Dependiendo del tipo de material a filtrar y de la magnitud del gradiente de presión, el queque formado durante la filtración puede permanecer rígido o puede comprimirse. En general, los concentrados de cobre y otros metales, especialmente cuando no se utiliza floculante en su espesamiento, son materiales incompresibles. Al contrario, los relaves de flotación son siempre floculados antes de espesar. Por esta razón son materiales comprensibles. Por otra parte, cuando estos relaves son filtrados, lo que no ocurre frecuentemente, se utiliza la filtración al vacío, por lo que el gradiente de presión aplicado es pequeño y nuevamente el material puede ser considerado incompresible en esas circunstancias. Es así como en la mayoría de los casos de filtración en plantas de procesamiento de minerales se puede considerar al queque de filtración como incompresible y es aplicable la teoría de flujo en un lecho poroso rígido. En caso contrario, es necesario introducir la consolidación o expresión del queque.

Consideremos un proceso de filtración con las siguientes restricciones:

- i) Las propiedades de la suspensión, del filtrado y del queque son constantes.
- ii) El queque formado es incompresible.
- iii) La superficie de filtración es plana.
- iv) La velocidad de percolación del filtrado a través del queque y del medio filtrante es muy lenta.

La suposición ii) permite considerar al queque como un lecho poroso rígido, lo que significa que el sólido contenido en el queque no se mueve. La suposición iii) implica que, en el caso de superficies curvas, como en los tambores rotatorios, el diámetro del tambor debe ser muy grande comparado con el grosor del queque.

La suposición iv) permite utilizar la ecuación de Darcy como velocidad de percolación.

La filtración, ya sea en filtros continuos o discontinuos, se lleva a cabo en etapas. Por lo menos se distinguen dos etapas fundamentales en el proceso: a) la formación de queque, que incluye el bombeo de la suspensión al filtro y la compresión de la suspensión sobre el medio filtrante (por medio de aire a presión o de un diafragma o émbolo) hasta el momento en que desaparece la suspensión y el queque se encuentra totalmente saturado; b) desaguado del queque, que se lleva a cabo succionando o soplando aire a través del queque y, de esta forma, desplazando el agua por el aire. Filtraciones más sofisticadas incluyen etapas adicionales tales como: c) la expresión, que consiste en presionar el queque ya saturado mediante una membrana o émbolo impermeable eliminando parte del agua por reducción de la porosidad del queque (estruje). Esta etapa solamente es útil en materiales compresibles. Otra etapa es d) el lavado del queque, que permite eliminar materiales indeseables o recuperar materiales valiosos del queque.

5.1. FORMACIÓN DEL QUEQUE

Formalmente, el proceso de filtración queda descrito por las siguientes variables de campo: la porosidad del queque $\varepsilon(z, t)$, la velocidad del filtrado $q(z, t)$ y la presión en exceso a la hidrostática $p_e(z, t)$. Estas tres variables constituyen un proceso de filtración simple si cumplen las siguientes ecuaciones:

$$\varepsilon(z, t) = \varepsilon_0 \quad [5.1]$$

$$q(z, t) = q(t) \quad [5.2]$$

$$\nabla p_e = - \frac{\mu}{k(\varepsilon_0)} q \quad [5.3]$$

Donde ε_0 es constante y q es una función del tiempo solamente.

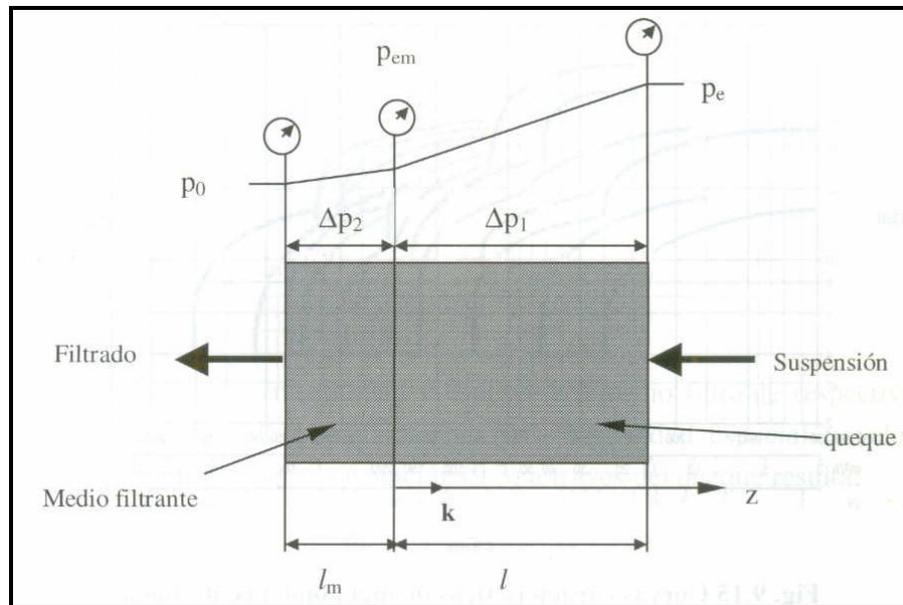


Figura 5.1 Filtración con queque plano, donde

$$\Delta p_1 = p_e - p_{em} > 0 \text{ y } \Delta p_2 = p_{em} - p_0 > 0$$

Las condiciones de contorno son:

$$P_e(-l_m) = p_0 \quad [5.4]$$

$$P_e(l(t)) = p_e \quad [5.5]$$

Donde p_e es el valor de la presión en exceso a la hidrostática en la interfaz entre el queque y la suspensión $z = l(t)$, y p_0 es el valor en la interfaz entre el filtrado y el medio filtrante $z = -l_m$.

Denominaremos *proceso de filtración simple* a un proceso de filtración con queque incompresible. El término *simple* se refiere a que, en este caso, las ecuaciones de campo son las más simples que es posible establecer. En la filtración al vacío, el filtro está parcialmente sumergido en la suspensión que es alimentada al estanque del filtro mediante una bomba. Se trata de mantener esta suspensión lo más homogénea posible mediante agitación. Por ello, en este tipo de filtración, el gradiente de presión aplicado es constante y el flujo de filtrado depende de la resistencia ofrecida por el medio filtrante más el queque, que crece en espesor con el tiempo. En el caso de la filtración a presión, la alimentación a

filtros se lleva a cabo mediante bombas centrífugas que impulsan la suspensión. Esto lleva a que el caudal que llega el filtro y la presión a la que es sometida la suspensión depende de las características de la bomba.

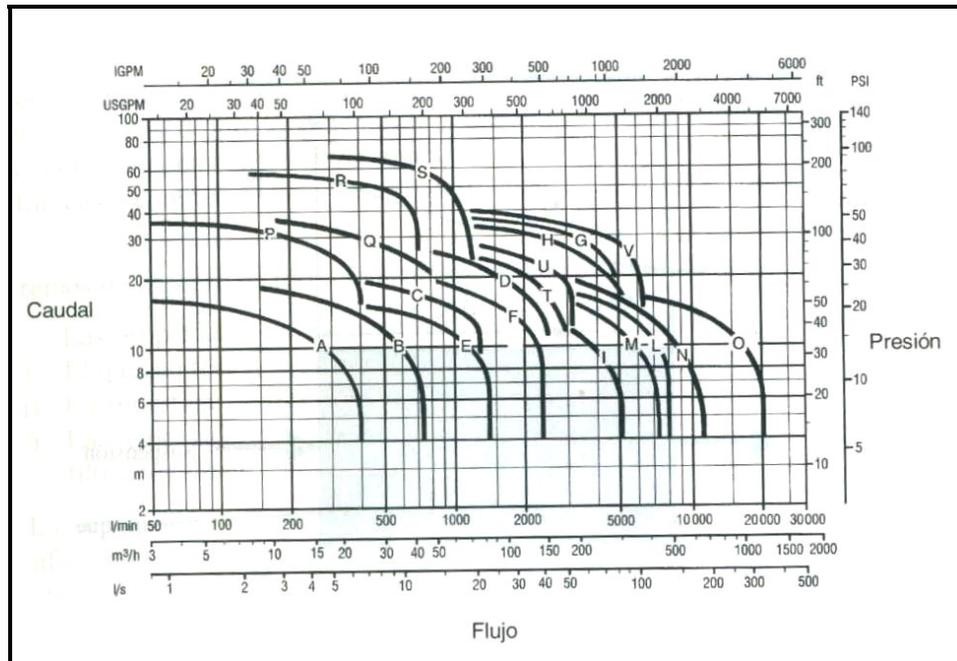


Figura 5.2 Curvas características de una bomba centrífuga (Tomado del Manual de Filtración y Separación, Fernando Concha, 1era Edición, 2001)

Cuando la bomba inicia su acción hay poca resistencia en el filtro por lo que hay una baja presión y un caudal alto y relativamente constante. Más adelante durante el proceso la resistencia va aumentando a medida que crece el queque, por lo que aumenta la presión haciéndose asintótica un determinado valor máximo, mientras que disminuye el caudal según la curva característica. La curva de la figura se puede aproximar por dos rectas, una horizontal y una vertical. Esto significa que se puede inicialmente aproximar la alimentación a filtros y el filtrado, como un proceso a volumen constante de filtrado, seguida de un proceso con presión constante. Por esta razón es costumbre analizar la filtración en estas dos condiciones, presión constante y volumen constante.

5.2. FILTRACIÓN A PRESIÓN CONSTANTE

Como indicamos en los párrafos anteriores, durante la fase avanzada de la filtración en equipos en que la suspensión se alimenta al filtro mediante una bomba centrífuga la presión se mantiene relativamente constante. Analicemos este caso. Designemos por p_0 la presión en $z = -\ell_m$, por p_{em} la presión en $z = 0$ y por p_e la presión en $z = \ell(t)$, con $\Delta p_1 = p_e - p_{em} > 0$ y $\Delta p_2 = p_{em} - p_0 > 0$, de modo que:

$$\Delta p_e = p_e - p_0 = \Delta p_1 + \Delta p_2 > 0 \quad [5.6]$$

Cada una de estas caídas de presión es constante y positiva, por lo que integrando la ecuación [5.3] a través del medio filtrante con $q(t) = -q(t)k$, y $q > 0$, y $\nabla p_e = (dp_e/dz)k$, se obtiene:

$$\begin{aligned} \nabla p_e \cdot k &= -\frac{\mu}{k} q \cdot k \\ \int_{p_{em}}^{p_e} dp_e &= \int_0^{-\ell_m} \frac{\mu}{k} q(t) dz \\ p_0 - p_{em} &= \frac{\mu}{k_m} (-\ell_m) q(t) \\ \Delta p_2 &= \frac{\ell_m}{k_m} \mu q(t) \end{aligned} \quad [5.7]$$

Donde k_m y ℓ_m son la permeabilidad y espesor del medio filtrante respectivamente y $q(t)$ es el flujo de filtrado por unidad de área (velocidad espacial o velocidad de percolación). Integrando ahora la ecuación [5.3] a través del queque resulta:

$$\int_{p_{em}}^{p_e} dp_e = \int_0^{\ell(t)} \frac{\mu}{k} q(t) dz$$

$$p_e - p_{em} = \frac{\mu}{k(\varepsilon_0)} \ell(t)q(t)$$

$$\Delta p_1 = \frac{\mu}{k(\varepsilon_0)} \ell(t)q(t) \quad [5.8]$$

Donde $k(\varepsilon_0)$ y $\ell(t)$ son la permeabilidad y espesor del queque respectivamente. Reemplazando las ecuaciones [5.7] y [5.8] en el gradiente total de presión a través del queque y del medio filtrante [5.6] resulta:

$$\Delta p_e = \mu \left(\frac{\ell_m}{k_m} + \frac{\ell(t)}{k(\varepsilon_0)} \right) q(t) \quad [5.9]$$

El caudal de filtrado $Q(t)$ se puede expresar en términos de la velocidad de percolación q y del volumen filtrado $V_f(t)$:

$$Q(t) = q(t)S = \frac{dV_f(t)}{dt} \quad [5.10]$$

Donde S es el área de filtración. Reemplazando [5.10] en la ecuación anterior obtenemos:

$$\Delta p_e S = \mu \left(\frac{\ell_m}{k_m} + \frac{\ell(t)}{k(\varepsilon_0)} \right) \frac{dV_f(t)}{dt} \quad [5.11]$$

5.2.1. Tiempo de filtración

Para llegar a una ecuación práctica que relacione el espesor $\ell(t)$, la masa $m_s(t)$ del queque producido y el volumen de filtrado obtenido $V_f(t)$ con el tiempo de filtración, observemos que el contenido de sólido del queque es igual al contenido de sólido de la suspensión asociado al filtrado producido en el tiempo t . Por lo tanto:

Fracción volumétrica de sólidos en la suspensión φ_0 :

$$\varphi_0 = \frac{\text{volumen del sólido}}{\text{Volumen de suspensión}} = \frac{\text{volumen del sólido}}{\text{Volumen de líquido} + \text{volumen del sólido}}$$

El volumen de líquido es igual al volumen de filtrado producido más el líquido retenido en el queque. Entonces, la concentración φ_0 será:

$$\varphi_0 = \frac{m(\varepsilon_0, t) / \rho_s}{(V_f(t) + S\ell(t)\varepsilon_0) + m(\varepsilon_0, t)\rho_s} \quad [5.12]$$

Por otra parte, la masa del queque es igual al volumen del queque por la densidad del sólido:

$$m(\varepsilon_0, t) = \rho_s(1 - \varepsilon_0)S\ell \quad [5.13]$$

Reemplazando [5.13] en la ecuación anterior y despejando $\ell(t)$ o $m(\varepsilon_0, t)$ obtenemos:

$$\ell(t) = \frac{\varphi_0}{1 - \varphi_0 - \varepsilon_0} \frac{V_f(t)}{S} \quad [5.14]$$

$$m(\varepsilon_0, t) = \frac{\varphi_0(1 - \varepsilon_0)}{1 - \varphi_0 - \varepsilon_0} \rho_s V_f(t) \quad [5.15]$$

Las expresiones [5.14] y [5.15] dan las relaciones entre grosor del queque, masa de éste y volumen de filtrado.

Reemplazando la expresión [5.14] en la ecuación [5.11] para dar:

$$\Delta p_e S = \mu \left(\frac{\ell_m}{k_m} + \frac{\varphi_0}{S(1 - \varphi_0 - \varepsilon_0)k(\varepsilon_0)} V_f(t) \right) \frac{dV_f}{dt} \quad [5.16]$$

La única variable en esta expresión es el volumen de filtrado. Integrando entre 0 y t y entre 0 y V_f , resulta:

$$\int_0^t \frac{S\Delta p_e}{\mu} d\eta = \int_0^{V_f} \frac{\ell_m}{k_m} d\xi + \int_0^{V_f} \frac{1}{2S} \frac{\varphi_0}{(1-\varphi_0-\varepsilon_0)k(\varepsilon_0)} \xi d\xi$$

$$\frac{S\Delta p_e}{\mu} t = \frac{\ell_m}{k_m} V_f + \frac{1}{2S} \frac{\varphi_0}{(1-\varphi_0-\varepsilon_0)k(\varepsilon_0)} V_f^2 \quad [5.17]$$

5.2.2. Espesor del queque

Reemplacemos V_f de [5.14] en [5.17] para dar, después de algunos arreglos:

$$\ell^2 + 2k(\varepsilon_0) \frac{(\ell_m)}{k_m} \ell - 2 \frac{k(\varepsilon_0)}{\mu} \Delta p_e \frac{\varphi_0}{(1-\varphi_0-\varepsilon_0)} t = 0 \quad [5.18]$$

Cuya solución es:

$$\ell(t) = k(\varepsilon_0) \left\{ \left[\left(\frac{\ell_m}{k_m} \right)^2 + \frac{2\Delta p_e}{\mu k(\varepsilon_0)} \frac{\varphi_0}{(1-\varphi_0-\varepsilon_0)} t \right]^{1/2} - \frac{\ell_m}{k_m} \right\} \quad [5.19]$$

Usando las relaciones entre $\ell(t)$, $V_f(t)$ y $m(\varepsilon_0, t)$ en esta última ecuación podemos escribir

$$m(\varepsilon_0, t) = p_s S (1-\varepsilon_0) k(\varepsilon_0) \left\{ \left[\left(\frac{\ell_m}{k_m} \right)^2 + \frac{2\Delta p_e}{\mu k(\varepsilon_0)} \frac{\varphi_0}{(1-\varphi_0-\varepsilon_0)} t \right]^{1/2} - \frac{\ell_m}{k_m} \right\} \quad [5.20]$$

$$v_f(t) = S k(\varepsilon_0) \frac{1-\varphi_0-\varepsilon_0}{\varphi_0} \left\{ \left[\left(\frac{\ell_m}{k_m} \right)^2 + \frac{2\Delta p_e}{\mu k(\varepsilon_0)} \frac{\varphi_0}{(1-\varphi_0-\varepsilon_0)} t \right]^{1/2} - \frac{\ell_m}{k_m} \right\} \quad [5.21]$$

Las expresiones [5.19], [5.20] y [5.21] representan el grosor del queque, su masa y el volumen de filtrado obtenido por unidad de tiempo de filtración.

Estas expresiones pueden ser simplificadas si se desprecia la resistencia específica del medio filtrante $R_m = \ell_m/k_m$. Las tres expresiones se reducen a:

$$v_f(t) = S \left(\frac{2}{\mu} \right)^{1/2} \left(\frac{1 - \varphi_0 - \varepsilon_0}{\varphi_0} \right)^{1/2} (k \varepsilon_0)^{1/2} \Delta p_e^{1/2} t^{1/2} \quad [5.22]$$

$$m(\varepsilon_0, t) = p_s (1 - \varepsilon_0) S \left(\frac{2}{\mu} \right)^{1/2} \left(\frac{\varphi_0}{(1 - \varphi_0 - \varepsilon_0)} \right)^{1/2} (k(\varepsilon_0))^{1/2} \Delta p_e^{1/2} t^{1/2} \quad [5.23]$$

$$\ell(t) = \left(\frac{2}{\mu} \right)^{1/2} \left(\frac{\varphi_0}{(1 - \varphi_0 - \varepsilon_0)} \right)^{1/2} (k(\varepsilon_0))^{1/2} \Delta p_e^{1/2} t^{1/2} \quad [5.24]$$

Es importante fijarse que cada uno de estos parámetros: volumen de filtrado, masa del queque y su espesor son directamente proporcionales a la raíz de la presión y a la raíz del tiempo de filtración.

Las ecuaciones desarrolladas en la sección anterior son válidas para la filtración en el estado estacionario, esto es una vez que se ha formado el queque. Esto significa que solamente son válidas para el tiempo final de la formación del queque y son perfectamente válidas para el lavado del queque. En el período de formación del queque el flujo de filtrado no es constante. Inicialmente, la filtración es muy rápida cuando hay muy poco sólido depositado en el medio filtrante. A medida que el queque empieza a engrosar el flujo de filtrado disminuye. Cuando la cantidad de sólido que se deposita por unidad de tiempo es pequeña en comparación al espesor del queque, el flujo de filtrado se hace constante. En ese momento las ecuaciones desarrolladas son válidas aún cuando el sólido siga depositándose en el queque.

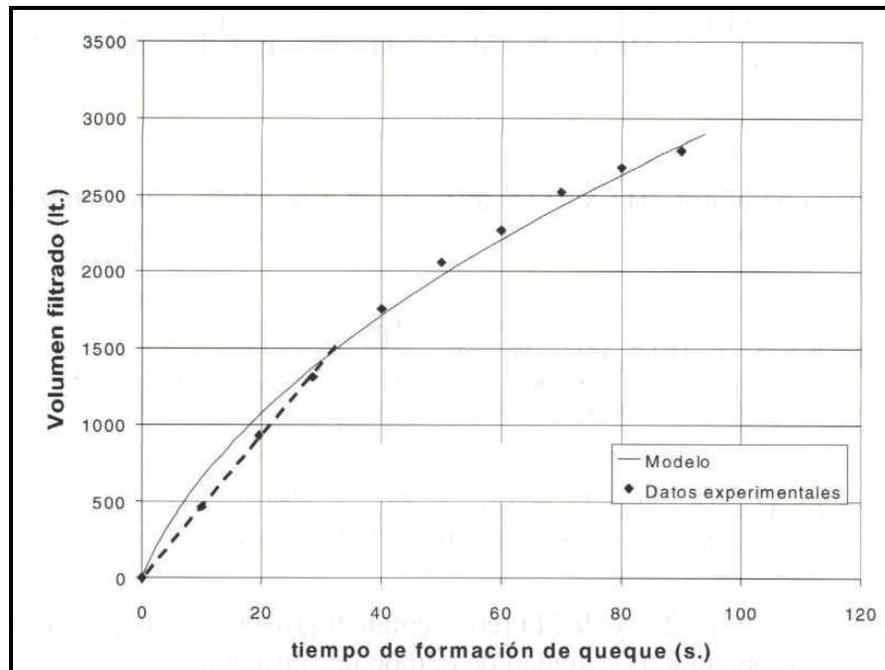


Figura 5.3 Curva representativa de modelación para la formación de coque en la etapa de prensado en un filtro a presión (Tomado del Manual de Filtración y Separación, Fernando Concha, 1era Edición, 2001)

En la figura anterior se observa que el volumen de filtrado aumenta inicialmente en forma proporcional al tiempo y que más tarde esta proporcionalidad disminuye a $t^{1/2}$. Este comportamiento se puede demostrar en la siguiente forma. La ecuación de Darcy sigue siendo válida durante todo el período de filtración, por lo que podemos escribir:

$$\Delta p_e = \mu \left(\frac{\ell_m}{k_m} + \frac{\ell(t)}{k(\varepsilon_0)} \right) q(t) \quad [5.25]$$

Como se ha supuesto que el coque es incompresible, su porosidad permanecerá constante durante todo el período de formación por lo tanto, las únicas variables en [5.25] son $\ell(t)$ y $q(t)$. Recordemos que hemos supuesto que la caída de presión es constante. Inicialmente el espesor del coque es muy pequeño y su resistencia al flujo también pequeña. Es así como el flujo de filtrado

es máximo y constante al inicio de la filtración. Ignoremos el espesor del queque, por lo que [5.25] se reduce a:

$$\Delta p_e = \mu \frac{\ell_m}{k_m} q(t)$$

Como q es igual a $q = (1/S) \times (V_f/t)$, la ecuación anterior se aproxima a:

$$\Delta p_e = \mu \frac{\ell_m}{k_m} \frac{V_f}{St}$$

de donde concluimos que:

$$V_f = \frac{S \Delta p_e}{\mu} \frac{\ell_m}{k_m} t$$

Esto significa que inicialmente el volumen de filtrado es una función lineal del tiempo. La figura anterior confirma este resultado. Se observa que durante los primeros 20 segundos de filtración el volumen aumenta en forma proporcional al tiempo para luego disminuir esta proporcionalidad a $t^{1/2}$. La ecuación clásica de la filtración [5.21], utilizada para la determinación de parámetros, es válida cuando el queque se ha formado en su mayor parte de modo que el aumento de espesor es despreciable y el flujo de filtrado q se hace constante.

La ecuación [5.20] se puede interpretar también como el tiempo necesario para filtrar una masa m_s de sólidos:

$$t = \left\{ \left(\frac{m_s}{p_s S (1 - \varepsilon_0) k(\varepsilon_0)} + \frac{\ell_m}{k_m} \right)^2 - \left(\frac{\ell_m}{k_m} \right)^2 \right\} \left\{ \frac{2 \Delta p_e \varphi_0}{\mu k(\varepsilon_0) (1 - \varphi_0 - \varepsilon_0)} \right\}^{-1} \quad [5.26]$$

5.3. FILTRACIÓN A VOLUMEN CONSTANTE

La filtración a volumen constante se lleva a cabo en las etapas iniciales de equipos en que la pulpa es impulsada al filtro por una bomba centrífuga o durante

la operación con bombas de desplazamiento positivo. En este caso el flujo volumétrico de filtrado es constante. La ecuación [5.9] sigue siendo válida, ahora con Δp_e como variable y q constante:

$$\Delta p_e(t) = \mu \left(\frac{\ell_m}{k_m} + \frac{\ell(t)}{k(\varepsilon_0)} \right) q$$

$$\Delta p_e(t) S = \mu \left(\frac{\ell_m}{k_m} + \frac{\ell(t)}{k(\varepsilon_0)} \right) \frac{Q}{S}$$

Donde Q es el flujo volumétrico constante de filtrado. De esta última ecuación se puede despejar el valor del espesor del queque:

$$\ell(t) = \frac{S k(\varepsilon_0)}{\mu Q} \Delta p_e(t) - \frac{\ell_m k(\varepsilon_0)}{k_m} \quad [5.27]$$

$$m_s(t) = \frac{S \rho_s (1 - \varepsilon_0) k(\varepsilon_0)}{\mu Q} \Delta p_e(t) - \frac{\ell_m \rho_s (1 - \varepsilon_0) k(\varepsilon_0)}{k_m} \quad [5.28]$$

Por otra parte el valor del flujo de filtrado se obtiene de datos de la bomba.

5.3.1 Secado o soplado del queque

Durante el período de formación del queque se elimina la mayor parte del líquido de la suspensión. Finalizada esta etapa, que se caracteriza porque la superficie del queque se ve seca, los poros de éste están llenos de líquido, esto es, están saturados. Este líquido solamente se puede eliminar utilizando secado o soplado y mediante la expresión, o con la combinación de estos métodos. En la filtración al vacío la etapa de secado consiste en la succión de aire a través del queque para desplazar el líquido, mientras que en la filtración a presión el secado se produce mediante el soplado de aire a través del queque, lo que recibe el nombre de soplado. La expresión es un procedimiento totalmente diferente, en la

que se aplica una presión sobre el queque mediante una superficie impermeable. Aunque el queque puede ser considerado incompresible en la etapa de formación, se comprime bajo la alta presión ejercida por esta superficie, exprimiendo líquido desde su interior. El fenómeno es similar al de estrujar una esponja saturada de agua, y su mecanismo es simplemente la reducción de volumen de los poros por la compresión. Este tipo de mecanismo se analizará por separado.

Durante la etapa de secado o soplado en una filtración, escurren simultáneamente dos fluidos a través del queque: el líquido y el aire. En general, el primero moja al sólido. El aire desplaza al líquido pero deja una película de líquido adyacente al sólido, retenida por fuerzas capilares, que impide el contacto de éste con el aire. Es así como el aire fluye por los espacios vacíos encontrando un medio poroso de propiedades diferentes al del medio poroso seco. El líquido modifica el volumen disponible y la forma de los poros por los que circula el aire.

Se denomina saturación s la fracción del volumen de poros de un queque ocupada por el líquido. Esto significa que la saturación varía entre $0 \leq s \leq 1$. Si $s = 0$, el queque está seco y si $s = 1$, el queque está lleno de líquido o saturado.

En el cálculo del flujo de aire a través de un queque húmedo, se utiliza la teoría de flujo bifásico en medios porosos, considerando una permeabilidad modificada para cada fluido que pasa por el queque. Para el escurrimiento de cada fluido se utiliza una corrección para la permeabilidad $k(\varepsilon)$ basada en la saturación. Se denomina *permeabilidad relativa* del fluido al cociente entre el flujo de fluido en un queque no saturado y el flujo del mismo fluido en un queque saturado con el mismo fluido bajo el mismo gradiente de presión:

$$k_{\ell}(\varepsilon_0, s) = q_{\ell}(\varepsilon_0, s) / q_{\ell}(\varepsilon_0, s = 1) = \frac{\frac{k(\varepsilon_0, s)}{\mu_l} \frac{\partial p_e}{\partial z}}{\frac{k(\varepsilon_0)}{\mu_l} \frac{\partial p_e}{\partial z}} = \frac{k(\varepsilon_0, s)}{k(\varepsilon_0)} \quad [5.29]$$

$$k_g(\varepsilon_0, s) = q_g(\varepsilon_0, s) / q_g(\varepsilon_0, s = 0) = \frac{\frac{k(\varepsilon_0 s)}{\mu_g} \frac{\partial p_g}{\partial z}}{\frac{k(\varepsilon_0)}{\mu_g} \frac{\partial p_g}{\partial z}} = \frac{k(\varepsilon_0, s)}{k(\varepsilon_0)} \quad [5.30]$$

De esta forma, se puede utilizar la ecuación de Darcy para el flujo en queque no saturado usando los parámetros del caso saturado. Para el escurrimiento del líquido y gas se tiene:

$$q_\ell(s) = -\frac{k_\ell(\varepsilon_0, s)k(\varepsilon_0)}{\mu_\ell} \nabla p_e \quad [5.31]$$

$$q_g(s) = -\frac{k_g(\varepsilon_0, s)k(\varepsilon_0)}{\mu_g} \nabla p_g \quad [5.32]$$

La permeabilidad relativa debe ser determinada experimentalmente. Si se sopla aire por el medio poroso, en un comienzo escurrirá solamente líquido y luego escurren líquido y gas en conjunto. Cuando la saturación del líquido es inferior a la saturación residual s_∞ , fluye solamente aire por el queque. El líquido es retenido en el interior del medio poroso por las fuerzas capilares.

Para utilizar las curvas de permeabilidad relativa, tales como las mostradas en la figura siguiente, se les debe ajustar función:

$$k_i(\varepsilon_0, s) = f_i(s, s_\infty) \quad \text{con } i = \ell, a \quad [5.33]$$

Donde s es la saturación y s_∞ es la saturación residual y el índice i se refiere al fluido que escurre.

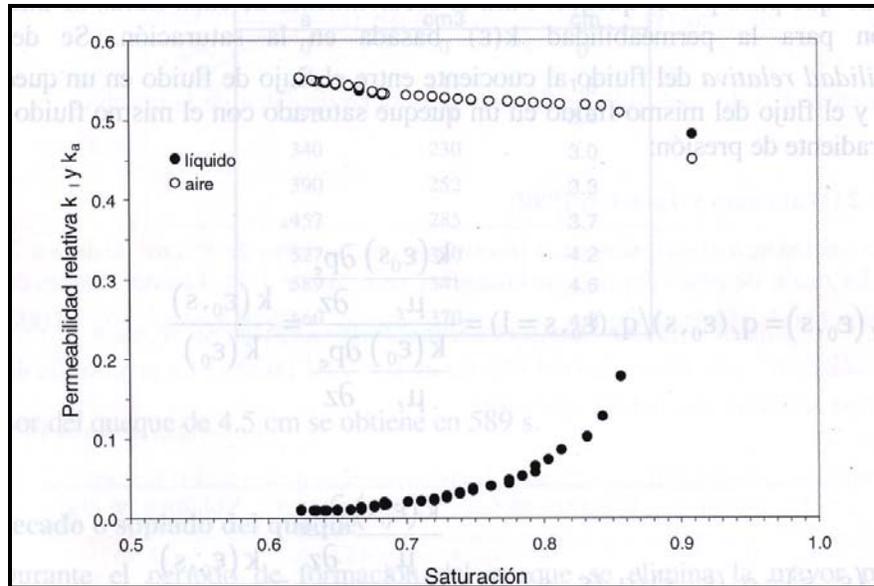


Figura 5.4. Curvas de permeabilidad relativa para el escurrimiento de agua y aire en un queque de concentrado de cobre (Tomado del Manual de Filtración y Separación, Fernando Concha, 1era Edición, 2001)

5.3.2. Tiempo de soplado

Consideremos la ecuación de soplado [5.31] e integrémosla para obtener:

$$\frac{\Delta p_e}{\mu_\ell} = \left(R_m + \frac{\ell}{k(\varepsilon_0)k_\ell(\varepsilon_0, s)} \right) q_\ell \quad [5.34]$$

Durante el período de soplado, el grosor del queque ℓ permanece constante y es igual a $\ell = m_s / S(1 - \varepsilon_0)$. La cantidad de agua contenida en el queque en cada instante t es $S \ell \varepsilon_0 s(t)$, donde la saturación es inicialmente igual a 1 y disminuye con el tiempo. Entonces, el volumen de filtrado obtenido al tiempo t durante el soplado será $V_f(t) = S \ell \varepsilon_0 s(1-s(t))$ y su derivada $q_\ell S = dV_f / dt = - S \ell \varepsilon_0 ds / dt$, reemplazando en la expresión anterior obtenemos:

$$\int_0^t \frac{\Delta p_e}{\mu_\ell} d\xi = - \int_1^s \ell \varepsilon_0 \left(R_m + \frac{\ell}{k(\varepsilon_0)k_\ell(\varepsilon_0, \eta)} \right) d\eta$$

$$\frac{\Delta p_e}{\mu \ell \varepsilon_0} t = R_m (1-s) + \frac{\ell}{k(\varepsilon_0)} \int_s^1 \frac{d\eta}{f_\ell(\varepsilon_0, \eta)} \quad [5.35]$$

La ecuación [5.35] da el tiempo necesario para llegar a una saturación s bajo un gradiente de presión Δp_e . La integral se puede calcular una vez que se conoce la función $k_\ell(\varepsilon_0, s)$.

5.4. FLUJO DE AIRE

Como en la filtración a presión, el gradiente de presión es mucho mayor al gradiente de saturación, éste último se puede despreciar, de modo que para calcular el flujo de aire necesario para llegar a una saturación s se puede integrar directamente para obtener:

$$\frac{\Delta p_e}{\mu_g} = \left(R_m + \frac{\ell}{k(\varepsilon_0)k_g(\varepsilon_0, s)} \right) q_g$$

de donde el flujo de aire $Q_g = S q_g$ resulta ser:

$$Q_g = \left(\frac{S \Delta p_e}{\mu_g} \right) \left(R_m + \frac{\ell}{k(\varepsilon_0)k_g(\varepsilon_0, s)} \right)^{-1} \quad [5.36]$$

La humedad del queque es la razón de masa de agua a masa total expresado en porcentaje, por lo que la relación entre humedad h y saturación s es:

$$h = 100 \frac{p_f \varepsilon_0 s}{p_f \varepsilon_0 s + p_s (1 - \varepsilon_0)} \quad \text{y} \quad s = \frac{p_s}{p_f} \frac{1 - \varepsilon_0}{\varepsilon_0} \frac{h}{100 - h} \quad [5.37]$$

En estas ecuaciones R_m y S son parámetros del equipo, ρ_s , $k(\varepsilon_0)$ y ε_0 son parámetros característicos del medio poroso, ρ_f y μ son propiedades del fluido y Δp_e , m_s y h son parámetros operacionales.

Una vez integrada la ecuación [5.35], podemos reemplazar la saturación por la humedad y disponer de una ecuación del tiempo de soplado necesario para llegar a una humedad determinada.

5.5. PARÁMETROS DE FILTRACIÓN Y SU MEDICIÓN

En la figura anterior hemos esquematizado las diversas variables que influyen en el proceso de filtración. Las separamos en: *variables de entrada*: el flujo y concentración de la pulpa de alimentación; *variables de salida*: la capacidad, espesor y humedad del queque producido; *variables de diseño*: área y pérdidas de carga en el equipo; *variables de control*: presión aplicada, tiempos de formación del queque, de lavado, prensado y soplado, temperatura, pH, aditivos, agitación de la pulpa; *perturbaciones*: tamaño y distribución de tamaño del sólido y *parámetros*: porosidad, permeabilidad y compresibilidad del queque, saturación residual.

En la sección anterior hemos desarrollado relaciones entre estas variables en términos de los parámetros. Para completar la información necesaria para simular el proceso de filtración es necesario establecer las dependencias de los parámetros de las propiedades del sólido y del líquido y de las perturbaciones al proceso.

5.5.1. Porosidad del queque

La porosidad del queque está determinada principalmente por el tamaño, distribución de tamaño y disposición de las partículas que forman el empaquetamiento. Para comprender mejor el efecto de estas variables en la

porosidad, tomemos el ejemplo del empaquetamiento de esferas. La porosidad de un lecho de esferas de un solo tamaño es independiente del tamaño de las esferas y depende exclusivamente del tipo de empaquetamiento. En la tabla siguiente (Wakeman y Tarleton 1999) se muestra valores calculados para la porosidad con diferentes tipos de empaque.

Tabla. 5.1. Porosidad versus empaquetamiento (Tomado del Manual de Filtración y Separación, Fernando Concha, 1era Edición, 2001)

Empaquetamiento	Número de coordinación	Porosidad (ϵ)
Cúbico	3	0,7766
	4	0,6599
	5	0,5969
	6	0,4764
	7	0,4388
Orto-rómbico	8	0,3955
	9	0,3866
Tetragonal	10	0,3019
	11	0,2817
Romohedral	12	0,2595

Se puede observar que, dependiendo del empaque, la porosidad puede variar desde 0,26 a 0,78, esto es 3 veces. Porosidades encontradas en queques de filtración son frecuentemente cercanas a 0,40.

Lechos de esferas con distribución de tamaño pueden tener permeabilidades aun menores que los monotamaños, ya que las esferas más pequeñas pueden ocupar los espacios dejados por las esferas mayores. Varios investigadores han propuesto ecuaciones para calcular la porosidad de lechos con esferas de distintos tamaños (Concha 1990), sin embargo es preferible la determinación experimental de la porosidad del queque en cada caso.

La porosidad del queque de un filtro industrial generalmente se determina sacando una muestra del queque y midiendo el volumen y el peso del queque seco. En un equipo de laboratorio es posible conocer la porosidad del queque en el momento en que el queque se ha formado y está totalmente saturado. En ese instante se puede realizar un balance de agua y atribuir la diferencia entre el volumen de agua contenida en la suspensión a filtrar y el volumen de filtrado recuperado al agua que está llenando los poros del queque y que, por lo tanto, mide la porosidad.

Cualquier método que permita determinar el espesor del queque en cada instante de una filtración, permite calcular la porosidad del queque, ya que el área de filtración es conocida y la masa de sólido contenida en el queque también es conocida.

5.2.2. Permeabilidad del queque y Resistencia Específica del Medio Filtrante

El medio filtrante es un componente esencial en los equipos de filtración. Es un medio poroso heterogéneo, con poros de diferentes tamaños y geometría, cuya estructura puede causar grandes variaciones en la forma en que se depositan las partículas y grandes variaciones en la distribución del flujo de líquido en la superficie. Una tela de filtración, no sólo debe retener las partículas sólidas y producir un filtrado limpio, sino que debe resistir todas las sollicitaciones que le imponga el equipo. Por ello, a las propiedades de *resistencia específica* se debe agregar la de *resistencia mecánica*.

Determinación experimental

Para determinar la permeabilidad $k(\varepsilon)$ del queque y la resistencia específica del medio poroso R_m , escribamos la ecuación [5.16] en la forma:

$$\frac{t}{V_f(t)} = \frac{R_m \mu}{S \Delta p_e} + \frac{\mu}{2S^2 \Delta p_e} \frac{\varphi_0}{(1 - \varphi_0 - \varepsilon_0) k(\varepsilon_0)} V_f(t) \quad [5.41]$$

Donde $R_m = \ell_m / k_m$, ℓ_m y k_m son el espesor y la permeabilidad del medio filtrante, información que en general no se conoce.

Graficando $t / V_f(t)$ versus $V_f(t)$, se puede calcular la resistencia específica del medio filtrante R_m y la permeabilidad del queque $k(\varepsilon_0)$. Si $b = \text{tg}\theta$ es la pendiente de la recta obtenida y a es su intersección con el eje de las ordenadas, los parámetros serán:

$$R_m = a \frac{\Delta p_e S}{\mu} \quad k(\varepsilon_0) = \frac{1}{b} \frac{\mu}{2S^2 \Delta p_e} \frac{\varphi_0}{1 - \varphi_0 - \varepsilon_0} \quad [5.42]$$

5.5.3. Efecto del tamaño de partículas

La ecuación de Kozeny - Carman para la permeabilidad de un medio poroso se presentó en la ecuación [5.33]

$$K(\varepsilon_0) = \frac{\varepsilon^3 d_e^2 \psi^2}{36\beta(1 - \varepsilon)^2}$$

Esta ecuación permite observar que la permeabilidad de un queque de filtración depende directamente de las características de las partículas que lo forman a través de dos parámetros, el tamaño promedio de las partículas d_e (diámetro equivalente) y su forma (esfericidad ψ), e indirectamente a través del parámetro β y la porosidad, ésta última depende, como ya hemos visto, del tamaño, distribución de tamaño y disposición de las partículas que forman el empaquetamiento. La principal variable de operación que influye en la permeabilidad es la presión a través de la porosidad.

5.5.4. Saturación residual y curva de capilaridad

La presión de entrada y saturación residual son dos parámetros importantes para la determinación de las condiciones de operación de un filtro industrial. Se denomina *presión de entrada* la mínima presión necesaria para comenzar a desaguar un queque saturado. Su importancia es que da una cota inferior para la presión de soplado. La *saturación residual* es aquella que no disminuye al aumentar la presión. Este parámetro da una cota superior para la presión de soplado y una cota inferior para la humedad posible de obtener.

Correlación para la saturación residual

Según Wakeman, la saturación residual se puede calcular en términos del número de capilaridad mediante las siguientes ecuaciones:

$$S_{\infty} = 0.155(1 + 0.031 N_{cap}^{-0.49})$$

$$N_{cap} = \frac{\varepsilon_{av}^3 \bar{x}_{12}^{-2} \Delta p_e}{(1 - \varepsilon_{av})^2 \ell \gamma}$$

Donde N_{cap} es el número de capilaridad, ε_{av} y ℓ son la porosidad promedio y el espesor del queque, \bar{x}_{12} es el tamaño promedio volumétrico-superficial de las partículas, Δp_e es la caída de presión a través del queque y γ es la tensión superficial del líquido.

5.5.5. Permeabilidad relativa

Definimos con anterioridad la permeabilidad relativa en el tiempo t como la razón entre la permeabilidad del agua y del aire para ese tiempo y la permeabilidad del queque saturado. Esta última es una propiedad del medio poroso exclusivamente.

Para calcular las permeabilidades relativas del agua y del aire durante la etapa de soplado, es necesario conocer los flujos de agua y aire en función del tiempo durante esta etapa.

CAPÍTULO 6

TECNOLOGÍA CERAMEC

6.1. TEORÍA DE FILTRACIÓN

6.1.1. Ley de Darcy

Al inicio, la resistencia a la filtración es causada únicamente por el medio filtrante debido a que el coque aún no se ha formado. El flujo se asume que es laminar debido a que el tamaño del medio poroso es pequeño y por el bajo flujo del filtrado. El flujo se describe por la Ley de Darcy:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{B \Delta p A}{\mu l} \quad [6.1]$$

Donde:

dv / dt :	Flujo volumétrico del filtrado	(m ³ /s)
B:	Permeabilidad específica del medio	(m ²)
Δp :	Diferencia de presión	(Pa)
A:	Área de la superficie de filtración	(m ²)
μ :	Viscosidad dinámica del filtrado	(Pa.s)
l :	Espesor del medio filtrante	(m)

La ecuación [6.1] es a menudo expresada de la siguiente forma:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\Delta p A l}{\mu R_m} \quad [6.2]$$

Donde:

R_m : resistencia del medio filtrante = (l / B)

La fuerza impulsora en la filtración es la caída total de presión (Δp), la cual consiste de la caída de presión originada por el queque y el medio filtrante. Si tomamos en cuenta la resistencia del queque, se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\Delta p A}{\mu(R_m + R_c)} \quad [6.3]$$

Donde:

R_c : resistencia del queque formado

La resistencia del medio filtrante usualmente se asume que permanece constante. Sin embargo, en la práctica el medio filtrante se obstruye durante la filtración incrementándose la resistencia. Si el fenómeno de obstrucción ocurre en la superficie del medio filtrante se formará una capa delgada de película, la cual puede considerarse como una capa independiente. La resistencia de esta capa puede ser descrita del mismo modo que la resistencia del medio filtrante y del queque formado. En este caso, la ecuación [6.4] es expresada de la siguiente forma:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\Delta p A}{\mu(R_m + R_c + R_f)} \quad [6.4]$$

Donde.

R_f : resistencia de la capa obstruida.

Adicionalmente a la diferencia de presión y al área de la superficie de filtrado, el flujo de filtrado es afectado también por la permeabilidad específica (B), el espesor del medio filtrante (l) y por la viscosidad del filtrado (μ). Estos factores son estudiados con más detalle a continuación.

B es la permeabilidad del medio filtrante y tiene como unidad (m^2). R es la resistencia del flujo a través del medio filtrante y tiene como unidad (m^{-1}).

En la tabla 6.1 se muestra algunos ejemplos de la resistencia de diferentes tipos de placas para el agua a 20°C calculado a partir de la ecuación [6.2].

Tabla 6.1 Características de diversas placas a 20°C
(Cortesía de Outokumpu Técnica Perú Ltda.)

TIPO DE PLACA	dv/dt (l / m ² h)	B (m ²)	Espesor de la Membrana (mm)	R (m ⁻¹)
K-III-OX	700	5.25E-12	2.7	5.14E+11
M66	1300	9.75E-12	2.7	2.77E+11
S3	1700	1.42E-12	0.3	2.12E+11
S1	6500	5.42E-12	0.3	5.50E+10

Los valores de B y R de los materiales son valores específicos que se mantienen constantes independientemente de los parámetros de filtración. Sin embargo, el criterio de que el flujo a través del material poroso es laminar significa que la velocidad del flujo aumenta linealmente en función a la diferencia de presión.

6.1.2. Superando las tres Resistencias

El valor R_m del medio filtrante será constante durante el proceso de filtración debido a la dureza del material cerámico que hace que no se deforme el medio filtrante ni cambie el tamaño de los poros.

Al inicio del periodo de formación del queque el valor de R_c es cero. Cuando el queque está formado sobre el medio filtrante el valor de R_c se incrementa con el espesor del queque.

Cuando un filtro opera con un medio filtrante 100% limpio, el valor de R_f es cero. R_f se incrementará en función del tiempo hasta alcanzar un valor crítico para la capacidad requerida del filtro y la regeneración del medio filtrante.

La relación entre las tres diferentes resistencias y su dependencia con el tiempo es ilustrado en la siguiente figura 6.1, en términos del tiempo de operación a partir de placas limpias.

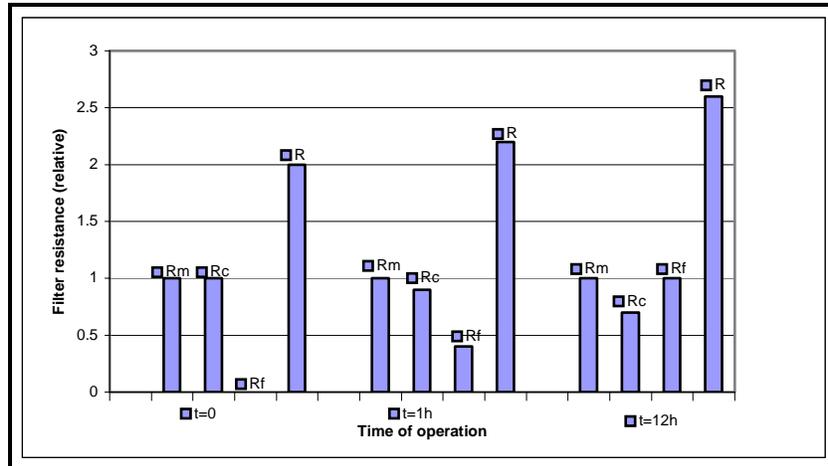


Figura 6.1 Relación entre las resistencias R_c , R_m y R_f en función del tiempo de operación. Para $t = 0$, el filtro ha empezado a operar y la placa se encuentra 100% limpia. Para $t = 12h$ la placa cerámica se encuentra saturada y necesita ser lavada (Cortesía de Outokumpu Técnica Perú Ltda.)

Nótese que la disminución de la resistencia del queque formado es una consecuencia de la formación de un queque delgado causado por efecto de la obstrucción de la placa. Este es el caso cuando el filtro es operado con parámetros constantes. En la práctica, sin embargo, la pérdida en producción puede ser compensada ajustando por ejemplo el nivel de la tina, de esta manera se incrementa la formación del queque.

6.1.3. Influencia de la viscosidad en la filtración

La viscosidad tiene una influencia considerable en la filtración porque puede variar significativamente de un proceso a otro debido a las diferencias de temperaturas. En algunos lugares la temperatura de operación puede variar entre 10°C y alcanzar hasta 60°C . La viscosidad del agua es muy diferente a las temperaturas anteriormente mencionadas.

Las sales disueltas y los materiales orgánicos incrementan la viscosidad. Este último incrementa la viscosidad a muy bajas concentraciones. Estos materiales son por ejemplo floculantes y surfactantes que son usualmente materiales de cadena molecular larga. Combinado con bajas temperaturas, estos materiales tienen una influencia dramática sobre la viscosidad.

Cuando estudiamos la influencia de la viscosidad sobre la filtración tenemos que diferenciar dos casos:

a) Filtración a Presión

Si la filtración es llevada a cabo con una presión constante la velocidad de filtración se incrementará con el aumento de la temperatura como consecuencia de la disminución de la viscosidad.

La siguiente figura muestra la viscosidad y la variación relativa del filtrado (comparado a 20 °C) en función de la temperatura para agua pura.

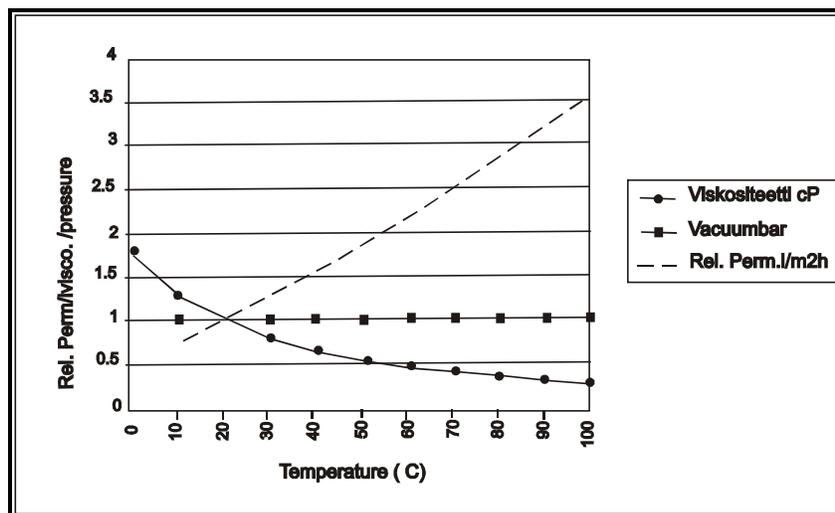


Figura N° 6.2 Viscosidad y variación relativa de filtración en función de la temperatura del agua. La diferencia de presión es constante 1 bar dentro de todo el rango. A 100 °C la variación es 3.5 veces a 20°C. (Cortesía de Outokumpu

Técnica Perú Ltda.)

b) Filtración al Vacío

En filtración al vacío la situación es más compleja debido a que el punto de ebullición del líquido disminuirá con el incremento de la temperatura, reduciendo la diferencia de presión efectiva para la filtración.

La figura N°6.3 muestra variación relativa de filtración y el vacío efectivo en función de la temperatura. La máxima variación se obtiene a una temperatura de 65°C. A temperaturas mayores la pérdida de vacío tendrá mucho mayor efecto sobre la variación antes que la disminución de la viscosidad.

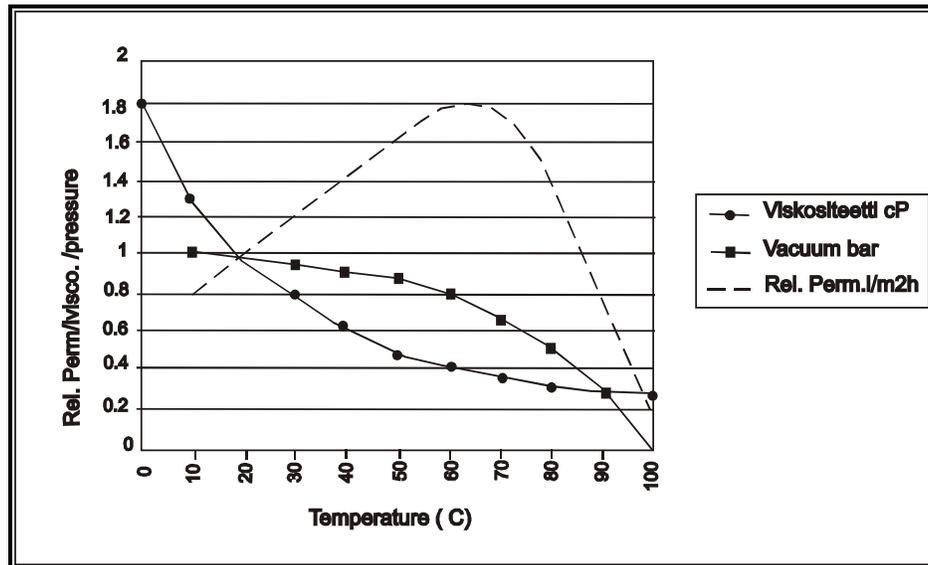


Figura N° 6.3 Variación relativa de filtración y vacío efectivo en función de la temperatura del agua. Máxima variación se obtiene a 65°C (Cortesía de Outokumpu Técnica Perú Ltda.)

6.1.4. Permeabilidad del medio filtrante vs. el porcentaje de sólidos en la pulpa

La capacidad de un filtro es normalmente expresada en kilogramos por m² (área de la superficie de filtración o por la cantidad de sólidos producidos por unidad de tiempo dividido por el área total de la superficie de filtración). Un ciclo

normal de filtrado dura alrededor de 30-50 segundos y puede ser dividido en diferentes etapas. La primera etapa es la formación del queque en el recipiente de la pulpa. Esta etapa dura entre 10-30 segundos, y todos los sólidos que son separados por el filtro durante un ciclo es adherido como queque durante esta etapa.

El periodo de formación del queque es rápido al inicio de la filtración debido a que la resistencia al flujo sólo lo realiza la placa cerámica. Asimismo, la resistencia del flujo crece a medida que se incrementa el espesor del queque y la formación del queque disminuye. Si el material filtrado es muy grueso (por ejemplo, concentrado de hierro), la resistencia del flujo en el queque es pequeña. El queque se forma a velocidad casi constante durante el tiempo que la placa cerámica se encuentra sumergida en la tina. En situaciones extremas, el espesor del queque puede alcanzar 20mm. El otro material extremo son las pulpas de pigmentos (caolín, dióxido de titanio). En este caso, el espesor del queque obtenido es de 1-3 mm, la resistencia del flujo es extremadamente alta. La necesidad de remover agua es alta durante la etapa de formación del queque.

La siguiente etapa es el secado. Cuando el queque sale de la tina, su contenido de agua es 20-30% dependiendo cuan fino es el material. El agua es removida del queque durante la etapa de secado hasta alcanzar una humedad promedio de 8-10%. En otras palabras, considerablemente menor cantidad de agua es removida durante la etapa de secado que durante las etapas previas. Si por ejemplo, la capacidad de un filtro para una pulpa a 60%S es 800 Kg/m²/h (calculado como 100% material seco) y la humedad del queque es 8%, el total del filtrado en un disco de 3m² es de 1391 l/h. De esta cantidad 1000 l/h es removido durante la formación del queque y 391 l/h durante la etapa de secado.

Las siguientes etapas son la remoción del queque y retrolavado, durante el cual la placa cerámica no produce más queque. Una pequeña parte del queque cae a la tina con pulpa durante la descarga debido al espacio muerto de los

raspadores. El agua es bombeada a través de la placa cerámica durante el retrolavado y esta se mezcla con la pulpa. El agua de retrolavado depende básicamente de la velocidad de rotación del tambor y las condiciones de la placa.

Un simple balance de masa para el agua y los sólidos filtrados se realiza sobre la base del proceso:

Los siguientes puntos de partida son determinados:

1. m_i kg / h pulpa con una concentración de sólidos C_i es bombeado dentro del filtro.
2. m_k kg / h queque con concentración de sólidos C_k sale del filtro.
3. m_s kg/h filtrado con una concentración de sólidos $C_s = 0$ que sale del filtro.
4. m kg / m^2h es la capacidad específica de sólidos secos del filtro.
5. La influencia de queque residual es ignorada.
6. El agua de retrolavado no es considerado.
7. El área de formación del queque es 40% el área de filtración del disco.
8. La resistencia al flujo del medio filtrante es considerablemente mayor que la resistencia del queque.

Determinando el balance de masa para el líquido y sólido y combinando ambos se obtiene la siguiente expresión para la capacidad de formación de queque:

$$m_s/A_f = (m/0.4*C_k)*(C_k(1-C_i)/C_i-(1-C_k)) \quad [6.5]$$

La siguiente figura muestra la mínima permeabilidad requerida, calculada de la ecuación anterior para alcanzar una capacidad específica de sólidos (m). Como se puede ver de la figura, un metro cuadrado de capacidad de 1000 kg/ m^2h para un 60% de pulpa puede ser alcanzado con una permeabilidad de aprox. 1000

l/m^2h . En el caso de una pulpa de 40% una capacidad hidráulica de $3000 l/m^2h$ es requerida para producir la misma capacidad de sólidos secos.

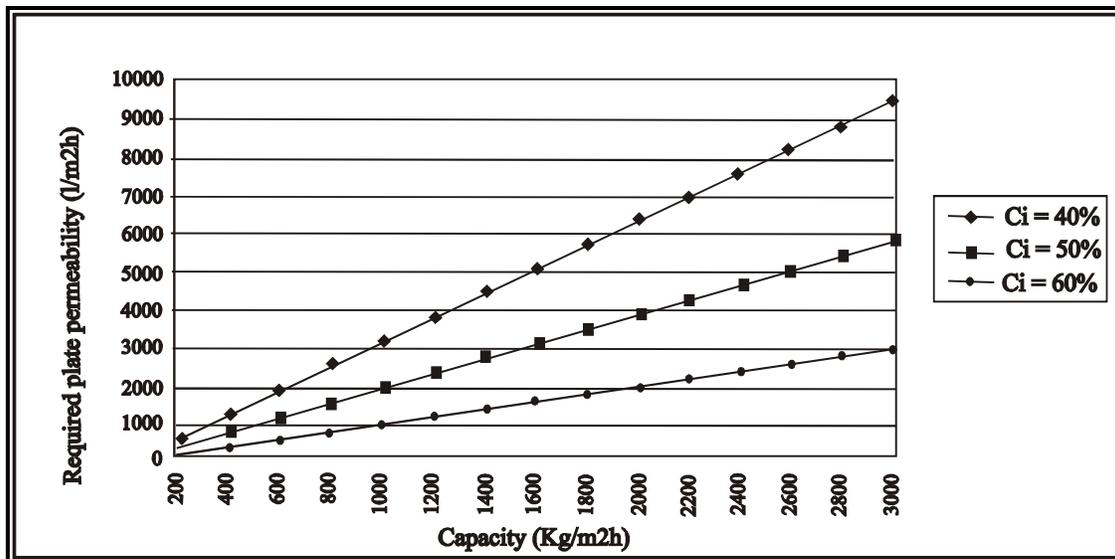


Figura N° 6.4 La mínima permeabilidad requerida para producir diferentes capacidades de sólidos cuando la concentración de sólidos en la pulpa de alimentación C_i es 40%, 50% y 60% (Cortesía de Outokumpu Técnica Perú Ltda.)

6.1.5. Influencia del tamaño y forma de las partículas

La resistencia del queque aumenta rápidamente con la disminución del tamaño de partículas. Partículas gruesas como las partículas de magnetita provocan una resistencia pequeña del queque y en consecuencia grandes ratios de queque.

Cuando se filtran pigmentos, partículas de tamaño de un micrón o menor, la resistencia del queque es el cuello de botella para el proceso de filtrado. Ejemplos de estos materiales son el caolín, la calcita y el gypsum. La forma de las partículas también tiene una gran influencia en la filtración. Las partículas más difíciles de tratar presentan forma de escamas como el caolín o talco.

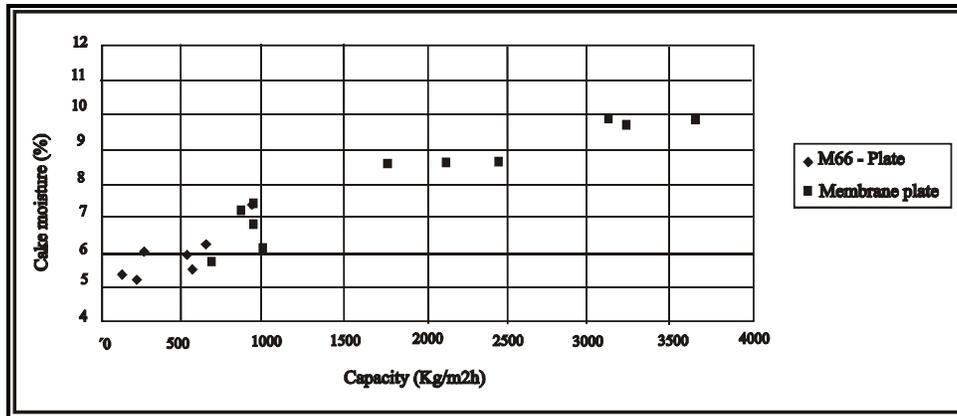


Figura 6.5 Humedad del queque versus capacidad para un concentrado de magnetita al 60%S. La distribución del tamaño de partícula de los sólidos es 99.6% < 250 μm , 95.3% < 125 μm , 76.8% < 63 μm , 64.3% < 45 μm , 42.8% < 20 μm . (Cortesía de Outokumpu Técnica Perú Ltda.)

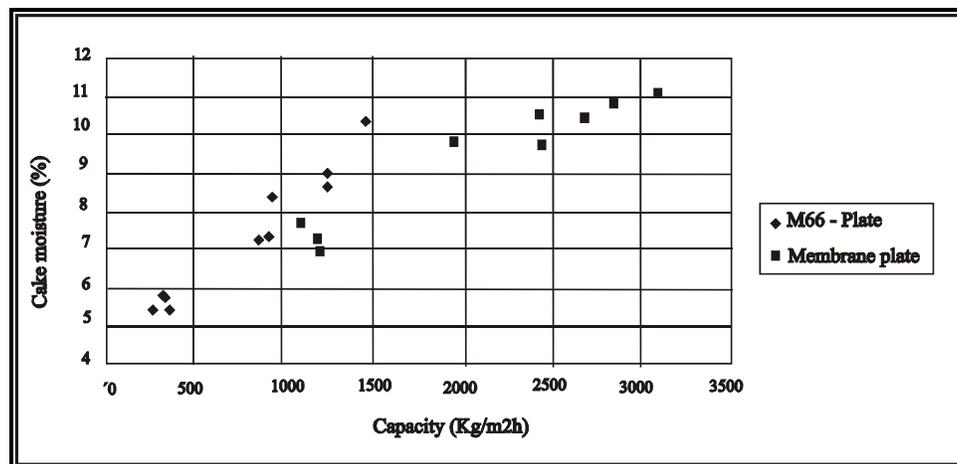


Figura 6.6 Humedad del queque versus capacidad para un concentrado de magnetita al 60%S. La distribución del tamaño de partícula de los sólidos es 96.8% < 63 μm , 86.2% < 45 μm , 52.5% < 20 μm . (Cortesía de Outokumpu Técnica Perú Ltda.)

6.1.6. El fenómeno capilar y su influencia en la filtración capilar

La filtración capilar es un proceso de filtración basado en la diferencia de presión (bajo o sobre presión), donde el agua es removida completamente en fase líquida. En otras palabras, el gas alrededor del filtro no puede penetrar el medio

filtrante. La razón para esto es el principio llamado *Acción Capilar*, la fuerza es calculada por el tamaño de poro del medio filtrante, la tensión superficial del líquido y el ángulo de contacto entre el líquido y el medio filtrante. La relación entre estos factores se expresa por la siguiente ecuación:

$$\Delta p = \frac{4\tau \cos\theta}{D} \quad [6.6]$$

Donde:

Δp :	Presión del punto de burbujeo	(bar)
τ :	Tensión superficial del líquido	(N/m)
θ :	Ángulo de mojado	(°)
D:	Diámetro de poro	(m)

El punto de presión de burbujeo es la diferencia de presión del aire a la cual el material poroso saturado con líquido empieza a penetrar el aire. Los medios filtrantes empleados en la filtración capilar tienen de 1.0 - 1.2 bar de presión de burbujeo para filtros CC y de 3.0 - 3.2 bar para filtros PC.

La tensión superficial del agua pura es 0.073 N/m. La tensión superficial decrece con el incremento de la temperatura, siendo 0.068 N/m a 50°C.

El ángulo de mojado es el ángulo que la superficie del líquido forma con la superficie mojada de un material sólido. Si el ángulo es muy pequeño (0 - 10°C) estamos hablando de materiales mojados o materiales hidrofílicos. Un buen ejemplo de estos materiales es el agua y el óxido de aluminio. Si el ángulo de mojado es mayor a 60° se referirá a materiales repelentes o hidrofóbicos. Un ejemplo de esto es el agua y el teflón.

La siguiente figura muestra la presión del punto de burbujeo en función del tamaño de los poros para dos tensiones superficiales diferentes de acuerdo a la fórmula de acción capilar, se asume que el ángulo de mojado es 10°

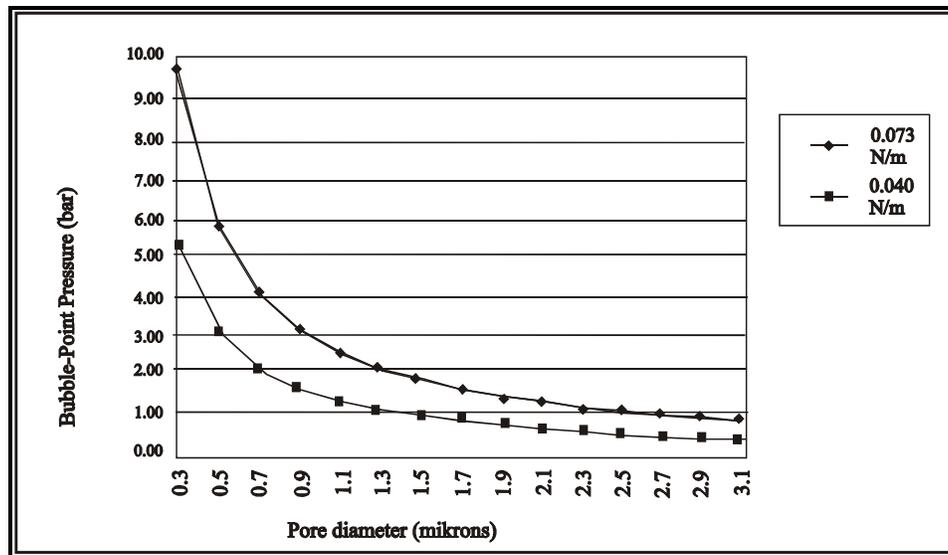


Figura 6.7 Presión del punto de burbujeo (p) en función del diámetro (D) y de la tensión superficial (τ) (Cortesía de Outokumpu Técnica Perú Ltda.)

6.2. FILTRO CERÁMICO A PRESIÓN CERAMEC PC

6.2.1. Descripción

El filtro a presión CERAMEC PC ha sido desarrollado para aplicaciones que requieren altas diferencias de presión para maximizar la separación sólido / líquido, operando con una presión positiva superior a los 3 bar.

El filtro a presión deseca pulpas de concentrados sin permitir el paso del aire. La fuerza impulsora del filtrado se forma por la diferencia de presión entre la presión suministrada al equipo y la presión que se produce dentro de la placa.

El medio filtrante se sumerge en un recipiente que contiene pulpa de concentrado, los materiales sólidos se van adhiriendo a la superficie de la placa por la fuerza de la acción capilar, la cual obliga al agua a elevarse en forma de poros finos y discurrir a través de los poros de la placa impidiendo el paso del aire.

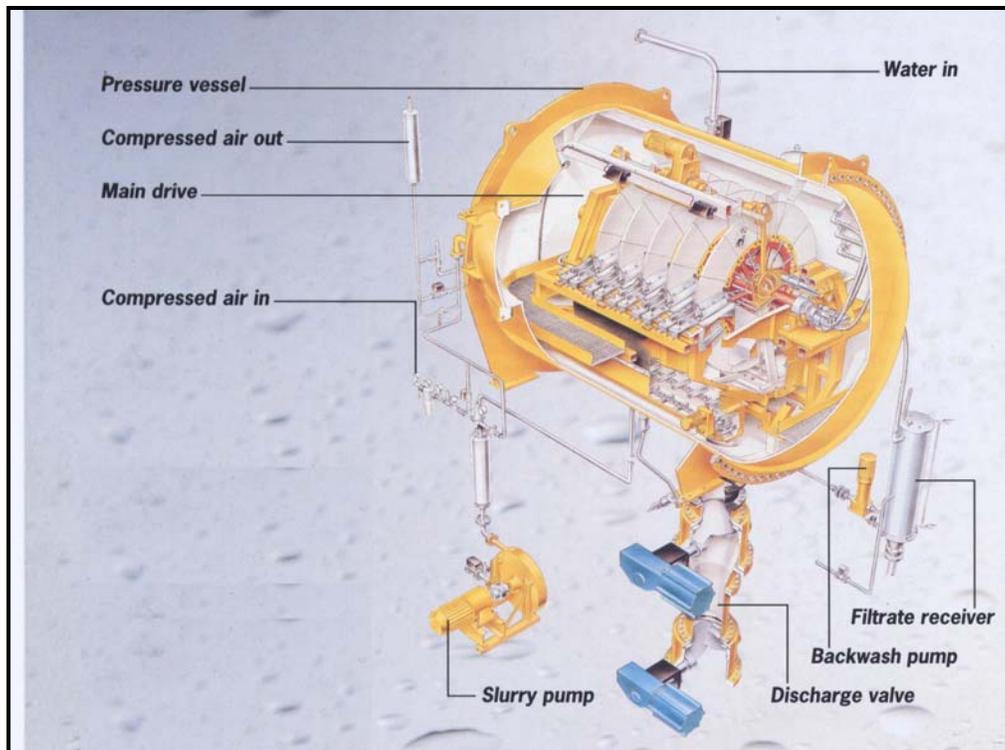


Figura 6.8 Esquema del filtro a presión CERAMEC PC (Cortesía de Outokumpu Técnica Perú Ltda.)

6.2.2. Medio filtrante

El medio filtrante es una placa cerámica en forma de un disco y está formada por microporos uniformes de alúmina sinterizada microporosa. Este material es hidrofílico y posee un tamaño de poro menor a $2.0 \mu\text{m}$, que crea la Acción Capilar.

El medio filtrante posee dos partes: una membrana cerámica y un sustrato. La membrana cerámica es delgada y permite maximizar la velocidad de la solución filtrada, el tamaño promedio de poro está comprendido entre 0.25 a $0.7 \mu\text{m}$. El sustrato recubre la membrana cerámica y brinda a la placa dureza y resistencia para soportar las fuerzas mecánicas desarrolladas en la filtración del queque. El sustrato tiene un mayor tamaño de poro para minimizar la resistencia del flujo. Dentro del sustrato existen conexiones a través de canales de drenaje para un mejor desaguado.

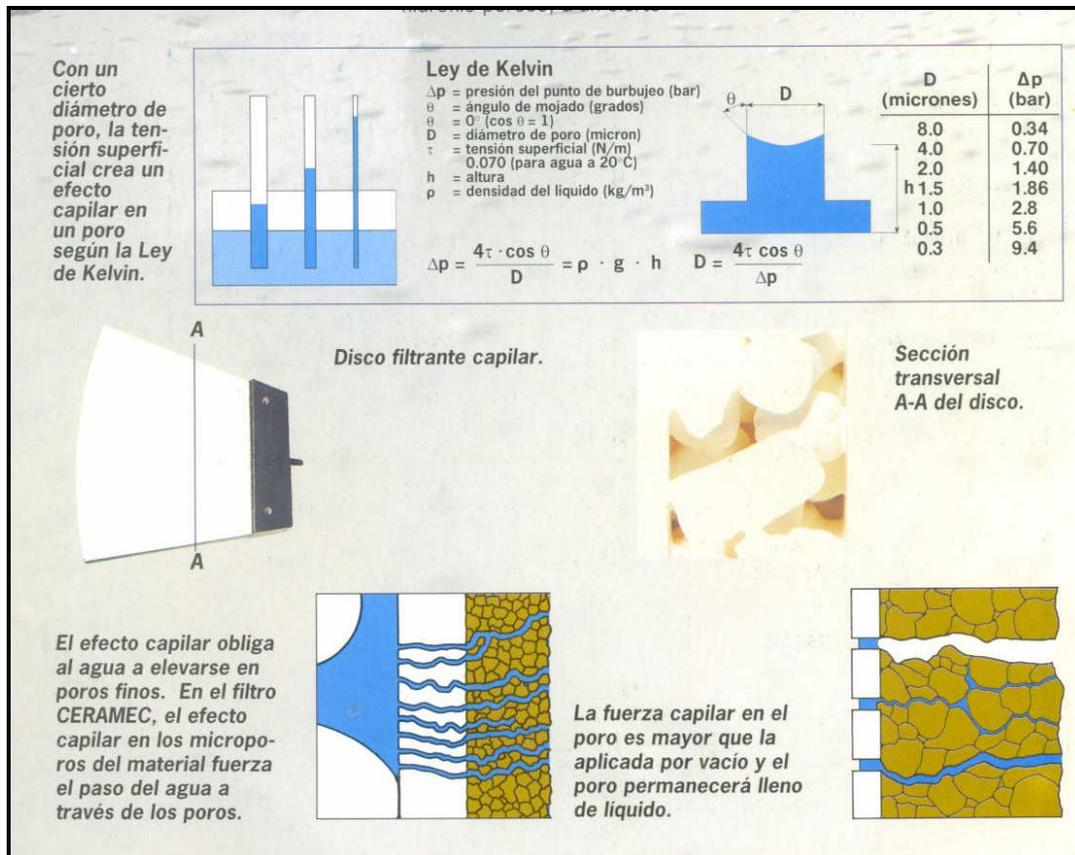


Figura 6.9 Características del medio filtrante
 (Cortesía de Outokumpu Técnica Perú Ltda.)

La filtración es removida desde el fondo de la placa a través de un canal. La placa ha sido instalada en el filtro con un alto grado de exactitud para lograr un apropiado alineamiento de la placa. Para encontrar este requerimiento se emplean dos aceros de alta precisión montados rápidamente en el centro de la placa. Las partes inactivas de la placa, el cual no están sobrepuestas para coleccionar algún queque son selladas con un polímero resistente a la corrosión y abrasión. La construcción de la membrana cerámica de la placa del filtro es observada en la figura 6.10.

6.2.3. Estructura y propiedades de la placa cerámica

Cómo construir una placa cerámica?

El principio de la fabricación de las placas cerámicas porosas se basa en la unión de tres granos de un material resistente y duro como una piedra que forman entre sí un hueco por el cual fluye el líquido. Al colocar más granos juntos se consigue más huecos, es decir, más poros. Este es un *medio filtrante*.

Para entender mejor el fenómeno capilar podemos decir que grandes granos dan lugar a grandes agujeros. Grandes agujeros significan bajo punto de presión de burbujeo y no alcanzar lo que se está buscando. Conseguir que los granos sean hidrofílicos permitirá alcanzar altos puntos de presión de burbujeo. Y si esto no es suficiente, buscar granos más pequeños. Colocar pequeños granos juntos conllevará a formar agujeros pequeños con puntos de presión de burbujeo más altos.

El siguiente paso es que estos granos se mantengan unidos, para ello es necesario fundir la estructura para que se forme una unión fija entre los granos. Este es un tipo de medio filtrante que trabaja en los filtros CC.

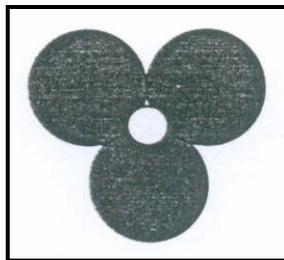


Figura 6.10 Tres granos y un agujero
(Cortesía de Outokumpu Técnica Perú Ltda.)

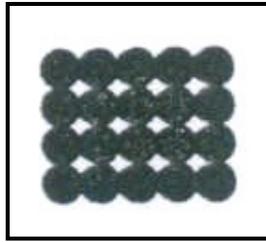


Figura 6.11 Pequeños granos y pequeños agujeros
(Cortesía de Outokumpu Técnica Perú Ltda.)

a) Fabricación de la placa cerámica

La capacidad hidráulica no es suficientemente alta porque existen demasiados granos encima de cada uno de ellos. Al reducir la capa de granos mejora la capacidad hidráulica sin embargo, el material no es consistente.

Al colocar una capa delgada de granos pequeños sobre granos grandes se consigue aumentar la presión de burbujeo y la capacidad hidráulica.

La capacidad hidráulica y el punto de presión de burbujeo dependen de los granos pequeños y la resistencia mecánica de los granos grandes. La unión de ambos da origen a la *membrana de la placa cerámica*.

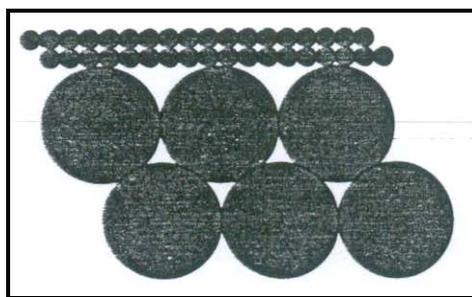


Figura 6.12 Granos grandes y granos pequeños
(Cortesía de Outokumpu Técnica Perú Ltda.)

En los filtros que trabajan a presión como los PC, se necesita mayor presión de burbujeo, para ello es necesario granos mucho más pequeños que formen una capa sobre los granos más grandes.

b) Las placas cerámicas

Las placas cerámicas son construidas de acuerdo a los principios anteriormente descritos. Sin embargo, los granos son de óxido de aluminio que está lejos de tener una forma ideal esférica y una distribución de tamaño de partículas uniformes como se consideró en el modelo.

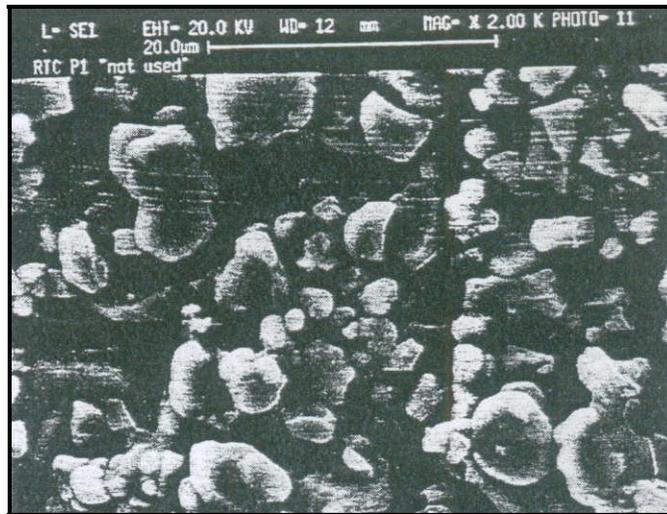


Figura 6.13 SEM imagen de la superficie de la membrana (aumento 2000)
(Cortesía de Outokumpu Técnica Perú Ltda.)

c) Tipos de placas cerámicas

La placa azul – M66

La placa M66 es fabricada mediante *fundición*, obteniéndose un medio filtrante con paredes de espesores de 3mm. Con este método de manufactura se alcanza un límite en la capacidad hidráulica. Por otro lado la ventaja de esta placa es que la superficie puede ser pre-maquinada otorgando a la placa una superficie plana y muy lisa.

Las propiedades generales de la placa M66 se observan en la siguiente tabla.

Tabla 6.2 Propiedades de la placa M66
(Cortesía de Outokumpu Técnica Perú Ltda.)

Parámetros	Unidad	Placa M66
Permeabilidad	l / m ² h	1400($\Delta p = 1\text{bar}$)
Punto de presión de burbujeo	bar	1,1
Presión de rotura	bar	15
Fuerza Cantilever	N	1400
Dureza	Kg / mm ²	120
Tamaño promedio de poro	μm	0,5
Espesor de la placa	mm	24
Espesor de la membrana	mm	3

La placa Gris (1 bar), Placa Verde (3 bar)

La membrana de esta placa cerámica es fabricada usando un método diferente al de la placa M66. Su estructura interna gruesa ha sido formada en una operación de prensa y la membrana en un proceso de recubrimiento de capa.

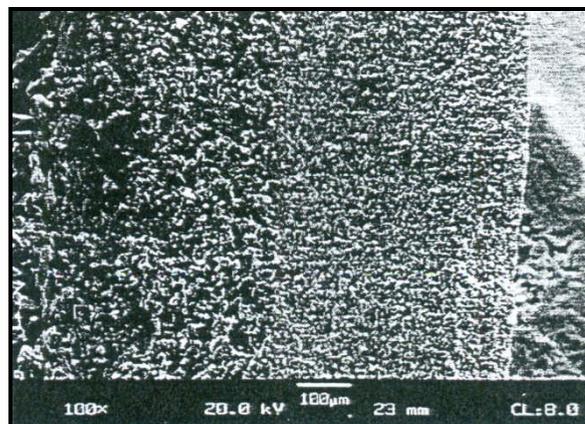


Figura 6.14 Sección transversal de una membrana (Cortesía de Outokumpu Técnica Perú Ltda.)

Una gran ventaja de este método es el grado de libertad en otorgar a la placa diferentes propiedades. Las características del sustrato y la membrana pueden ser cambiadas independientemente, lo cual conlleva a obtener un mejor control del producto y del proceso de fabricación.

La dificultad de este proceso radica en controlar las características de la superficie cerca de los valores de tolerancia, porque no se puede realizar operaciones de pre-maquinado debido a que la membrana es muy delgada. Las propiedades de ambas placas cerámicas al vacío (1 bar) y a presión (3 bar), son detalladas en la siguiente tabla.

Tabla 6.3 Propiedades de las placas cerámicas
(Cortesía de Outokumpu Técnica Perú Ltda.)

Parámetros	Unidades	Placa S1	Placa S3
Permeabilidad	l/m ² h	6000($\Delta p = 1\text{bar}$)	6000($\Delta p = 3\text{bar}$)
Punto de presión de burbujeo	bar	1.2	3.2
Presión de rotura	bar	15	15
Fuerza Cantilever	N	1700	3500
Dureza	Kg / mm ²	150-200	120-150
Tamaño promedio de poro	μm	0.7	0.25
Espesor de la placa	mm	24	30
Espesor de la membrana	mm	0.5	0.5

6.2.4. Etapas del Proceso de Filtración a presión

a) Formación del Queque

El disco micro poroso rota por la suspensión, la acción capilar se inicia inmediatamente sin fuerza externa. Un sistema de presurización facilita el

desaguado a través de la placa cerámica a la línea de filtrado, mientras que los sólidos se acumulan rápidamente en el exterior de la placa, la estructura microporosa impide tanto a los sólidos como al aire penetrar la superficie de la placa.

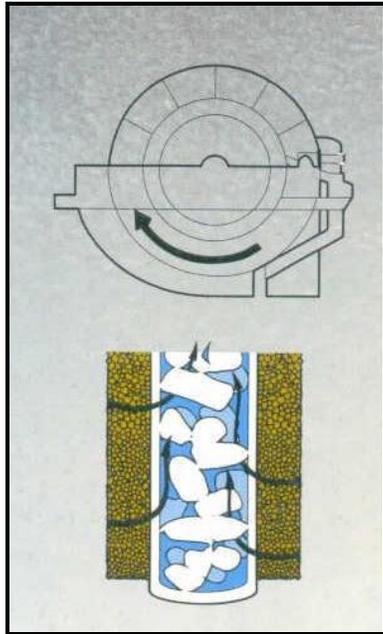


Figura 6.15 Etapa de formación del queque

b) Lavado del Queque

El líquido de lavado es pulverizado uniforme y cuidadosamente sobre los sólidos del queque, continuando el efecto de acción capilar, este proceso permite eliminar impurezas logrando un lavado de reposición.

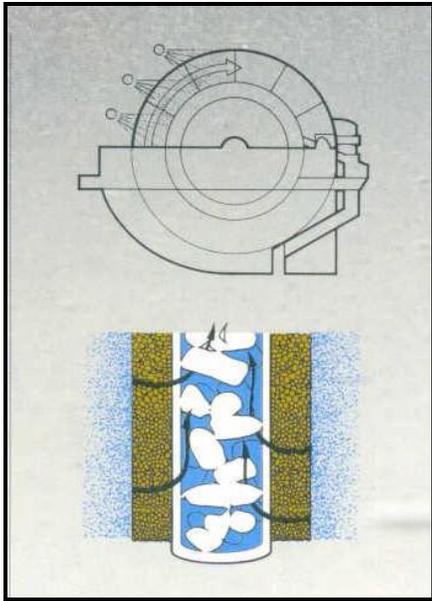


Figura 6.16 Etapa de lavado del queque

c) Secado del Queque

El secado del queque se produce ininterrumpidamente por la acción capilar a través de la superficie de la placa cerámica expuesta a la presión del proceso hasta que todo el líquido libre sea retirado de los sólidos.

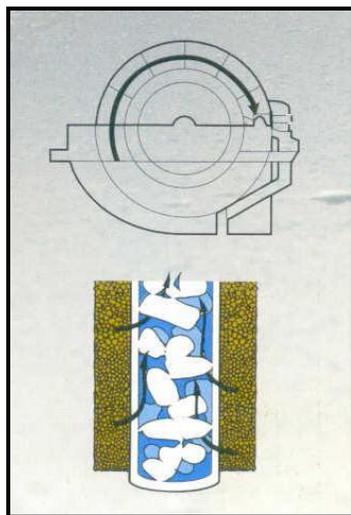


Figura 6.17 Etapa de secado del queque

d) Descarga del Queque

Un par de raspadores retiran el queque de la placa cerámica dejando una fina capa (heel) de sólidos en la superficie de la placa. Ésta capa protectora actúa como protección contra la abrasión mecánica.

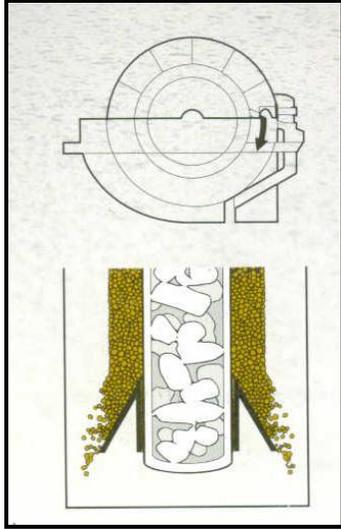


Figura 6.18 Etapa de descarga del queque

e) Retrolavado

Durante esta etapa se utiliza agua potable para lavar la placa, retirando el queque residual y limpiando la estructura microporosa de la placa, asegurando un mejor filtrado y alargando la vida útil de la placa.

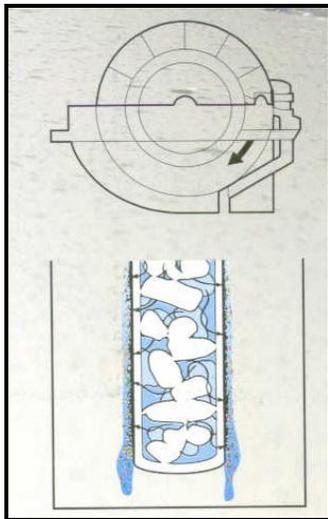


Figura 6.19 Etapa de retrolavado del queque

f) Limpieza Automática periódica

Los filtros CERAMEC constan de un sistema de limpieza ultrasónica automática para los discos, la cual evita la saturación de los poros en las placas. El sistema de limpieza ultrasónica puede ser utilizado sobre una base sistemática o periódica, solo, o en combinación con una limpieza química.

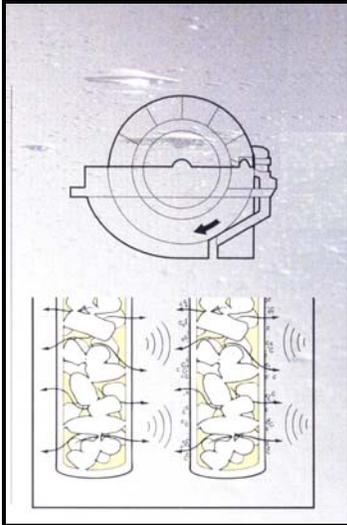


Figura 6.20 Etapa de limpieza automática del queque

CAPÍTULO 7

DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS

Las pruebas experimentales se llevaron a cabo en un filtro cerámico minipiloto, las cuales se desarrollaron en dos modalidades: filtración al vacío y filtración a presión.

Originalmente el diseño del equipo corresponde a un filtro a presión, sin embargo, dadas las condiciones técnicas para hacerlo trabajar al vacío se procedió a realizar éstas pruebas.

La diferencia entre ambas formas de filtración es el tipo de fuerza que se aplica (vacío o presión) al medio filtrante (placa cerámica) para ayudar al desaguado de los poros.

La placa cerámica empleada es la misma para las dos modalidades de filtración.

7.1. PRUEBA DE FILTRACIÓN A PRESIÓN

Al realizar una prueba de filtración a presión, el filtro opera herméticamente cerrado a fin de mantener el recipiente presurizado. La separación sólido / líquido ocurre por la diferencia de presión existente entre los poros del medio filtrante y la presión suministrada al equipo. El filtro trabaja a una presión positiva superior a los 3 bares.



Figura 7.1 Filtro cerámico minipiloto (Donado por Outokumpu Técnica Perú, Laboratorio de Procesamiento de Minerales – UNI)

La alimentación de la pulpa al filtro se realiza desde un agitador de 20 l de capacidad a través de una bomba neumática de doble diafragma. La pulpa es colectada en el interior de la cámara presurizada, en un recipiente de 1,5 l de capacidad.

Las pruebas de filtración consisten en mantener la presión de operación y el volumen de pulpa en la tina constantes por cada periodo de prueba. A medida que transcurre el tiempo, las partículas se adhieren a la placa cerámica, formándose el queque; el cual es retirado de ella mediante un par de raspadores para luego ser almacenado en un tubo de descarga. Asimismo, la solución filtrada es recolectada en un matrás a fin de medir el volumen que se obtiene en cada periodo de prueba.

La descarga del queque se realiza mediante un juego de dos válvulas tipo mariposa que posee el tubo de descarga, con el objetivo de mantener el equipo presurizado.

7.2. PRUEBA DE FILTRACIÓN AL VACÍO

Para la filtración al vacío, el filtro necesita una bomba de vacío, el proceso de filtrado lo genera el efecto de Acción Capilar. La fuerza capilar en el poro es mayor que la aplicada por el vacío y el poro permanecerá lleno de líquido, impidiendo el paso del aire por la placa.

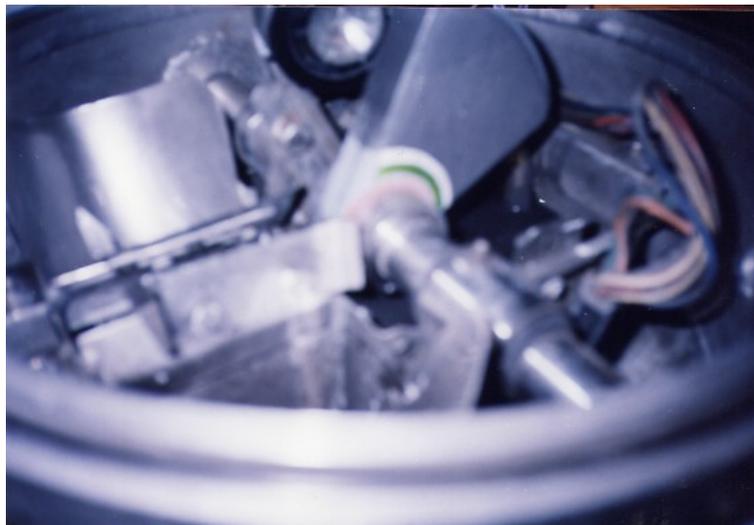


Figura 7.2 Formación del queque al vacío (Filtro cerámico minipiloto, Laboratorio de Procesamiento de Minerales – UNI)

En la filtración al vacío, la alimentación de la pulpa al filtro se realiza bajo dos modalidades: desde el agitador mediante una bomba o manualmente a través de un recipiente que es agitado periódicamente. Para una mejor facilidad de operación, el filtro puede trabajar sin tapa y sin el sistema de descarga del queque.



Figura 7.3 Descarga del queque de una prueba de filtración al vacío

7.3. PRUEBA DE FILTRACIÓN LEAF TEST

El Leaf test es una prueba de filtración al vacío a nivel laboratorio, empleado para determinar y optimizar las características del medio filtrante a fin de mejorar el proceso de filtración a nivel industrial. El Leaf test está conformado por una placa cerámica rectangular con características similares a las placas empleadas en la filtración con el equipo minipiloto.

La pulpa es vertida en un recipiente plástico y agitada manualmente desde la parte inferior en forma constante. La placa es colocada en forma perpendicular a fin de asemejar el funcionamiento con el equipo minipiloto.

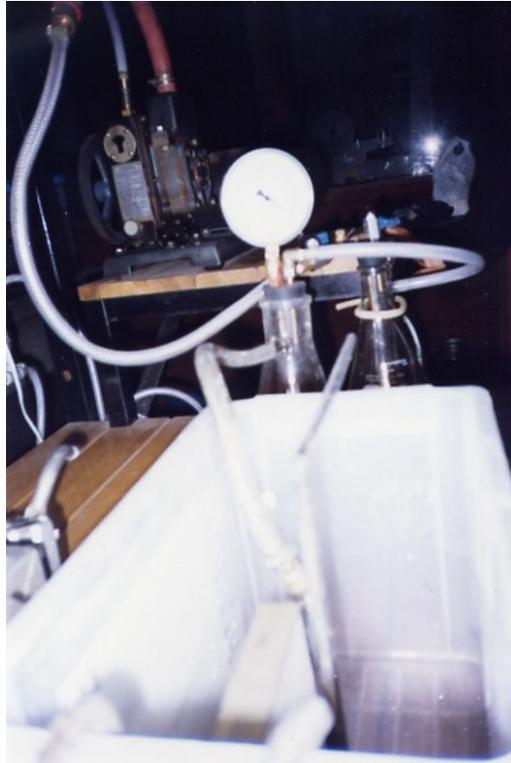


Figura 7.4 Prueba de filtración Leaf test

Las partículas en suspensión se adhieren a las paredes de la placa a medida que se incrementa el gradiente de presión originado por la bomba de vacío suministrada por la bomba de vacío a través del efecto de acción capilar.

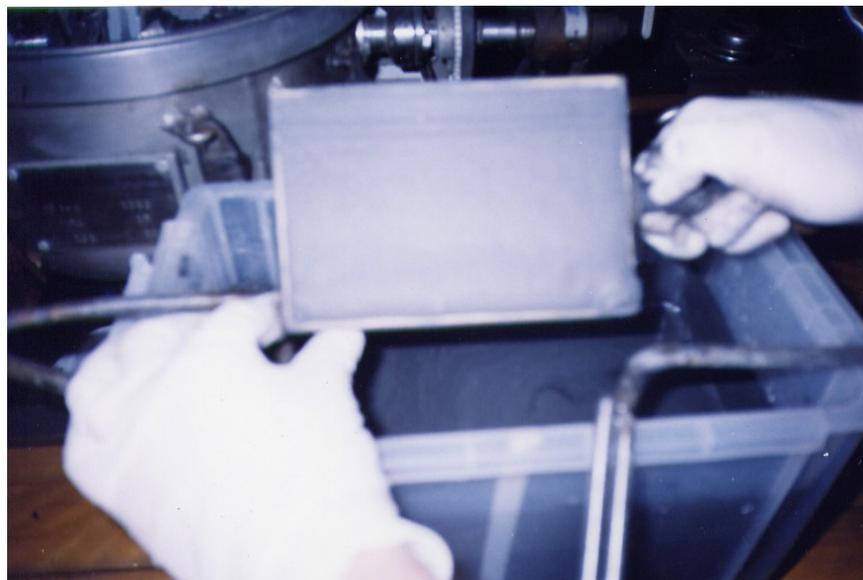
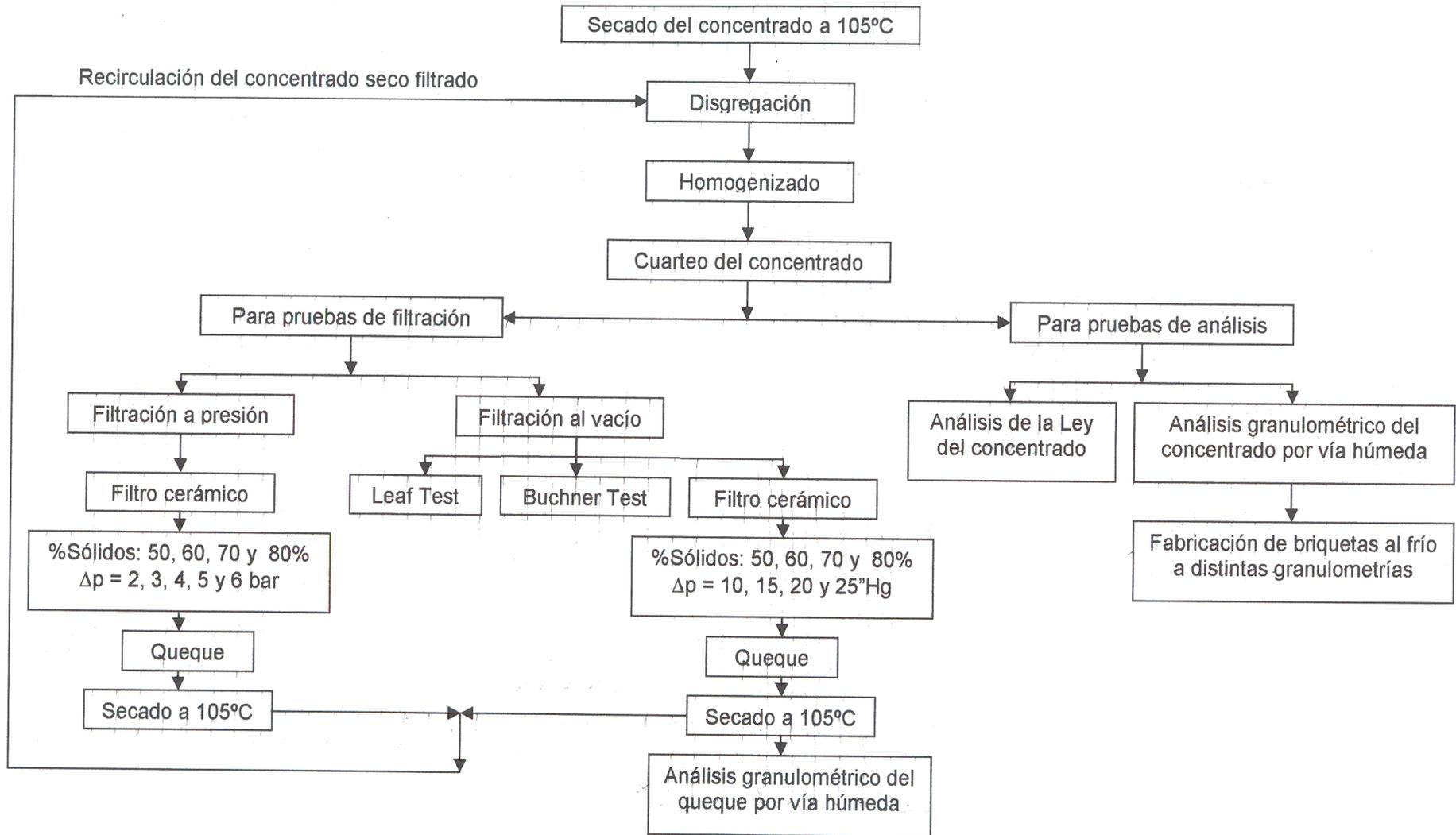


Figura 7.5 Formación del queque de una prueba de filtración Leaf test

FIGURA 7.6 ESQUEMA DE TRABAJO PARA LAS PRUEBAS DE FILTRACIÓN



CAPÍTULO 8

CÁLCULOS Y RESULTADOS

8.1. CARACTERIZACIÓN DE LA PULPA

8.1.1. Características físico-químicas de la pulpa de concentrado de Plomo

- Gravedad específica del concentrado: 5,93 gr/cm³
- pH: 7,2
- Temperatura: 18°C
- Viscosidad de la pulpa a distintos porcentajes de sólidos

Tabla 8.1 Viscosidad de la pulpa a distintos porcentajes de sólidos (Ensayado en el Laboratorio de la Facultad de Ingeniería de Petróleo – UNI)

% Sólidos	50	60	70	80
Viscosidad (cp)	6,00	8,50	14,00	49,25

8.2. ANÁLISIS DE LEYES DEL CONCENTRADO DE PLOMO

Tabla 8.2 Reporte de leyes del concentrado de Plomo (Ensayado en el Laboratorio de Espectrometría – UNI)

MUESTRA	% Pb	% Zn	% Cu	% Fe
Concentrado de Plomo	57,480	10,185	0,070	4,225

8.3. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL CONCENTRADO DE PLOMO

Tabla 8.3 Análisis granulométrico del concentrado de Plomo por vía húmeda, empleando mallas ASTM

N° Malla	Tamaño (µm)	Peso _{retenido} (g)	Peso _{corregido} (g)	% Retenido
150	106	31,93	33,01	11,00
200	75	29,20	30,19	10,06
270	53	49,90	51,58	17,19
325	45	9,50	9,82	3,27
400	38	13,12	13,56	4,52
450	32	19,40	20,05	6,69
500	25	20,50	21,19	7,06
635	20	21,00	21,71	7,24
-635	---	95,66	98,89	32,96
TOTAL:		290,21	300,00	100,00

Para el concentrado de Plomo, el factor de forma superficial (α_s), volumétrico (α_v) y la esfericidad tienen los siguientes valores

Tabla 8.4 Valores de forma superficial, volumétrico y esfericidad del concentrado de Plomo

Factor de forma superficial (α_s)	0,750
Factor de forma volumétrico (α_v)	0,200
Esfericidad (ψ)	2,207

8.3.1. Determinación de los tamaños promedio del concentrado de Plomo a partir del análisis granulométrico (Tabla 8.3)

Tabla 8.5 Tamaños promedio del concentrado de Plomo antes de ser filtrado

Tamaño Prom. Lineal (x_{10})	μm	36,865
Tamaño Prom. Superficial (x_{20})	μm	50,580
Tamaño Prom. Volumétrico (x_{30})	μm	59,290
Tamaño Promedio (x_{40})	μm	65,820
Tamaño Promedio (x_{12})	μm	81,469
Tamaño Promedio (x_{13})	μm	90,049
Diámetro Equivalente (d_e)	μm	43,019
Diámetro Superficial (D_s)	μm	24,714
Superficie Específica (s)		0,008
Tamaño máximo (X_o)	μm	28,994
Tamaño medio (μ)	μm	16,924

8.3.2. Análisis granulométrico del queque de las pruebas de filtración al vacío

Tabla 8.6 Análisis granulométrico del queque obtenido de las pruebas de filtración al vacío a 60 y 70% de sólidos determinado por vía húmeda

%Sólidos en la pulpa		% RETENIDO							
		60%S				70%S			
Presión de vacío (in.Hg)		10,1	15,0	20,1	25,3	10,3	15,2	20,3	25,5
Nº Malla	Tamaño (μm)								
150	106	0,00	0,00	0,31	4,15	0,88	1,34	4,09	7,31
200	75	0,00	0,00	0,22	0,78	7,70	1,59	8,03	18,73
270	53	0,00	0,66	0,88	1,61	4,18	15,53	14,50	9,11
325	45	0,00	1,70	1,08	1,83	2,72	5,93	7,27	6,43
400	38	2,72	0,93	0,44	2,99	4,40	7,63	5,45	5,25
450	32	2,52	3,14	2,73	4,07	5,27	7,53	3,96	4,91
500	25	4,38	3,40	5,31	7,28	9,68	7,82	10,86	6,90
635	20	8,03	5,98	8,20	10,06	10,35	9,64	7,89	6,85
-635	---	82,35	84,19	80,83	67,23	54,82	42,99	37,95	34,51

8.3.3. Determinación de los tamaños promedio de las partículas del queque de las pruebas de filtración al vacío a partir del análisis granulométrico

Tabla 8.7 Tamaños promedio de las partículas contenidas en el queque en una prueba de filtración al vacío

Tamaños Promedio (μm)	PRESIÓN (in.Hg)							
	60 %S				70 %S			
	10,1	15,0	20,1	25,3	10,3	15,2	20,3	25,5
Lineal (x_{10})	4,54	4,52	5,45	12,93	18,00	26,23	28,95	36,18
Superficial (x_{20})	11,16	11,99	13,93	27,62	30,40	37,56	41,04	49,58
Volumétrico (x_{30})	15,39	17,19	21,21	39,51	38,74	44,83	48,97	57,65
(x_{40})	18,34	21,07	28,35	49,15	45,24	50,75	55,31	63,58
(x_{12})	29,26	35,35	49,13	80,86	62,94	63,87	69,71	77,97
Tamaño Promedio (x_{13})	31,03	38,77	67,78	94,62	72,06	73,61	79,69	85,25
Diámetro Equivalente (d_e)	11,17	12,47	15,39	28,67	28,11	32,53	35,53	41,83
Diámetro Superficial (D_s)	5,45	5,86	6,81	13,50	14,85	18,35	20,05	24,22
Superficie Específica (s)	0,022	0,018	0,013	0,008	0,010	0,010	0,009	0,008
Porosidad del queque (ϵ)	0,406	0,400	0,393	0,362	0,406	0,369	0,316	0,296

Tabla 8.8 Valores del diámetro equivalente de las partículas del queque a partir de las pruebas de filtración al vacío a 60 y 70% de sólidos

60% SÓLIDOS		70% SÓLIDOS	
d_e (μm)	Presión (in.Hg)	d_e (μm)	Presión (in.Hg)
11,17	10,1	28,11	10,3
12,47	15,0	28,38	15,2
15,39	20,1	35,53	20,3
28,67	25,3	41,83	25,5

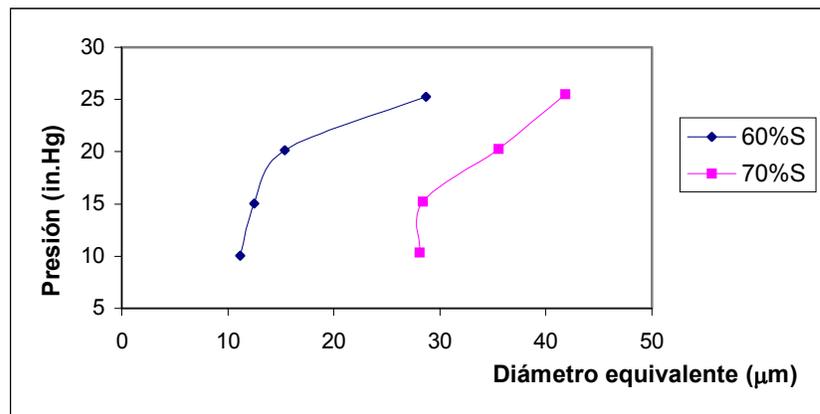
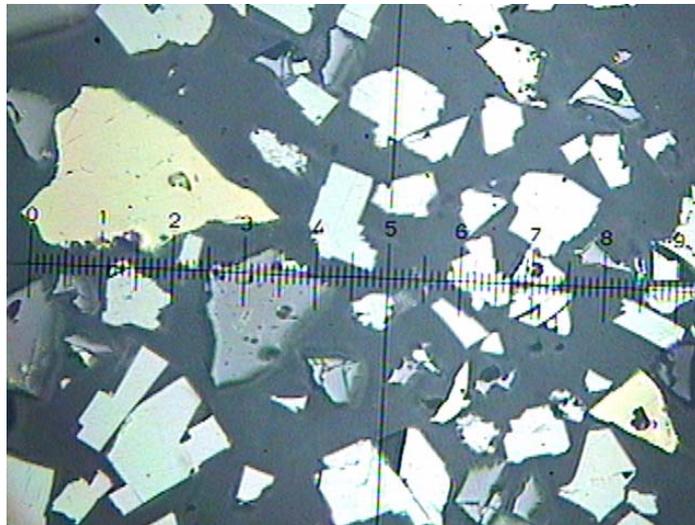


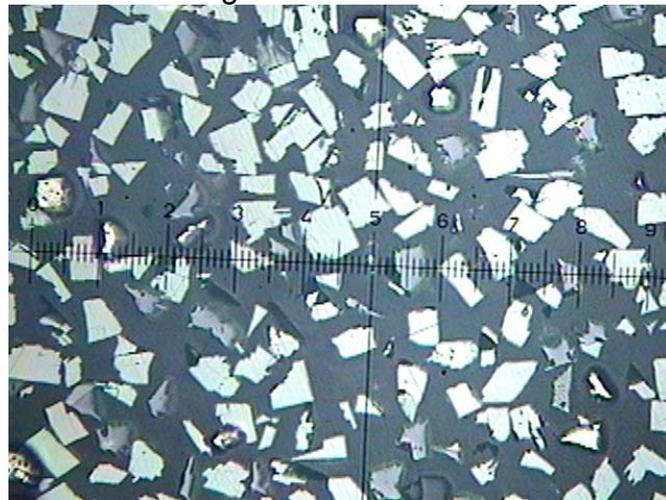
Figura 8.1 Curvas comparativas del diámetro equivalente (d_e) de las partículas del queque respecto a la presión de filtrado obtenidas de las pruebas de filtración al vacío a 60 y 70% de sólidos

8.4. DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO PROMEDIO DE LAS PARTÍCULAS MEDIANTE EL EMPLEO DEL MICROSCOPIO

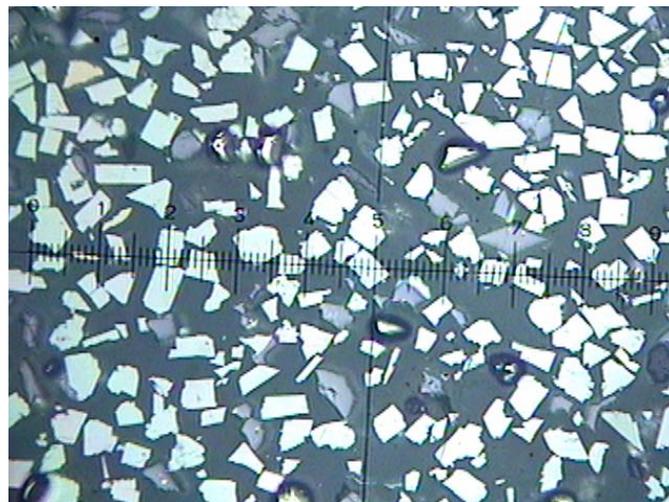
Para determinar el tamaño promedio de las partículas se fabricaron briquetas de concentrado de Plomo al frío, producto del lavado de mallas ASTM desde la +m270 hasta la -m635, observadas luego en un microscopio de polarización. Asimismo para diferenciar las menas (opaco, no dejan pasar la luz) de las gangas (no opaco) se empleó la técnica de nícoles cruzados.



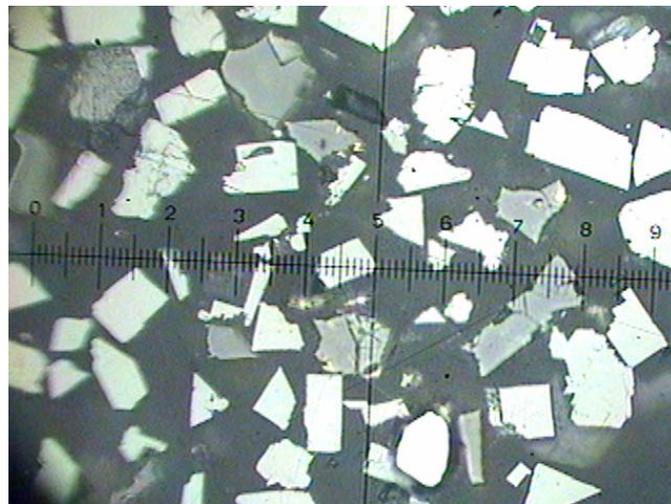
Microfotografía N° 1 +m270 a 200X



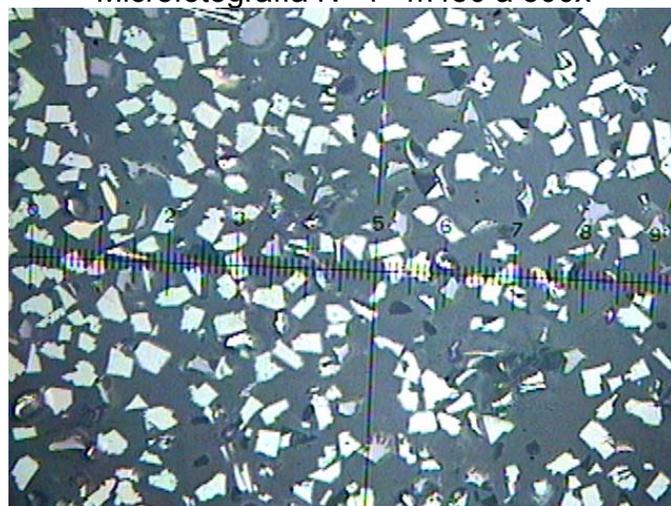
Microfotografía N° 2 +m325 a 200x



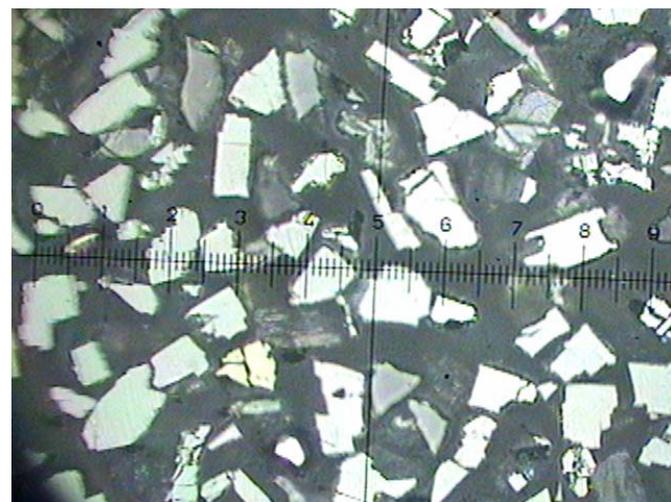
Microfotografía N° 3 +m400 a 200x



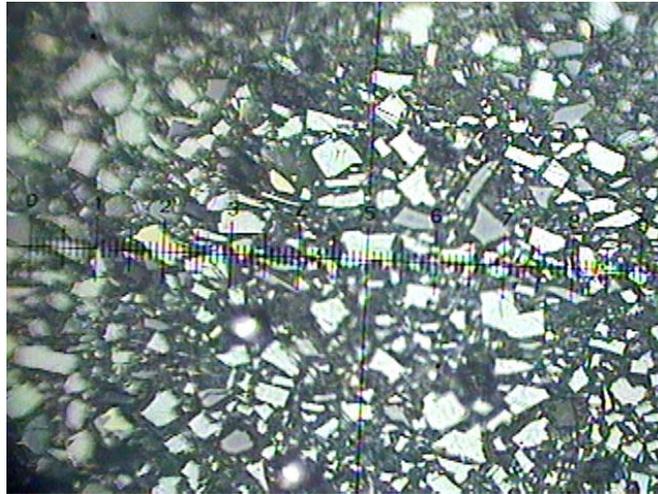
Microfotografía N° 4 +m450 a 500x



Microfotografía N° 5 +m500 a 500x



Microfotografía N° 6 +m635 a 500x



Microfotografía N° 7 -m635 a 500x

En el microscopio de polarización la determinación del tamaño promedio de las partículas se determinó multiplicando el tamaño observado en el microscopio por el factor correspondiente a cada aumento. El factor de corrección se determina dividiendo la distancia patrón de la reglilla del microscopio (0.05mm) entre el valor real de la reglilla para cada aumento.

Aumento	Patrón	Factor de corrección
100X	0,05mm ~ 0,10	0,05/0,10
400X	0,05mm ~ 0,30	0,05/0,30

Tabla 8.9 Tamaño promedio de las partículas del concentrado de Plomo antes de filtrar, determinado mediante la fabricación de briquetas al frío empleando un microscopio de polarización (Ensayado en el Laboratorio de Metalurgia Física FIGMM – UNI)

N° Malla ASTM	Tamaño (µm)	Aumento	Tamaño Observado (mm)	Tamaño Corregido (µm)
270	53	100X	0,150	75,00
325	45	100X	0,096	48,00
400	38	100X	0,085	42,50
450	32	100X	0,068	34,00
500	25	400X	0,220	28,21
635	20	400X	0,175	22,44
-635	--	400X	0,110	14,10

8.5. PRUEBAS EXPERIMENTALES

Las pruebas de filtración de pulpa de concentrado de Plomo se realizaron con el filtro cerámico minipiloto en dos modalidades: al vacío y a presión. En ambos casos y durante todas las pruebas experimentales se utilizó la misma placa cerámica (ver Tabla 6.3 - Propiedades de las placas cerámicas). También es muy importante mencionar que todas las pruebas se realizaron a nivel del mar.

8.5.1. Pruebas de filtración al vacío

Condiciones de operación:

Temperatura de la pulpa: 18 °C

Presión inicial de trabajo: 10 "Hg

Distancia entre raspadores: 25,5 mm

Tiempo de la P.C⁽¹⁾ en dar una vuelta: 13 s

Datos de la Placa Cerámica:

Tipo de placa cerámica: S3

Espesor de la P.C: 24,2 mm

Espesor de la membrana de la P.C.: 0,5 mm

Área de la P.C.: 0,011 m²

PC⁽¹⁾: Placa cerámica

8.5.1.1. Reportes de humedades

Tabla 8.10 Reporte de humedades de una prueba de filtración al vacío empleando una pulpa al 50% de Sólidos

50%S						
Tiempo filtración (min.)	Vol solución Filtrada(ml)	Presión (in.Hg)	Peso (g) Húmedo	Peso (g) Seco	% H ₂ O queque	Humedad Promedio
30	95,0	10,5	---	---	---	8,92
60	110,5	9,8	3,10	2,88	---	
75	65,0	10,0	3,39	3,08	9,14	
90	55,0	10,0	3,22	2,94	8,70	
15	90,0	15,0	7,07	6,45	---	9,78
30	75,0	15,0	8,09	7,29	9,89	
45	76,0	15,0	7,68	6,99	---	
60	70,0	15,0	9,52	8,60	9,66	
15	92,0	20,0	12,86	11,63	9,56	9,64
30	82,0	20,0	15,15	13,68	9,70	
45	89,0	20,5	18,68	16,78	---	
60	81,0	20,5	18,00	16,26	9,67	
15	110,0	25,5	26,61	23,73	---	9,54
30	90,0	25,5	25,80	23,30	9,69	
45	100,0	25,0	31,00	28,07	9,45	
60	93,0	25,5	29,22	26,45	9,48	
Queque retenido en la P.C.			28,67	25,92	9,59	

(*) Algunos valores de humedad no se consideraron en el promedio por no ser representativos de la prueba.

(**) Se realizó otra prueba de filtración al vacío con 50%S para una presión de 10" Hg (ver apéndice, tablas C y E).

Tabla 8.11 Reporte de producción de filtrado y queque de una prueba de filtración al vacío empleando una pulpa al 50% de Sólidos

50%S	Unidades	PRESIÓN (in.Hg)			
		10,2	15,5	20,5	25,4
Peso seco total del queque filtrado	g	8,90	29,33	58,35	101,55
Volumen filtrado	l	0,326	0,311	0,344	0,393
Volumen filtrado / tiempo	l / h	0,217	0,311	0,344	0,393
Queque seco / volumen filtrado	Kg / m ³	27,30	94,31	169,62	258,40
Queque seco / tiempo	Kg / h	0,006	0,029	0,058	0,102
Queque seco/ tiempo/ área filtrante	Kg/h/m ²	0,54	2,67	5,30	9,23

Tabla 8.12 Reporte de humedades de una prueba de filtración al vacío empleando una pulpa al 60% de Sólidos

60%S						
Tiempo filtración (min.)	Vol solución Filtrada(ml)	Presión (in.Hg)	Peso (g) Húmedo	Peso (g) Seco	% H ₂ O Queque	Humedad Promedio
15	18,0	10,5	1,64	1,47	10,37	10,33
30	59,0	10,0	5,91	5,32	9,98	
45	49,0	10,0	7,19	6,42	10,71	
60	48,0	9,8	7,90	7,09	10,25	
15	80,0	15,0	17,46	15,62	10,54	10,10
30	68,0	15,0	17,96	16,13	10,19	
45	67,0	15,3	18,44	16,60	9,98	
60	56,0	14,8	17,51	15,81	9,71	
15	98,0	20,5	39,52	35,48	10,22	9,85
30	88,0	20,0	36,75	33,10	9,93	
45	74,0	20,0	33,25	30,07	9,56	
60	94,0	20,0	52,55	47,46	9,69	
15	112,0	25,0	53,75	48,80	9,21	8,76
30	108,0	25,0	71,07	64,71	8,95	
45	110,0	25,5	73,89	67,57	8,55	
60	108,0	25,5	84,16	77,14	8,34	

Tabla 8.13 Reporte de producción de filtrado y queque de una prueba de filtración al vacío empleando una pulpa al 60% de Sólidos

60%S	Unidades	PRESIÓN (in.Hg)			
		10,1	15,0	20,1	25,3
Peso seco total del queque filtrado	g	20,30	64,16	146,11	258,22
Volumen filtrado	l	0,174	0,271	0,354	0,438
Volumen filtrado / tiempo	l / h	0,174	0,271	0,354	0,438
Queque seco / Volumen filtrado	kg / m ³	116,67	236,75	412,74	589,54
Queque seco / tiempo	Kg / h	0,020	0,064	0,146	0,258
Queque seco/ tiempo/ área filtrante	kg / h / m ²	1,85	5,83	13,28	23,48

Tabla 8.14 Reporte de humedades de una prueba de filtración al vacío empleando una pulpa al 70% de Sólidos

70%S						
Tiempo filtración (min.)	Vol solución Filtrada(ml)	Presión (in.Hg)	Peso (g) Húmedo	Peso (g) Seco	% H ₂ O queque	Humedad Promedio
15	66,5	10,0	31,04	27,84	10,31	10,28
30	68,0	10,5	35,60	32,07	9,92	
45	78,0	10,5	58,39	52,18	10,64	
60	75,0	10,3	58,13	52,17	10,25	
15	117,0	15,5	179,10	162,36	9,35	9,03
30	93,0	15,5	121,92	110,89	9,05	
45	106,0	15,0	188,06	170,91	9,12	
60	120,0	14,9	273,60	250,09	8,59	
15	145,0	20,0	437,55	404,85	7,47	7,22
30	142,0	20,0	374,96	348,60	7,03	
45	142,0	20,5	419,23	389,69	7,05	
60	149,0	20,5	441,31	408,93	7,34	
15	182,0	25,0	532,33	498,25	6,40	6,64
30	177,0	25,5	525,29	492,12	6,31	
40	125,0	25,0	372,43	346,77	6,89	
50	129,0	26,0	448,75	417,53	6,96	
Queque retenido en la P.C.			17,41	16,05	7,81	

Tabla 8.15 Reporte de producción de filtrado y queque de una prueba de filtración al vacío empleando una pulpa al 70% de Sólidos

70%S	Unidades	PRESIÓN (in.Hg)			
		10,3	15,2	20,3	25,4
Peso seco total del queque filtrado	g	164,26	694,25	1552,07	1754,67
Volumen filtrado	l	0,288	0,436	0,578	0,613
Volumen filtrado / tiempo	l / h	0,288	0,436	0,578	0,736
Queque seco / Volumen filtrado	kg / m ³	571,3	1592,3	2685,2	2862,4
Queque seco / tiempo	Kg / h	0,164	0,694	1,552	2,106
Queque seco/ tiempo/ área filtrante	Kg / h / m ²	14,93	63,11	141,10	191,42

Tabla 8.16 Reporte de humedades de una prueba de filtración al vacío empleando una pulpa al 80% de Sólidos

80%S						
Tiempo filtración (min.)	Vol solución Filtrada(ml)	Presión (in.Hg)	Peso (g) Húmedo	Peso (g) Seco	% H ₂ O queque	Humedad Promedio
10	53,0	10,0	219,42	193,37	11,87	11,94
20	64,0	10,0	249,58	219,18	12,18	
30	67,0	10,0	223,13	196,90	11,76	
40	60,0	10,0	278,39	245,10	11,96	
10	98,0	14,6	428,83	384,42	10,36	10,64
20	92,0	15,5	545,97	487,31	10,74	
30	110,0	15,5	656,50	586,75	10,62	
40	89,0	15,0	621,10	553,80	10,84	
8	98,0	20,5	650,37	586,53	9,82	9,54
13	68,0	20,5	494,78	447,03	9,65	
18	57,0	20,5	442,62	400,71	9,47	
23	59,0	21,0	433,15	393,15	9,23	
5	77,0	25,5	563,99	514,29	8,81	8,99
10	76,0	25,5	568,35	517,50	8,95	
15	63,0	25,5	654,29	594,09	9,20	
20	61,0	25,5	562,23	511,63	9,00	
Queque retenido en la P.C.			67,17	60,77	9,53	

Tabla 8.17 Reporte de producción de filtrado y queque de una prueba de filtración al vacío empleando una pulpa al 80% de Sólidos

80%S	Unidades	PRESIÓN (in.Hg)			
		10,0	15,2	20,6	25,5
Peso seco total del queque filtrado	g	854,55	2012,28	1827,42	2137,51
Volumen filtrado	l	0,244	0,389	0,282	0,277
Volumen filtrado / tiempo	l / h	0,366	0,584	0,736	0,831
Queque seco / Volumen filtrado	Kg / m ³	3502,3	5173,0	6480,2	7716,6
Queque seco / tiempo	Kg / h	1,282	3,018	4,767	6,413
Queque seco/ tiempo/ área filtrante	Kg / h / m ²	116,53	274,40	433,38	582,96

Tabla 8.18 Reporte de humedades del queque obtenido de las pruebas de filtración al vacío a distintas presiones y porcentajes de sólidos

50% SÓLIDOS		60% SÓLIDOS		70% SÓLIDOS		80% SÓLIDOS	
Δp (in.Hg)	% H ₂ O queque	Δp (in.Hg)	% H ₂ O queque	Δp (in.Hg)	% H ₂ O queque	Δp (in.Hg)	% H ₂ O queque
10,2	8,92	10,1	10,33	10,3	10,28	10,0	11,94
15,5	9,78	15,0	10,10	15,2	9,03	15,2	10,64
20,5	9,64	20,1	9,85	20,3	7,22	20,6	9,54
25,4	9,54	25,3	8,76	25,4	6,64	25,5	8,99

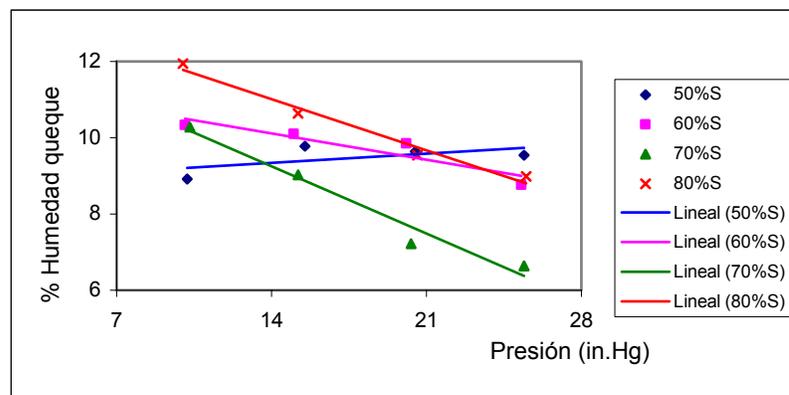


Figura 8.2 Curvas comparativas de porcentaje de humedad del queque obtenidas de las pruebas de filtración al vacío a distintos porcentajes de sólidos

Tabla 8.19 Reporte de producción del queque obtenido de las pruebas de filtración al vacío a distintos porcentajes de sólidos

50% SÓLIDOS		60% SÓLIDOS		70% SÓLIDOS		80% SÓLIDOS	
Presión (in.Hg)	Capacidad (kg/h*m ²)						
10,2	0,54	10,1	1,85	10,3	14,93	10,0	116,53
15,5	2,67	15,0	5,83	15,2	63,11	15,2	274,40
20,5	5,30	20,1	13,28	20,3	141,10	20,6	433,38
25,4	9,23	25,3	23,48	25,4	191,42	25,5	582,96

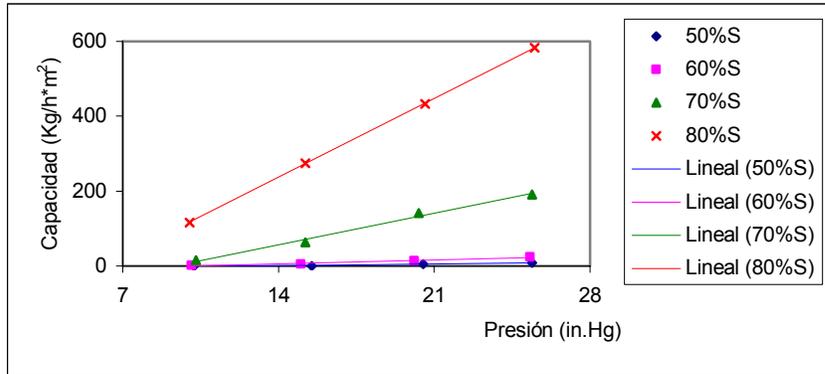


Figura 8.3 Capacidad del filtro en función de la presión de operación y del porcentaje de sólidos en una prueba de filtración al vacío

Tabla 8.20 Reporte de la capacidad del filtro cerámico minipiloto y la humedad del queque a distintos porcentajes de sólidos

Presión (in.Hg)	50% SÓLIDOS		60% SÓLIDOS		70% SÓLIDOS		80% SÓLIDOS	
	Capacidad (kg/h*m ²)	H ₂ O %	Capacidad (kg/h*m ²)	H ₂ O %	Capacidad (kg/h*m ²)	H ₂ O %	Capacidad (kg/h*m ²)	H ₂ O %
10,0	0,54	8,31	1,85	10,33	14,93	10,28	116,53	11,94
15,0	2,67	9,33	5,83	10,10	63,10	9,03	274,40	10,64
20,0	5,30	9,78	13,28	9,85	141,10	7,22	433,38	9,54
25,0	9,23	9,86	23,48	8,76	191,42	6,64	582,96	8,99

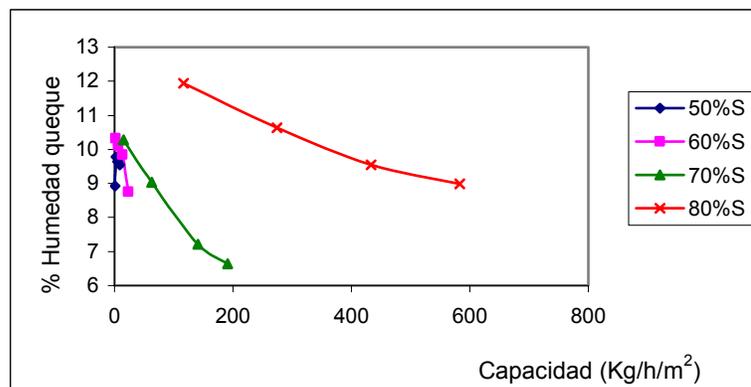


Figura 8.4 Humedad del queque vs. capacidad del filtro a distintos porcentajes de sólidos en una prueba de filtración al vacío

Tabla 8.21 Reporte de la capacidad del filtro cerámico minipiloto y la permeabilidad del queque a distintos porcentajes de sólidos

Presión (in.Hg)	50% SÓLIDOS		60% SÓLIDOS		70% SÓLIDOS		80% SÓLIDOS	
	Kg/h*m ²	l/h*m ²						
10,0	0,54	19,76	1,85	15,82	14,93	26,14	116,53	33,27
15,0	2,67	28,27	5,83	24,64	63,11	39,64	274,40	53,05
20,0	5,30	31,27	13,28	32,18	141,10	52,55	433,38	66,88
25,0	9,23	35,73	23,48	39,82	191,42	66,87	582,96	75,55

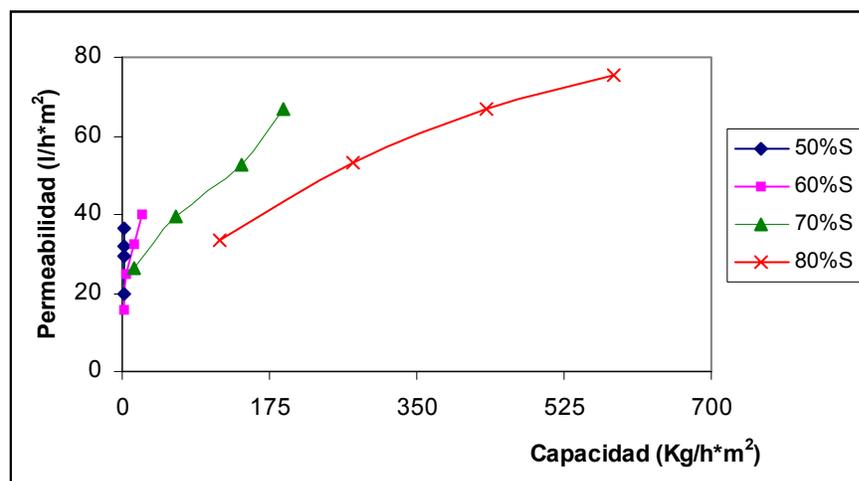


Figura 8.5 Permeabilidad del queque vs. capacidad del filtro a distintos porcentajes de sólidos en una prueba de filtración al vacío

8.5.1.2. Pruebas de filtración al vacío variando la velocidad de giro de la placa cerámica con una pulpa a 80% de sólidos

Las siguientes pruebas de filtración al vacío se llevaron a cabo con una pulpa de concentrado de Plomo a 80% de sólidos bajo las siguientes condiciones de operación y variando la velocidad de giro de la placa cerámica.

Condiciones de operación:

Temperatura de la pulpa: 18 °C

Distancia entre raspadores: 25,5 mm

Datos de la Placa Cerámica:

Tipo de placa cerámica: S3

Espesor de la P.C: 24,2 mm

Espesor de la membrana de la P.C.: 0,5 mm

Área de la P.C.: 0,011 m²

a) Prueba de filtración al vacío a una velocidad de giro de la placa cerámica de 1,5 RPM

Tabla 8.22 Reporte de humedad de una prueba de filtración al vacío con una pulpa al 80%S

Tiempo filtración (min.)	Vol. filtrado (ml)	Presión (in Hg)	Peso húmedo (g)	Peso seco (g)	Humedad %	% H ₂ O queque
5	17,0	10,0	53,32	48,17	9,66	9,53
10	14,0	9,5	65,93	59,73	9,40	
15	38,0	15,0	135,72	124,39	8,35	8,27
20	34,0	15,0	139,02	127,62	8,20	
25	49,0	20,5	204,33	189,45	7,28	7,28
30	49,0	20,5	233,89	216,89	7,27	
35	63,0	25,5	279,37	261,10	6,54	6,53
40	49,0	25,0	235,15	219,82	6,52	

Tabla 8.23 Reporte de producción de filtrado y queque de una prueba de filtración al vacío con una pulpa al 80%S

Presión (in.Hg)	9,8	15,0	20,5	25,3
Peso seco total del queque filtrado (g)	107,90	252,01	406,34	480,92
Volumen filtrado (l)	0,031	0,072	0,098	0,112
Volumen filtrado / tiempo (l / h)	0,186	0,432	0,588	0,672
Queque seco / Volumen filtrado (Kg / m ³)	3480,65	3500,14	4146,33	4293,93
Queque seco / tiempo (Kg / h)	0,647	1,512	2,438	2,886
Queque seco/ tiempo/ área filtrante (Kg / h/ m ²)	58,85	137,46	221,64	262,32

b) Prueba de filtración al vacío a una velocidad de giro de la placa cerámica de 2,5 RPM

Tabla 8.24 Reporte de humedad de una prueba de filtración al vacío con una pulpa al 80%S

Tiempo filtración (min.)	Vol. filtrado (ml)	Presión (in Hg)	Peso húmedo (g)	Peso seco (g)	% H ₂ O Queque
3	49,0	10,0	82,08	73,95	9,90
3	35,0	15,0	129,70	117,40	9,48
3	39,0	20,5	172,60	158,18	8,35
3	40,0	25,5	173,53	160,55	7,48

Tabla 8.25 Reporte de producción de filtrado y queque de una prueba de filtración al vacío con una pulpa al 80%S

Presión (in.Hg)	10,0	15,0	20,5	25,5
Peso seco total del queque filtrado (g)	73,95	117,40	158,18	160,55
Volumen filtrado (l)	0,049	0,035	0,039	0,040
Volumen filtrado / tiempo (l / h)	0,980	0,700	0,780	0,800
Queque seco / Volumen filtrado (Kg / m ³)	1509,18	3354,29	4055,90	4013,75
Queque seco / tiempo (Kg / h)	1,479	2,348	3,164	3,211
Queque seco/ tiempo/ área filtrante (Kg / h/ m ²)	134,45	213,45	287,60	291,91

c) Prueba de filtración al vacío a una velocidad de giro de la placa cerámica de 4,6 RPM

Tabla 8.26 Reporte de humedad de una prueba de filtración al vacío con una pulpa al 80%S

Tiempo filtración (min.)	Vol. Filtrado (ml)	Presión (in Hg)	Peso húmedo (g)	Peso seco (g)	% H ₂ O queque
3	14,0	15,5	137,38	122,55	10,79
3	14,0	20,5	103,42	94,33	8,79
3	41,0	25,5	132,33	120,95	8,53
Queque retenido en la P.C.			39,48	35,70	9,57

Tabla 8.27 Reporte de producción de filtrado y queque de una prueba de filtración al vacío con una pulpa al 80%S

Presión (in.Hg)	15,5	20,5	25,5
Peso seco total del queque filtrado (g)	122,55	94,33	120,95
Volumen filtrado (l)	0,014	0,014	0,041
Volumen filtrado / tiempo (l / h)	0,280	0,280	0,820
Queque seco / Volumen filtrado (Kg / m ³)	8753,57	6737,86	2950,00
Queque seco / tiempo (Kg / h)	2,451	1,887	2,419
Queque seco/ tiempo/ área filtrante (Kg / h/ m ²)	222,82	171,51	219,91

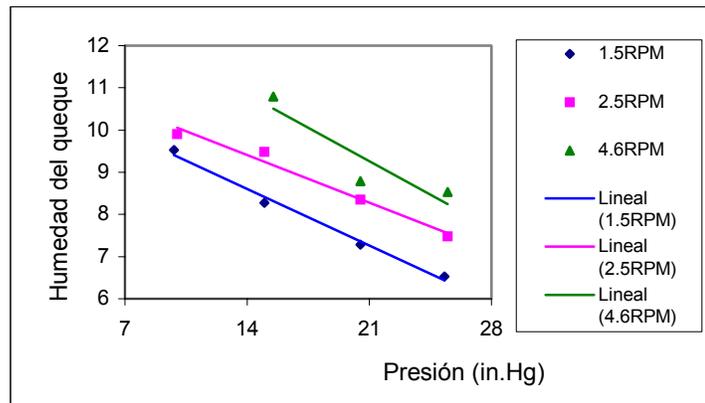


Figura 8.6 Gráficos comparativos de la humedad del queque obtenidos al variar la velocidad de giro de la placa cerámica en pruebas de filtración al vacío con una pulpa al 80% de sólidos

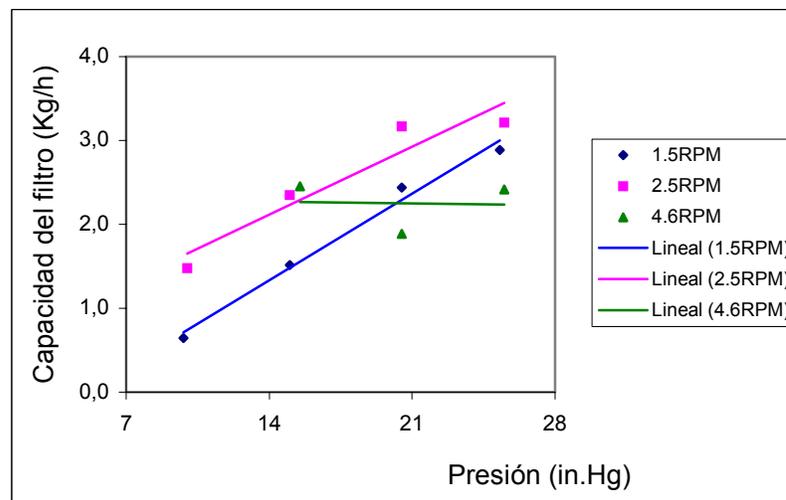


Figura 8.7 Curvas comparativas de producción del queque en función de la presión de vacío variando la velocidad de giro de la placa cerámica

8.5.1.3. Pruebas de filtración al vacío operando de mayor a menor presión con una pulpa a 50% de sólidos

La siguiente prueba de filtración al vacío se llevó a cabo con una pulpa de concentrado de Plomo a 50% de sólidos operando el equipo de mayor a menor presión a fin de observar el comportamiento de la placa cerámica.

Condiciones de operación:

Temperatura de la pulpa: 18 °C

Presión inicial de trabajo: 25 "Hg

Distancia entre raspadores: 25,5 mm

Tiempo de la P.C en dar una vuelta: 13 s

Datos de la Placa Cerámica:

Tipo de placa cerámica: S3

Espesor de la P.C: 24,2 mm

Espesor de la membrana de la P.C.: 0,5 mm

Área de la P.C.: 0,011 m²

Tabla 8.28 Reporte de humedad de una prueba de filtración al vacío empleando una pulpa a 50%S aplicando presiones de mayor a menor

Tiempo filtrado (min.)	Vol. filtrado (ml)	Presión (in Hg)	Peso húmedo (g)	Peso seco (g)	% H ₂ O queque	Humedad promedio
30	210,0	25,8	5,12	4,67	8,79	9,07
45	104,0	25,0	5,88	5,33	9,35	
60	98,0	25,5	---	---	---	
15	77,0	20,5	6,92	6,22	10,12	9,64
30	79,0	20,5	6,35	5,75	9,45	
45	84,0	20,5	7,49	6,79	9,35	
20	85,0	15,8	8,35	7,50	10,18	9,94
40	80,0	15,6	8,12	7,32	9,85	
60	82,0	15,0	9,20	8,30	9,78	
20	63,0	10,5	7,32	6,62	9,56	10,27
40	60,0	10,0	6,63	5,93	10,56	
60	64,0	10,0	7,49	6,69	10,8	

(***) Se perdió muestra, aproximadamente 5 g

Tabla 8.29 Reporte de producción de filtrado y queque de una prueba de filtración al vacío empleando una pulpa al 50%S aplicando presiones de mayor a menor

Presión (in.Hg)	10,2	15,5	20,5	25,4
Peso seco total del queque filtrado (g)	19,24	23,12	18,76	10,00
Volumen filtrado (l)	0,187	0,247	0,240	0,412
Volumen filtrado / tiempo (l / h)	0,187	0,247	0,320	0,412
Queque seco / Volumen filtrado (Kg / m ³)	102,89	93,60	78,17	24,27
Queque seco / tiempo (Kg / h)	0,019	0,023	0,025	0,010
Queque seco/ tiempo/ área filtrante (Kg / h/ m ²)	1,75	2,10	2,27	0,91

Tabla 8.30 Comparación de humedades del queque a distintas presiones de pruebas de filtración al vacío empleando una pulpa al 50% de sólidos operando a presiones ascendente y descendente

Presión ascendente		Presión descendente	
Presión (in.Hg)	% H ₂ O queque	Presión (in.Hg)	% H ₂ O queque
10,2	8,92	25,4	9,07
15,5	9,78	20,5	9,64
20,5	9,64	15,5	9,94
25,4	9,54	10,2	10,27

8.5.1.4. Cálculo de la permeabilidad del medio filtrante

La permeabilidad del medio filtrante se determinó a través del flujo de percolación de la solución filtrada empleando el modelo de Massarani (ecuación [3.16]).

$$\frac{\Delta p_e}{L} = \frac{\mu}{k(\varepsilon)} q + \frac{p_f c(\varepsilon)}{\sqrt{k(\varepsilon)}} q^2$$

Datos:

Espesor membrana de la P.C. (ℓ) = 0,5mm Densidad del filtrado (ρ): 1000kg/m³

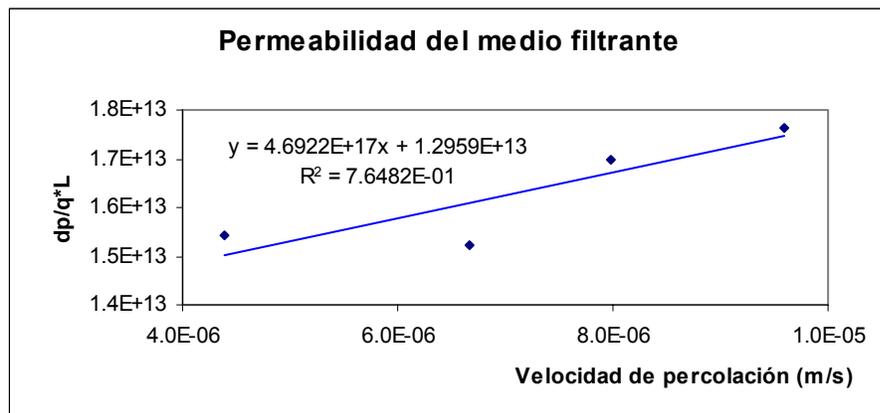
Área de la P.C. (A): 0,011m²

Viscosidad de filtrado (μ): 0,001 Pa*s

Los datos presentados a continuación de tiempo, presión y volumen de solución filtrada han sido extraídos de una prueba de filtración al vacío realizada con agua fresca (ver apéndice 1, Tabla A)

Tabla 8.31 Cálculo de la permeabilidad del medio filtrante

Tiempo filtración (min.)	Presión (in. Hg)	Vol. solución Filtrada(ml)	Vol. solución Filtrada(m ³)	Veloc. percolación (q) (m / s)	Presión (Pa)	$\Delta p/q*L$ (kg/m ³ s)
20	10,0	58	5,80E-05	4,394E-06	33863,9	1,54E+13
30	15,0	132	1,32E-04	6,667E-06	50795,8	1,52E+13
30	20,0	158	1,58E-04	7,980E-06	67727,8	1,70E+13
30	25,0	190	1,90E-04	9,596E-06	84659,7	1,76E+13



Del gráfico:

$$\frac{\Delta p}{q * L} = 4,6922E+17x + 1,2959E+13$$

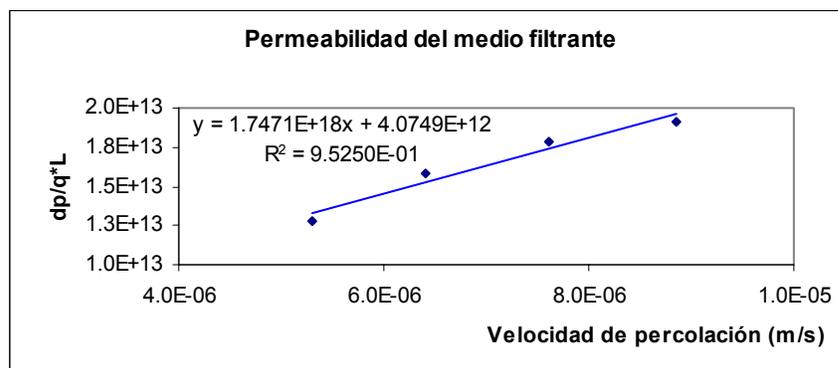
$$K_{(\varepsilon)} = \frac{\mu}{(\Delta p / q * L)_{q=0}} \quad k_{(\varepsilon)} = 7,717E-17m^2$$

$$c_{(\varepsilon)} = \sqrt{k_{(\varepsilon)}} * \frac{(\Delta p / q^2 * L)}{\rho} \quad c_{(\varepsilon)} = 4,122E+06$$

Empleando las mismas condiciones de operación y realizando la misma prueba de filtración al vacío con agua fresca se calcula la permeabilidad de la placa cerámica (ver más datos apéndice 1, Tabla B)

Tabla 8.32 Cálculo de la permeabilidad del medio filtrante

Tiempo filtración (min)	Presión (in. Hg)	Vol solución Filtrada(ml)	Vol solución Filtrada(m ³)	Velocidad _{percolación} q (m / s)	Presión (Pa)	$\Delta p / q^*L$ (kg / m ³ s)
40	10,0	140	1,40E-04	5,303E-06	33863,9	1,277E+13
40	15,0	169	1,69E-04	6,402E-06	50795,8	1,587E+13
40	20,0	201	2,01E-04	7,614E-06	67727,8	1,779E+13
40	25,0	234	2,34E-04	8,864E-06	84659,7	1,910E+13



Del gráfico:

$$\frac{\Delta p}{q^*L} = 1,7471E+18x + 4,0749E+12$$

$$K_{(e)} = \frac{\mu}{(\Delta p / q^* L)_{q=0}} \quad K_{(e)} = 2,454E-16m^2$$

$$c_{(e)} = \sqrt{k_{(e)}} * \frac{(\Delta p / q^2 * L)}{\rho} \quad c_{(e)} = 2,737E+07$$

8.5.1.5. Cálculo de la permeabilidad del queque con distintos modelos

Del análisis granulométrico realizado al queque producto de la filtración al vacío (ver Tabla 8.6) se determinó la permeabilidad del queque empleando las ecuaciones de Concha, Ergun y Kozeny & Carman. Asimismo dicho parámetro también es determinado empleando el flujo de percolación de la solución filtrada mediante la ecuación de Massarani.

a) Cálculo de la permeabilidad del queque mediante la ecuación de Concha

La siguiente tabla presenta los datos extraídos de la Tabla 8.7

% Sólidos en la pulpa	60 %S				70 %S			
Presión (in.Hg)	10,1	15,0	20,1	25,3	10,3	15,2	20,3	25,5
Tamaño Promedio(x_{12}) (μm)	2926	35,35	49,13	80,86	62,94	63,87	69,71	77,97
Porosidad del queque (ϵ)	0,406	0,400	0,393	0,362	0,406	0,369	0,316	0,296

De la Tabla 3.2. Valores del parámetro β (Tortuosidad), se selecciona para lechos de partículas con $0,3 \leq \epsilon_0 \leq 0,5$. El valor de β es igual a 5.

Como el concentrado de Plomo es incomprensible, la esfericidad es constante a cualquier presión.

De la Tabla 8.4, se obtienen los factores de forma superficial, volumétrico y la esfericidad del concentrado de Plomo.

$$\text{Esfericidad } (\psi) = 2,207$$

$$\text{Factor de forma superficial } (\alpha_s) = 0,750$$

$$\text{Factor de forma volumétrico } (\alpha_v) = 0,020$$

Con los datos obtenidos anteriormente y empleando la ecuación de Concha [3.33]:

$$k(\varepsilon) = \frac{\varepsilon^3 x_{12}^{-2}}{\beta(1-\varepsilon)^2 (\alpha_s / \alpha_v)^2}$$

Tabla 8.33 Cálculo de la permeabilidad del queque en una prueba de filtración al vacío mediante la ecuación de Concha

%Sólidos en la pulpa	60 %S				70 %S			
Presión (in.Hg)	10,1	15,0	20,1	25,3	10,3	15,2	20,3	25,5
K(ε) (m²)	2,3E-14	3,2E-14	5,7E-14	1,1E-13	1,1E-13	7,3E-14	4,7E-14	4,5E-14

b) Cálculo de la permeabilidad del queque mediante la ecuación de Ergun

Los datos que se presentan a continuación se han obtenido de la Tabla 8.7 (Tamaños promedios de las partículas contenidas en el queque en una prueba de filtración al vacío).

%Sólidos en la pulpa	60 %S				70 %S			
Presión (in.Hg)	10,1	15,0	20,1	25,3	10,3	15,2	20,3	25,5
Diámetro equivalente(d_e) μm	11,17	12,47	15,39	28,67	28,11	32,53	35,53	41,83
Porosidad del queque (ε)	0,406	0,400	0,393	0,362	0,406	0,369	0,316	0,296

De la tabla anterior y empleando la ecuación de Ergun [3.34] se obtiene la permeabilidad del queque K(ε)

$$k(\varepsilon) = \frac{\varepsilon^3 (d_e \psi)^2}{170(1-\varepsilon)^2}$$

Tabla 8.34 Cálculo de la permeabilidad del queque en una prueba de filtración al vacío mediante la ecuación de Ergun

%Sólidos en la pulpa	60 %S				70 %S			
Presión (in.Hg)	10,1	15,0	20,1	25,3	10,3	15,2	20,3	25,5
$K(\epsilon)$ (m ²)	6,8E-13	7,9E-13	1,1E-12	2,7E-12	4,3E-12	3,8E-12	2,4E-12	2,6E-12

c) Cálculo de la permeabilidad del queque mediante la ecuación de Kozeny & Carman

Los datos que se presentan a continuación se han obtenido de la Tabla 8.7 (Tamaños promedios de las partículas contenidas en el queque en una prueba de filtración al vacío).

%Sólidos en la pulpa	60 %S				70 %S			
Presión (in.Hg)	10,1	15,0	20,1	25,3	10,3	15,2	20,3	25,5
Diámetro Equivalente(d_e) (μm)	11,17	12,47	15,39	28,67	28,11	32,53	35,53	41,83
Porosidad del queque (ϵ)	0,406	0,400	0,393	0,362	0,406	0,369	0,316	0,296

De la Tabla 3.2. Valores del parámetro β (Tortuosidad), se selecciona para lechos de partículas con $0,3 \leq \epsilon_0 \leq 0,5$. El valor de β es igual a 5.

Empleando la ecuación de Kozeny & Carman [3.31]:

$$k(\epsilon) = \frac{\epsilon^3 d_e^2 \psi^2}{36(1-\epsilon)^2 \beta}$$

Tabla 8.35 Cálculo de la permeabilidad del queque en una prueba de filtración al vacío mediante la ecuación de Kozeny & Carman

%Sólidos en la pulpa	60 %S				70 %S			
Presión (in.Hg)	10,1	15,0	20,1	25,3	10,3	15,2	20,3	25,5
$K(\epsilon)$ (m ²)	6,4E-13	7,5E-13	1,1E-12	2,6E-12	4,0E-12	3,6E-12	2,3E-12	2,5E-12

Tabla 8.36 Cuadro resumen de los valores de la permeabilidad del queque para una prueba de filtración al vacío empleando las ecuaciones de Concha, Ergun y Kozeny & Carman

PRESIÓN (in.Hg)	PERMEABILIDAD *10 ⁻¹⁴ (m ²)							
	60 %S				70 %S			
	10,1	15,0	20,1	25,3	10,3	15,2	20,3	25,5
CONCHA	2,3	3,2	5,7	10,8	10,6	7,3	4,7	4,5
ERGUN	67,8	79,2	112,0	273,0	427,0	382,0	244,2	261,0
KOZENY & CARMAN	64,0	74,8	106,0	258,0	404,0	361,1	231,0	246,0

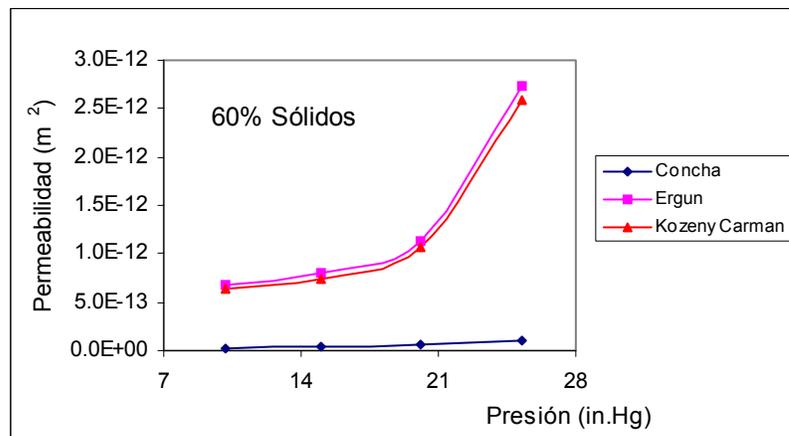


Figura 8.8 Curvas comparativas de permeabilidad del queque empleando las ecuaciones de Concha, Ergun y Kozeny & Carman obtenidas de las pruebas de filtración al vacío con una pulpa al 60% de sólidos

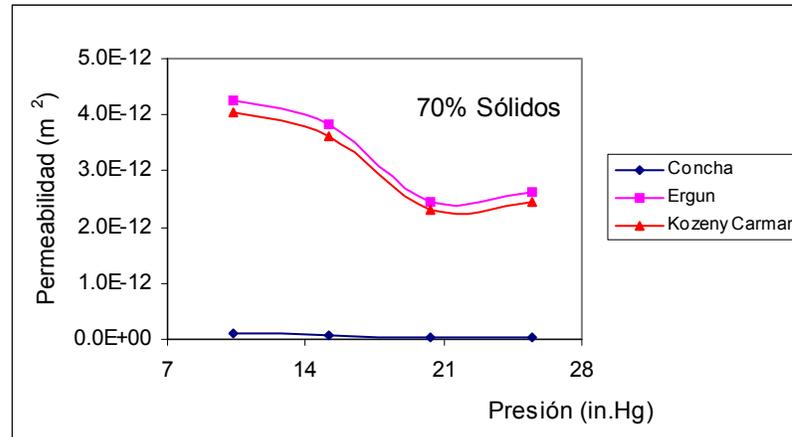


Figura 8.9 Curvas comparativas de permeabilidad del queque empleando las ecuaciones de Concha, Ergun y Kozeny & Carman obtenidas de las pruebas de filtración al vacío con una pulpa al 70% de sólidos

d) Cálculo de la permeabilidad del queque mediante la ecuación de Massarani

Las tablas que se presentan a continuación de tiempo, presión y volumen de solución filtrada han sido extraídos de las prueba de filtración al vacío a distintos porcentajes de sólidos (ver Tablas de reporte de humedades: 8.10, 8.12, 8.14 y 8.16).

De la Tabla 8.10 Reporte de humedades a 50% de sólidos:

50 %SÓLIDOS					
Tiempo filtración (min)	Volumen (ml)	Velocidad percolación (q) (m / s)	(Δp) (in.Hg)	(Δp) Pa	$\Delta p / q \cdot L$ (kg / m ³ s)
90	325,5	5,48E-06	10,2	34428,280	1,26E+13
60	311,0	7,85E-06	15,5	52376,137	1,33E+13
60	344,0	8,69E-06	20,5	69420,957	1,60E+13
60	393,0	9,92E-06	25,4	86127,139	1,74E+13

De la Tabla 8.12 Reporte de humedades a 60% de sólidos:

60% SÓLIDOS					
Tiempo filtración (min.)	Volumen (ml)	Velocidad percolación (q) m / s	(Δp) in.Hg	(Δp) Pa	Δp / q*L kg / m ³ s
60	174	4,394E-06	10,1	34117,861	1,553E+13
60	271	6,843E-06	15,0	52376,137	1,531E+13
60	354	8,939E-06	20,1	68151,062	1,525E+13
60	438	1,106E-05	25,3	85506,301	1,546E+13

De la Tabla 8.14 Reporte de humedades a 70% de sólidos:

70 %SÓLIDOS					
Tiempo filtración (min)	Volumen (ml)	Velocidad percolación (q) m / s	(Δp) in.Hg	(Δp) Pa	Δp / q*L kg / m ³ s
60	287,5	7,260E-06	10,3	34964,458	9,632E+12
60	436	1,101E-05	15,2	52376,137	9,514E+12
60	578	1,460E-05	20,3	68574,360	9,396E+12
50	613	1,858E-05	25,4	85929,600	9,252E+12

De la Tabla 8.16 Reporte de humedades a 80% de sólidos:

80 %SÓLIDOS					
Tiempo filtración (min)	Volumen (ml)	Velocidad percolación (q) m / s	(Δp) in.Hg	(Δp) Pa	Δp / q*L kg / m ³ s
40	244	9,242E-06	10,0	33863,882	7,328E+12
40	389	1,473E-05	15,2	52376,137	7,109E+12
23	282	1,858E-05	20,6	69844,256	7,519E+12
20	277	2,098E-05	25,5	86352,898	8,230E+12

De las tablas obtenidas y empleando la ecuación de Massarani [3.16] (para flujos de percolación) se obtiene la permeabilidad del queque en la filtración al vacío.

$$\frac{\Delta p_e}{L} = \frac{\mu}{k(\varepsilon)} q + \frac{p_f c(\varepsilon)}{\sqrt{k(\varepsilon)}} q^2$$

Tabla 8.37 Datos resumen de velocidad de percolación y $\Delta p/q^*L$ a distintos porcentajes de sólidos obtenidos de las pruebas de filtración al vacío

50% Sólidos		60% Sólidos		70% Sólidos		80% Sólidos	
Veloc _{percolac} (m/s)	$\Delta p / q^*L$ kg / m ³ s	Veloc _{percolac} (m/s)	$\Delta p / q^*L$ kg / m ³ s	Veloc _{percolac} (m/s)	$\Delta p / q^*L$ kg / m ³ s	Veloc _{percolac} (m/s)	$\Delta p / q^*L$ kg / m ³ s
5,48E-06	1,26E+13	4,39E-06	1,55E+13	7,26E-06	9,63E+12	9,24E-06	7,33E+12
7.85E-06	1,33E+13	6,84E-06	1,53E+13	1,10E-05	9,51E+12	1,47E-05	7,11E+12
8,69E-06	1,60E+13	8,94E-06	1,523E+13	1,46E-05	9,40E+12	1,86E-05	7,52E+12
9.92E-06	1,74E+13	1,11E-05	1,55E+13	1,86E-05	9,25E+12	2,10E-05	8,23E+12

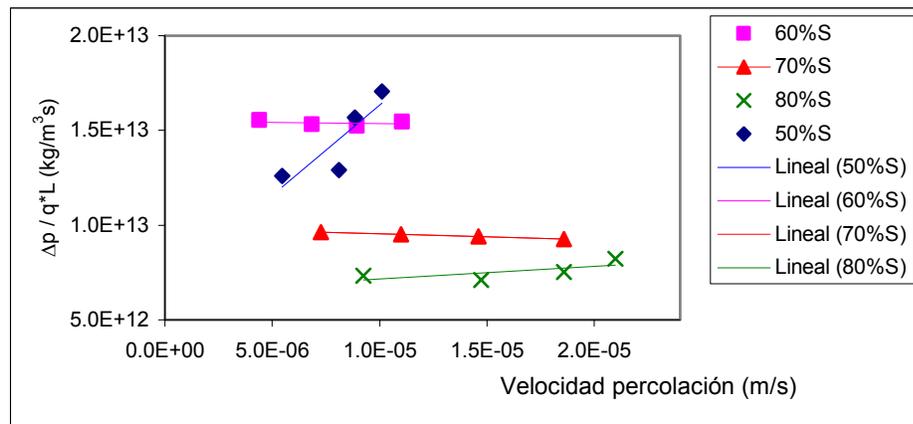


Figura 8.10 Permeabilidad del queque a distintos porcentajes de sólidos obtenida de las pruebas de filtración al vacío empleando el flujo de percolación (modelo de Massarani)

Tabla 8.38 Valores de la permeabilidad del queque a distintos porcentajes de sólidos en una prueba de filtración al vacío mediante la ecuación de Massarani

% Sólidos en la pulpa	50	60	70	80
Permeabilidad $k(\epsilon)$ (m ²)	1,655E-16	6,456E-17	1,012E-16	1,547E-16

8.5.1.6. Resistencia específica del queque y medio filtrante

Para la determinación de la resistencia específica del queque y medio filtrante se empleó la ecuación de Wakeman & Tarleton.

a) Resistencia específica del queque y medio filtrante mediante la ecuación de Wakeman & Tarleton

De las tablas de reporte de humedades (ver Tablas 8.10, 8.12, 8.14 y 8.16) y siendo constante: la densidad de sólido ($\rho_s = 5930 \text{ Kg/m}^3$) y el área de filtrado ($A = 0,011\text{m}^2$), se obtiene la porosidad del queque a distintos porcentajes de sólidos reemplazando en las siguientes ecuaciones:

$$\varphi_0 = \frac{\rho_0 - \rho_f}{\rho_s - \rho_f} \quad X = \frac{m_s}{m_s + m_f} \quad \varphi = \frac{\rho_f * X}{\rho_s(1 - X) + \rho_f * X} \quad \varepsilon = 1 - \varphi$$

Donde:

- ρ_f : Densidad del filtrado
- ρ_0 : Densidad de la pulpa
- ρ_s : Densidad del sólido
- φ_0 : Fracción volumétrica
- φ : Fracción de sólidos en peso del queque
- X : Porcentaje de sólidos en peso del queque
- ε : Porosidad del queque
- m_s : Masa del queque seco
- m_f : Masa del queque húmedo

Tabla 8.39 Porosidad del queque a 50% de sólidos obtenida de una prueba de filtración al vacío

	Unidades	50% SÓLIDOS			
Presión (P)	in.Hg	10,2	15,5	20,5	25,4
Presión (P)	Pa	34428	52376	69421	86127
Densidad de la pulpa (ρ_0)	Kg/m ³	1711,4	1711,4	1711,4	1711,4
Densidad del filtrado (ρ_f)	Kg/m ³	1000	1000	1000	1000
Viscosidad del filtrado (μ)	Pa*s	0,001	0,001	0,001	0,001
Fracción volumétrica (φ_0)	---	0,144	0,144	0,144	0,144
Razón de masa del queque	---	1,091	1,103	1,109	1,109
Sólidos en peso del queque (X)	---	0,917	0,907	0,902	0,902
Fracción sólidos en el queque (φ)	---	0,650	0,621	0,607	0,607
Porosidad del queque (ε)	---	0,350	0,379	0,393	0,393

Tabla 8.40 Porosidad del queque a 60% de sólidos obtenida de una prueba de filtración al vacío

	Unidades	60% SÓLIDOS			
Presión (P)	in.Hg	10,1	15,0	20,1	25,3
Presión (P)	Pa	34118	50880	68151	85506
Densidad de la pulpa (ρ_0)	Kg/m ³	1995,3	1995,3	1995,3	1995,3
Densidad del filtrado (ρ_f)	Kg/m ³	1000	1000	1000	1000
Viscosidad del filtrado (μ)	Pa*s	0,001	0,001	0,001	0,001
Fracción volumétrica (φ_0)	---	0,202	0,202	0,202	0,202
Razón de masa del queque	---	1,115	1,112	1,109	1,095
Sólidos en peso del queque (X)	---	0,897	0,899	0,902	0,913
Fracción sólidos en el queque (φ)	---	0,594	0,600	0,607	0,639
Porosidad del queque (ε)	---	0,406	0,400	0,393	0,362

Tabla 8.41 Porosidad del queque a 70% de sólidos obtenida de una prueba de filtración al vacío

	Unidades	70% SÓLIDOS			
Presión (P)	in.Hg	10,3	15,2	20,3	25,5
Presión (P)	Pa	34964	51558	68574	86353
Densidad de la pulpa (ρ_0)	Kg/m ³	2392,1	2392,1	2392,1	2392,1
Densidad del filtrado (ρ_f)	Kg/m ³	1000	1000	1000	1000
Viscosidad del filtrado (μ)	Pa*s	0,001	0,001	0,001	0,001
Fracción volumétrica (ϕ_0)	---	0,282	0,282	0,282	0,282
Razón de masa del queque	---	1,115	1,099	1,078	1,071
Sólidos en peso del queque (X)	---	0,897	0,910	0,928	0,934
Fracción sólidos en el queque (ϕ)	---	0,594	0,631	0,684	0,704
Porosidad del queque (ϵ)	---	0,406	0,369	0,316	0,296

Tabla 8.42 Porosidad del queque a 80% de sólidos obtenida de una prueba de filtración al vacío

	Unidades	80% SÓLIDOS			
Presión (P)	in.Hg	10,0	15,2	20,6	25,5
Presión (P)	Pa	33864	51304	69844	86353
Densidad de la pulpa (ρ_0)	kg/m ³	2985,9	2985,9	2985,9	2985,9
Densidad del filtrado (ρ_f)	kg/m ³	1000	1000	1000	1000
Viscosidad del filtrado (μ)	Pa*s	0,001	0,001	0,001	0,001
Fracción volumétrica (ϕ_0)	---	0,403	0,403	0,403	0,403
Razón de masa del queque	---	1,136	1,119	1,133	1,099
Sólidos en peso del queque (X)	---	0,881	0,893	0,882	0,910
Fracción sólidos en el queque (ϕ)	---	0,554	0,586	0,559	0,630
Porosidad del queque (ϵ)	---	0,446	0,414	0,441	0,370

Tabla 8.43 Valores de la porosidad del queque a distintos porcentajes de sólidos obtenidas de las pruebas de filtración al vacío

Presión (in.Hg)	Porosidad del queque			
	50 %S	60 %S	70 %S	80 %S
10,0	0,350	0,406	0,406	0,446
15,0	0,379	0,400	0,369	0,414
20,0	0,393	0,393	0,316	0,441
25,0	0,393	0,362	0,296	0,370

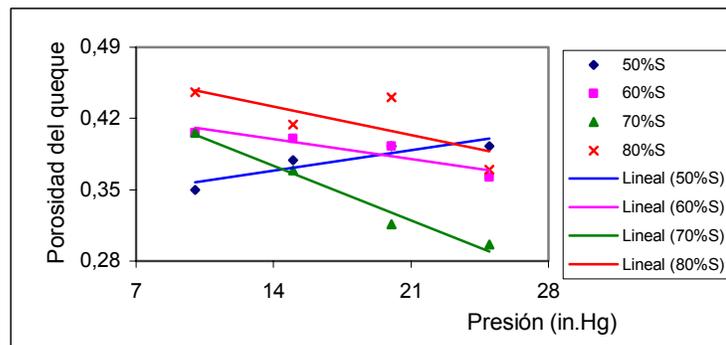


Figura 8.11 Porosidad del queque en función de la presión de operación y del porcentaje de sólidos obtenidas de la pruebas de filtración al vacío

De los datos de tiempo de filtrado y volumen de solución filtrada obtenidas de las pruebas de filtración al vacío (ver Tablas 8.10, 8.12, 8.14 y 8.16) se grafica $t/V_f(t)$ versus $V_f(t)$ a fin de obtener la resistencia específica del medio filtrante (R_m), la permeabilidad del queque $K(\varepsilon)$ y la resistencia específica del queque (α). Donde $b = tg\theta$ es la pendiente de la recta obtenida y a es su intersección con el eje de las ordenadas. Los parámetros son obtenidos mediante las siguientes ecuaciones:

$$R_m = a \frac{\Delta p S}{\mu} \quad K(\varepsilon) = \frac{1}{b} \frac{\mu}{2S^2 \Delta p} \frac{\varphi_0}{(1 - \varphi_0 - \varepsilon)} \quad \alpha = \frac{l}{K(\varepsilon)}$$

Espesor de la membrana de la placa cerámica ($l = 0.5\text{mm}$)

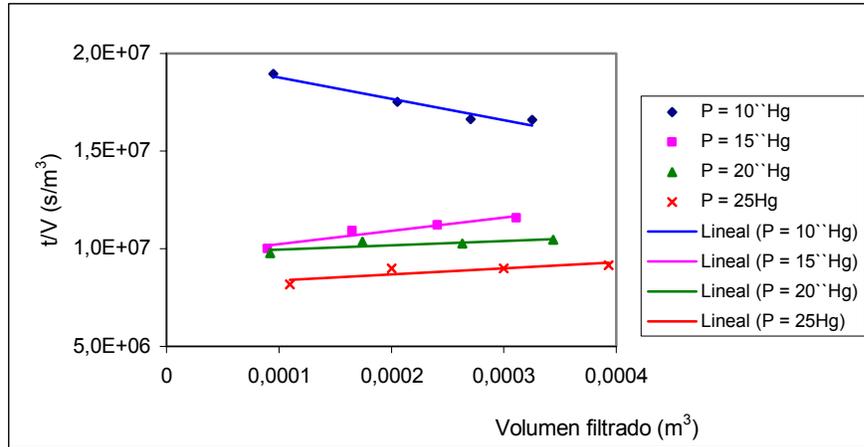


Figura 8.12 Gráficas t/V versus V a 50% de sólidos obtenida de una prueba de filtración al vacío

Tabla 8.44 Valores de la resistencia específica del medio filtrante, permeabilidad del queque y resistencia específica del queque a 50% de sólidos

50%S				
PRESIÓN (in.Hg)	10,1	15,5	20,5	25,4
ϵ_0	0,350	0,379	0,393	0,393
R_m (m ⁻¹)	7,52E+12	5,50E+12	7,41E+12	7,45E+12
$K_{(s)}$ (m ²)	-8,06E-16	7,97E-16	1,72E-15	7,58E-16
α (m ⁻¹)	-6,20E+11	6,27E+11	2,91E+11	6,59E+11

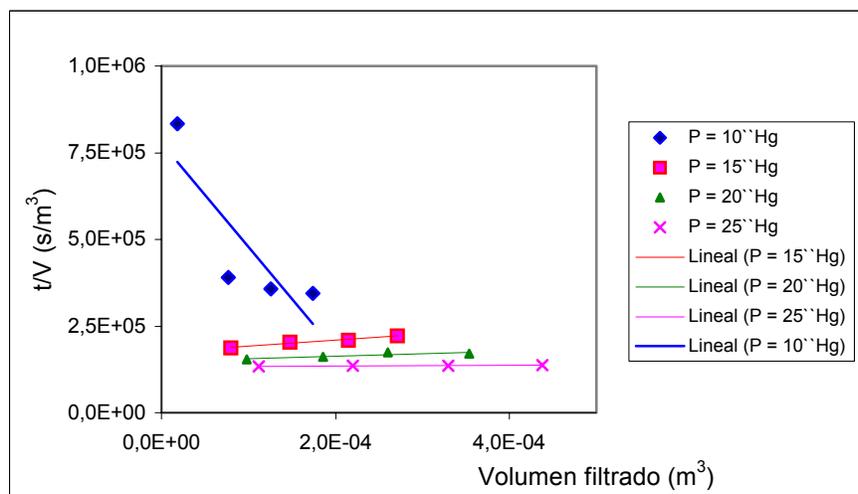


Figura 8.13 Gráficas t/V versus V a 60% de sólidos obtenida de una prueba de filtración al vacío

Tabla 8.45 Valores de la resistencia específica del medio filtrante, permeabilidad del queque y resistencia específica del queque a 60% de sólidos

60%S				
PRESIÓN (in.Hg)	10,1	15,0	20,1	25,3
ϵ_0	0,406	0,400	0,393	0,362
R_m (m ⁻¹)	1,75E+13	5,88E+12	6,67E+12	7,54E+12
$K_{(\epsilon)}$ (m ²)	-5,34E-17	6,44E-16	1,16E-15	8,43E-15
α (m ⁻¹)	-9,36E+12	7,77E+11	4,30E+11	5,93E+10

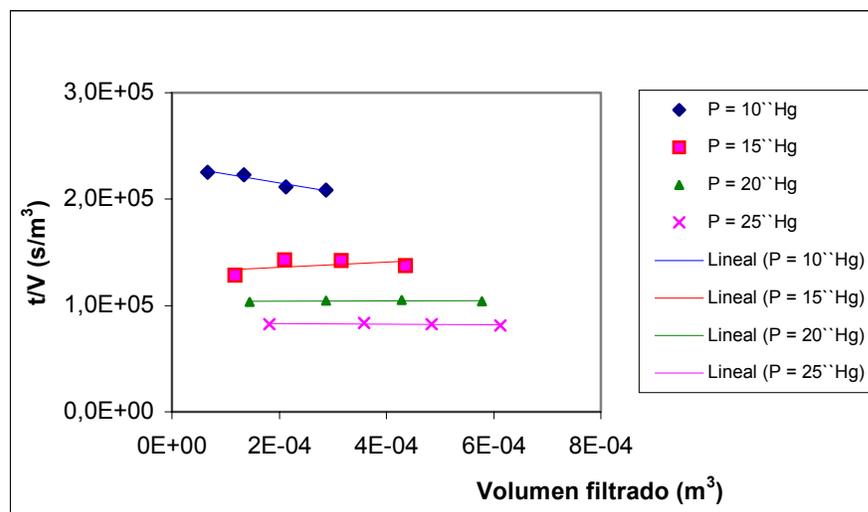


Figura 8.14 Gráficas t/V versus V a 70% de sólidos obtenida de una prueba de filtración al vacío

Tabla 8.46 Valores de la resistencia específica del medio filtrante, permeabilidad del queque y resistencia específica del queque a 70% de sólidos

70%S				
PRESIÓN (in.Hg)	10,3	15,2	20,3	25,5
ϵ_0	0,406	0,369	0,316	0,296
R_m (m ⁻¹)	5,35E+12	4,47E+12	4,70E+12	4,19E+12
$K_{(\epsilon)}$ (m ²)	-2,07E-15	5,54E-15	1,19E-13	2,48E-15
α (m ⁻¹)	-2,42E+11	9,02E+10	4,21E+09	2,01E+11

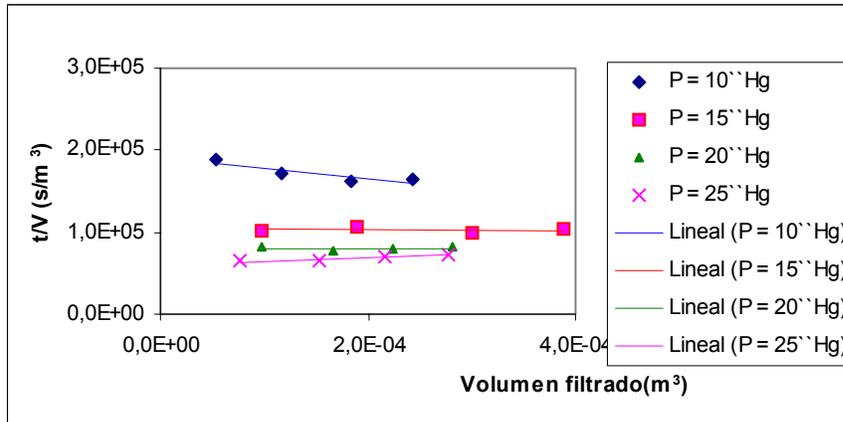


Figura 8.15 Gráficas t/V versus V a 80% de sólidos obtenida de una prueba de filtración al vacío

Tabla 8.47 Valores de la resistencia específica del medio filtrante, permeabilidad del queque y resistencia específica del queque a 80% de sólidos

80%S				
PRESIÓN (in.Hg)	10,0	15,2	20,6	25,5
ϵ_0	0,446	0,414	0,441	0,370
R_m (m ⁻¹)	4,41E+12	3,52E+12	3,62E+12	3,48E+12
$K_{(e)}$ (m ²)	-1,34E-15	-3,64E-14	4,03E-14	2,47E-15
α (m ⁻¹)	-3,72E+11	-1,37E+10	1,24E+10	2,02E+11

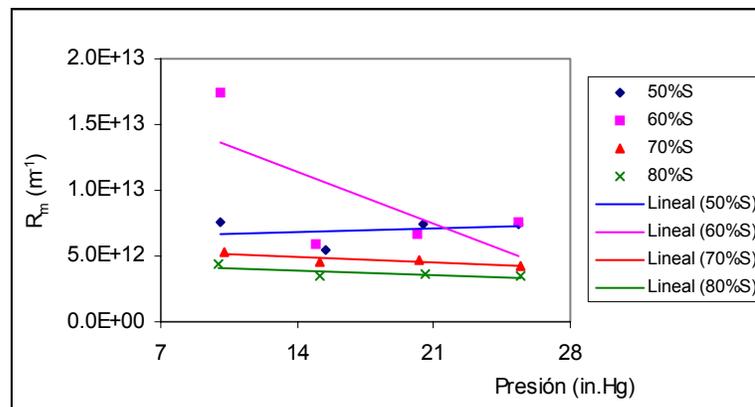


Figura 8.16 Curvas comparativas de la resistencia específica del queque (R_m) obtenida de las pruebas de filtración al vacío a distintos porcentajes de sólidos

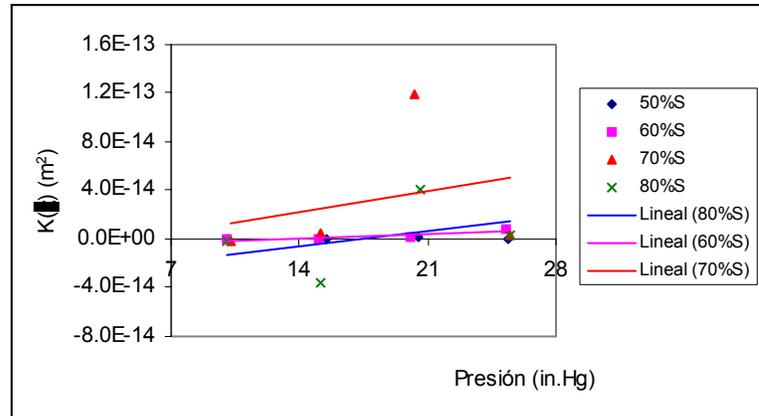


Figura 8.17 Curvas comparativas de la permeabilidad del queque ($K(\epsilon)$) obtenidas de las pruebas de filtración al vacío a distintos porcentajes de sólidos

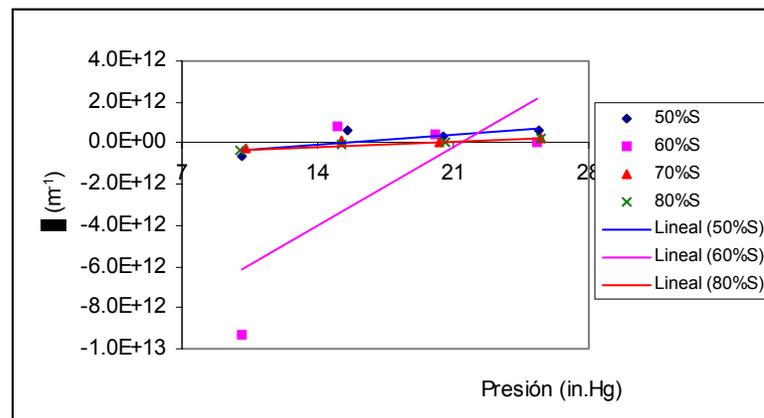


Figura 8.18 Curvas comparativas de la resistencia específica del medio filtrante (α) obtenida de las pruebas de filtración al vacío a distintos porcentajes de sólidos

8.5.1.7. Cálculo de espesores del queque a distintos porcentajes de sólidos

Empleando la data obtenida a distintos porcentajes de sólidos (ver Tablas 8.39 al 8.42) y siendo el área de la placa cerámica 0.011m^2 , se calcula los espesores del queque mediante la ecuación [5.14].

$$\ell(t) = \frac{\varphi_0}{1 - \varphi_0 - \epsilon_0} \frac{V_f(t)}{S} \quad [5.14]$$

Tabla 8.48 Cálculo de espesores del queque obtenidos de las pruebas de filtración al vacío con una pulpa al 50% de sólidos y distintas presiones

% Sólidos	φ_0	Presión (in.Hg)	Porosidad	Volumen (ml)	Tiempo filtración(min)	Espesor queque (mm)
50	0,144	10,2	0,350	0,0	0	0,00
				95,0	30	2,46
				205,5	60	5,33
				270,5	75	7,02
				325,5	90	8,44
		15,5	0,379	0,0	0	0,00
				90,0	15	2,48
				165,0	30	4,54
				241,0	45	6,63
				311,0	60	8,56
		20,5	0,393	0,0	0	0,00
				92,0	15	2,61
				174,0	30	4,93
				263,0	45	7,46
				344,0	60	9,75
		25,4	0,393	0,0	0	0,00
				110,0	15	3,12
				200,0	30	5,67
				300,0	45	8,51
				39,0	60	11,14

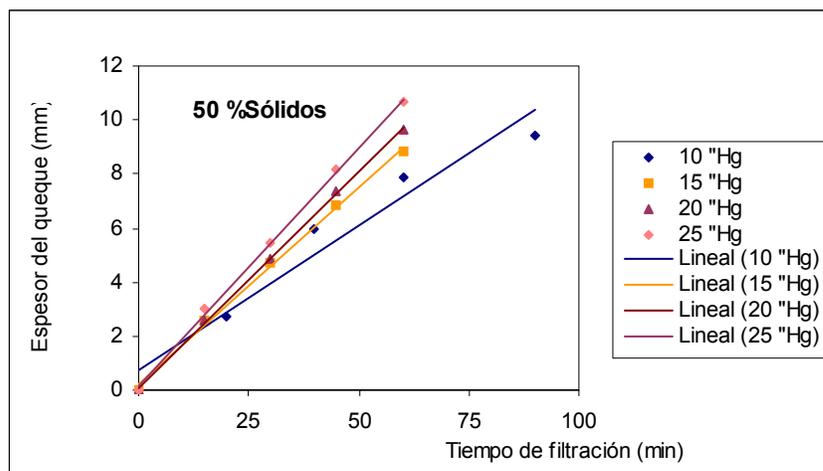


Figura 8.19 Representación gráfica del incremento del espesor del queque a través del tiempo empleando una pulpa a 50% de sólidos

Tabla 8.49 Cálculo de espesores del queque obtenidos de las pruebas de filtración al vacío con una pulpa a 60% de sólidos y distintas presiones

% Sólidos	φ_0	Presión (in.Hg)	Porosidad	Volumen (ml)	Tiempo filtración(min)	Espesor queque (mm)
60	0,202	10,1	0,406	0,0	0	0,00
				18,0	15	0,84
				77,0	30	3,60
				126,0	45	5,90
				174,0	60	8,15
		15,0	0,400	0,0	0	0,00
				80,0	15	3,69
				148,0	30	6,82
				215,0	45	9,91
				271,0	60	12,49
		20,1	0,393	0,0	0	0,00
				98,0	15	4,44
				186,0	30	8,43
				260,0	45	11,78
				354,0	60	16,04
		25,3	0,362	0,0	0	0,00
				112,0	15	4,71
				220,0	30	9,25
				330,0	45	13,87
				438,0	60	18,41

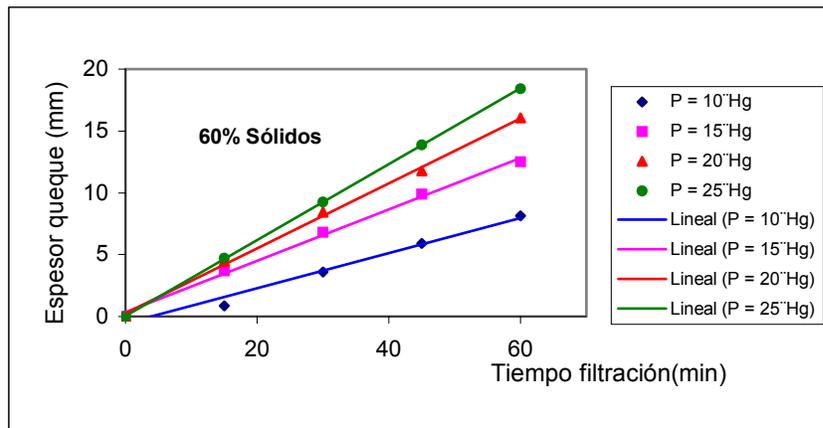


Figura 8.20 Representación gráfica del incremento del espesor del queque a través del tiempo empleando una pulpa a 60% de sólidos

Tabla 8.50 Cálculo de espesores del queque obtenidos de las pruebas de filtración al vacío con una pulpa a 70% de sólidos y distintas presiones

% Sólidos	φ_0	Presión (in.Hg)	Porosidad	Volumen (ml)	Tiempo filtración (min)	Espesor queque (mm)
70	0,282	10,3	0,406	0,0	0	0,00
				66,5	15	5,47
				134,5	30	11,07
				212,5	45	17,49
				287,5	60	23,66
		15,2	0,369	0,0	0	0,00
				117,0	15	8,61
				210,0	30	15,46
				316,0	45	23,27
				436,0	60	32,10
		20,3	0,316	0,0	0	0,00
				145,0	15	9,27
				287,0	30	18,35
				429,0	45	27,43
				578,0	60	36,96
		25,5	0,296	0,0	0	0,00
				182,0	15	11,07
				359,0	30	21,83
				484,0	40	29,44
				613,0	50	37,28

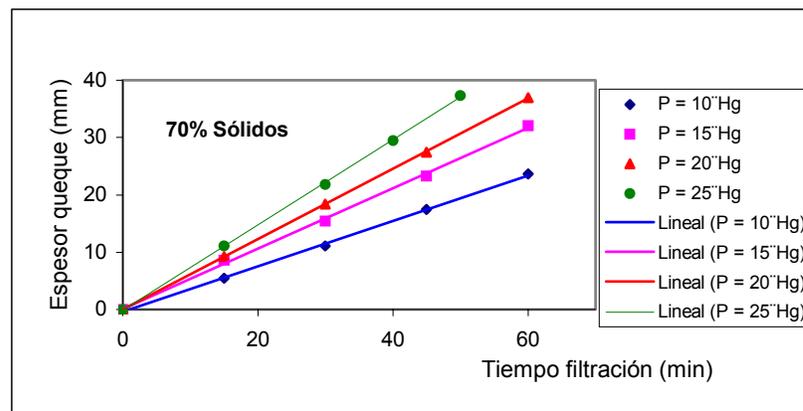


Figura 8.21 Representación gráfica del incremento del espesor del queque a través del tiempo empleando una pulpa a 70% de sólidos

Tabla 8.51 Cálculo de espesores del queque obtenidos de las pruebas de filtración al vacío con una pulpa a 80% de sólidos y distintas presiones

% Sólidos	φ_0	Presión (in.Hg)	Porosidad	Volumen (ml)	Tiempo filtración(min)	Espesor queque (mm)
80	0,403	10,0	0,446	0,0	0	0,00
				53,0	10	12,83
				117,0	20	28,32
				184,0	30	44,53
				244,0	40	59,05
		15,2	0,414	0,0	0	0,00
				98,0	10	19,63
				190,0	20	38,06
				300,0	30	60,10
				389,0	40	77,92
		20,6	0,441	0,0	0	0,00
				98,0	8	23,03
				166,0	13	39,02
				223,0	18	52,41
				282,0	23	66,28
		25,5	0,370	0,0	0	0,00
				77,0	5	12,39
				153,0	10	24,62
				216,0	15	34,75
				277,0	20	44,57

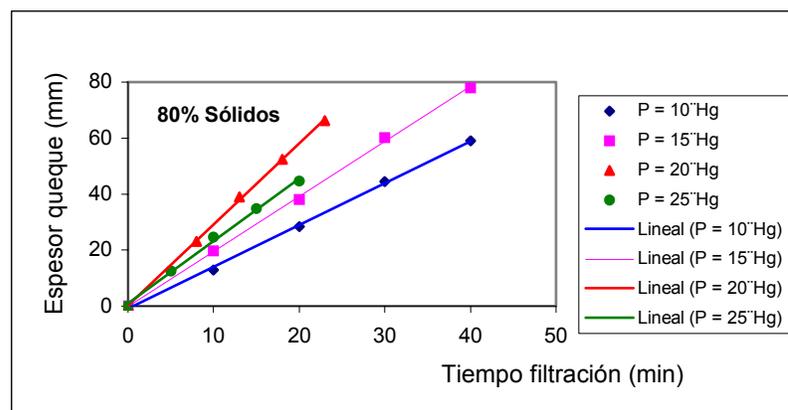


Figura 8.22 Representación gráfica del incremento del espesor del queque a través del tiempo empleando una pulpa a 80% de sólidos

8.5.2. PRUEBAS DE FILTRACION A PRESION

Para la filtración a presión se mantuvo constante: el flujo de aire suministrado por la compresora al filtro, el nivel de pulpa en la tina y las variables de operación del equipo a diferentes porcentajes de sólidos.

Condiciones de operaciones

Temperatura de la pulpa: 18°C

Presión inicial de trabajo: 2 bar

Distancia entre raspadores: 25,5 mm

Tiempo de la P.C en dar una vuelta: 13 s

Datos de la Placa Cerámica

Tipo de placa cerámica: S3

Espesor de la P.C: 24,2 mm

Espesor de la membrana de la P.C.: 0,5 mm

Área de la P.C.: 0,011 m²

8.5.2.1. Reportes de humedades

Tabla 8.52 Reporte de humedades para una prueba de filtración a presión empleando una pulpa de 50% de Sólidos

50% SÓLIDOS						
Tiempo filtración (min.)	Vol. solución Filtrada(ml)	Presión (bar)	Peso (g) Húmedo	Peso (g) Seco	% H₂O queque	Humedad promedio
5	49,0	1,9	15,11	14,03	7,15	8,04
10	50,0	2,0				
20	76,0	2,0				
30	109,0	2,0	20,93	19,12	8,65	
40	78,0	2,0				
50	100,0	2,0	44,99	41,24	8,34	
60	88,0	2,0				
10	113,0	3,0	48,85	44,96	7,96	7,32
20	93,0	3,0				
30	148,0	3,0	67,35	63,33	5,97	
40	140,0	3,0				
50	108,0	3,0	40,52	37,28	8,00	
60	110,0	3,0				
10	125,0	4,0	135,81	126,49	6,86	6,63
20	140,0	4,0				
30	109,0	4,0	148,06	137,82	6,92	
40	125,0	4,0				
50	100,0	4,0	132,06	123,99	6,11	
60	88,0	4,0				
10	165,0	5,0	82,77*	79,04	4,51	5,50
20	125,0	5,0	264,58	251,08	5,10	
30	173,0	5,0	222,52	208,53	6,29	
40	130,0	5,0	88,90	83,49	6,09	
50	134,0	5,0				
60	108,0	5,0				
10	194,0	6,2	172,00	162,31	5,63	5,31
20	132,0	6,2	113,00	106,91	5,39	
30	113,0	6,2	126,93	120,70	4,91	

(*) Hubo pérdida de muestra

Tabla 8.53 Reporte de humedad para una prueba de filtración a presión empleando una pulpa de 60% de Sólidos

60% SÓLIDOS						
Tiempo filtración (min.)	Vol. Solución Filtrada(ml)	Presión (bar)	Peso (g) Húmedo	Peso (g) Seco	% H₂O queque	Humedad promedio
5	96,0	2,2	68,70	64,00	6,84	7,91
10	69,0	2,2				
20	1150	2,2				
30	120,0	2,2	88,88	82,35	7,35	
40	105,0	2,2				
50	138,0	2,2	126,40	114,34	9,54	
60	120,0	2,2				
10	174,0	3,0	237,20	218,59	7,85	7,36
20	145,0	3,2				
30	180,0	3,2	229,45	212,57	7,36	
40	166,0	3,2				
50	205,0	3,2	278,82	259,67	6,87	
60	178,0	3,2				
10	295,0	4,0	366,95	352,15	4,03	3,92
20	255,0	4,0				
30	285,0	4,0	104,98	101,00	3,79	
40	280,0	4,0				
50	260,0	4,0	765,65	735,60	3,92	
60	225,0	4,0				
10	290,0	5,0	366,37	358,18	2,24	2,47
20	313,0	5,0	772.,75	754,60	2,35	
30	290,0	5,0	782,31	762,40	2,55	
40	295,0	5,0	914,85	889,68	2,75	
50	295,0	5,0				
60	315,0	5,0				
10	325,0	6,2	901,03	882,90	2,01	2,01

Tabla 8.54 Reporte de humedad de una prueba de filtración a presión, empleando una pulpa de 70% de Sólidos

70% SÓLIDOS						
Tiempo filtracion (min.)	Vol. solución Filtrada(ml)	Presión (bar)	Peso (g) Húmedo	Peso (g) Seco	% H ₂ O queque	Humedad promedio
5	84,0	2,2	220,40	208,02	5,62	5,44
15	1920	2,2	542,35	512,32	5,54	
20	125,0	2,2	506,78	479,59	5,37	
30	238,0	2,2	724,37	686,33	5,25	
40	233,0	2,2				
50	211,0	2,2				
60	211,0	2,2				
10	288,0	3,2	716,21	681,12	4,90	4,86
20	283,0	3,2				
30	278,0	3,2	803,23	764,54	4,82	
40	283,0	3,2				
45	120,0	3,2	782,53	744,59	4,85	
10	385,0	4,2	1420,51	1356,31	4,52	4,56
20	285,0	4,2	1069,49	1020,45	4,59	
30	305,0	4,2	930,49	887,81	4,59	
10	391,0	5,2	1542,45	1475,95	4,31	4,22
20	250,0	5,0	934,72	896,12	4,13	
30	335,0	5,0	946,76	906,93	4,21	
10	340,0	6,0	1008,38	965,93	4,21	4,17
20	305,0	6,4	1029,09	986,39	4,15	
30	338,0	6,2	1434,35	1374,64	4,16	

Tabla 8.55 Reporte de humedad de una prueba de filtración a presión empleando una pulpa de 80% de Sólidos

80% SÓLIDOS						
Tiempo filtración (min.)	Vol. solución Filtrada(ml)	Presión (bar)	Peso (g) Húmedo	Peso (g) Seco	% H ₂ O queque	Humedad promedio
5	67,5	2,0	222,46	209,69	5,74	5,81
10	83,0	2,0	184,53	174,08	5,66	
15	105,0	2,0	248,90	233,87	6,04	
5	100,0	3,0	232,73	221,84	4,68	5,15
10	95,0	3,0	265,34	251,22	5,32	
15	90,0	3,0	249,40	235,80	5,45	
5	160,0	4,0	491,74	468,68	4,69	4,80
10	105,0	4,0	319,04	303,84	4,76	
15	120,0	4,0	383,18	364,26	4,94	
5	170,0	5,0	581,68	554,29	4,71	4,54
10	115,0	5,0	381,14	364,35	4,41	
15	145,0	5,0	548,30	523,64	4,50	
5	163,0	6,0	518,33	497,41	4,04	4,04
10	90,0	6,0	327,41	314,51	3,94	
15	195,0	6,2	828,46	793,63	4,20	
20	115,0	6,6	471,95	453,12	3,99	

Tabla 8.56 Reporte de producción de una prueba de filtración a presión empleando una pulpa a 50% de Sólidos

50%S	Unidades	PRESIÓN (bar)				
		2,0	3,0	4,0	5,0	6,2
Peso seco total del queque filtrado	g	74,39	145,57	388,30	622,14	389,92
Volumen filtrado	l	0,550	0,712	0,687	0,835	0,439
Volumen filtrado / tiempo	l / h	0,550	0,712	0,687	0,835	0,878
Queque seco / Volumen filtrado	kg / m ³	135,3	204,5	565,2	745,1	888,2
Queque seco / tiempo	kg / h	0,074	0,146	0,388	0,622	0,780
Queque seco/ tiempo/ área filtrante	kg / h / m ²	6,76	13,23	35,30	56,56	70,90

Tabla 8.57 Reporte de producción de una prueba de filtración a presión empleando una pulpa a 60% de Sólidos

60%S	Unidades	PRESIÓN (bar)				
		2,2	3,2	4,0	5,0	6,2
Peso seco total del queque filtrado	g	260,69	690,83	1188,75	2764,86	882,90
Volumen filtrado	l	0,763	1,048	1,600	1,798	0,325
Volumen filtrado / tiempo	l / h	0,763	1,048	1,600	1,798	1,950
Queque seco / Volumen filtrado	Kg / m ³	341,7	659,2	743,0	1537,7	2716,6
Queque seco / tiempo	Kg / h	0,261	0,691	1,189	2,765	5,297
Queque seco/ tiempo/ área filtrante	kg / h / m ²	23,7	62,8	108,1	251,4	481,6

Tabla 8.58 Reporte de producción de una prueba de filtración a presión empleando una pulpa a 70% de Sólidos

70%S	Unidades	PRESIÓN (bar)				
		2,2	3,2	4,2	5,1	6,2
Peso seco total del queque filtrado	g	1886,26	2190,25	3264,57	3279,00	3327,00
Volumen filtrado	l	1,294	1,252	0,975	0,976	0,983
Volumen filtrado / tiempo	l / h	1,294	1,669	1,950	1,952	1,966
Queque seco / Volumen filtrado	kg / m ³	1457,7	1749,4	3348,3	3359,6	3384,5
Queque seco / tiempo	kg / h	1,886	2,920	6,529	6,558	6,654
Queque seco/ tiempo/ área filtrante	kg / h / m ²	171,5	265,5	593,6	596,21	604,92

Tabla 8.59 Reporte de producción de una prueba de filtración a presión empleando una pulpa a 80% de Sólidos

80%S	Unidades	PRESIÓN (bar)				
		2,0	3,0	4,0	5,0	6,2
Peso seco total del queque filtrado	g	617,64	708,86	1136,78	1442,28	1561,26
Volumen filtrado	l	0,256	0,285	0,385	0,430	0,563
Volumen filtrado / tiempo	l / h	1,022	1,140	1,540	1,720	1,689
Queque seco / Volumen filtrado	Kg / m ³	2417,4	2487,2	2952,7	3354,1	3656,6
Queque seco / tiempo	Kg / h	2,471	2,835	4,547	5,769	6,176
Queque seco/ tiempo/ área filtrante	kg / h / m ²	224,6	257,8	413,4	524,5	561,5

Tabla 8.60 Reporte de humedad del queque obtenida de las pruebas de filtración a presión a distintas presiones y porcentajes de sólidos

50% SÓLIDOS		60% SÓLIDOS		70% SÓLIDOS		80% SÓLIDOS	
Δp (bar)	% H ₂ O queque	Δp (bar)	% H ₂ O queque	Δp (bar)	% H ₂ O queque	Δp (bar)	% H ₂ O queque
2,0	8,04	2,2	7,91	2,2	5,44	2,0	5,81
3,0	7,32	3,2	7,36	3,2	4,86	3,0	5,15
4,0	6,63	4,0	3,92	4,2	4,56	4,0	4,80
5,0	5,50	5,0	2,47	5,1	4,22	5,0	4,54
6,2	5,31	6,2	2,01	6,2	4,17	6,2	4,04

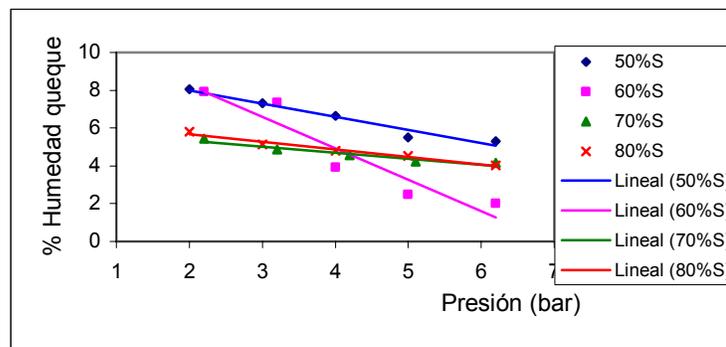


Figura 8.23 Curvas comparativas de porcentaje de humedad del queque obtenidas de las pruebas de filtración a presión a distintos porcentajes de sólidos

Tabla 8.61 Reporte de producción del queque obtenido de las pruebas de filtración a presión a distintos porcentajes de sólidos

50% SÓLIDOS		60% SÓLIDOS		70% SÓLIDOS		80% SÓLIDOS	
Presión	Capacidad	Presión	Capacidad	Presión	Capacidad	Presión	Capacidad
(bar)	(kg / h*m ²)						
2,0	6,76	2,2	23,70	2,2	171,48	2,0	224,60
3,0	13,23	3,2	62,80	3,2	265,49	3,0	257,77
4,0	35,30	4,0	108,07	4,2	593,56	4,0	413,38
5,0	56,56	5,0	251,35	5,1	596,21	5,0	524,47
6,2	70,90	6,2	481,58	6,2	604,92	6,2	561,46

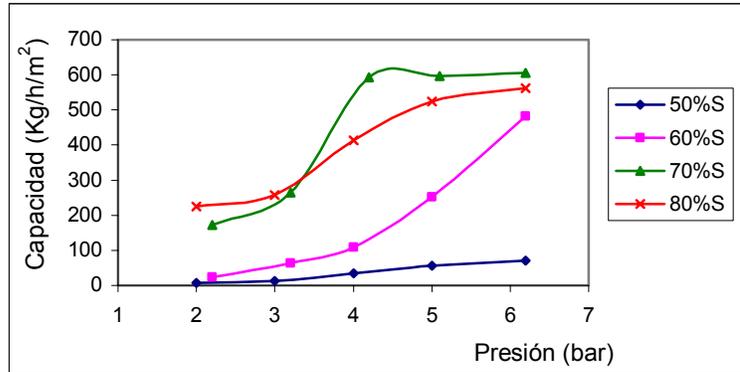


Figura 8.24 Curvas comparativas de la capacidad del filtro a distintas presiones de operación y porcentajes de sólidos obtenidos de pruebas de filtración a presión

Tabla 8.62 Reporte de la capacidad del filtro cerámico minipiloto y la humedad del queque a distintos porcentajes de sólidos

50% SÓLIDOS		60% SÓLIDOS		70% SÓLIDOS		80% SÓLIDOS	
Capacidad	% H ₂ O queque						
6,76	8,04	23,70	7,91	171,48	5,44	224,60	5,81
13,23	7,32	62,80	7,36	265,49	4,86	257,77	5,15
35,30	6,63	108,07	3,92	593,56	4,56	413,38	4,80
56,56	5,50	251,35	2,47	596,21	4,22	524,47	4,54
70,90	5,31	481,58	2,01	604,92	4,17	561,46	4,04

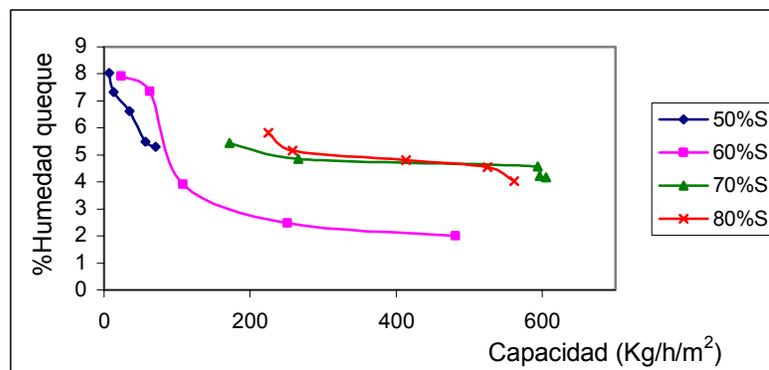


Figura 8.25 Curvas comparativas del porcentaje de humedad del queque en función a la capacidad del filtro a distintos porcentajes de sólidos en una filtración a presión

Tabla 8.63 Reporte de la capacidad del filtro cerámico minipiloto y la permeabilidad del queque a distintos porcentajes de sólidos

50% SÓLIDOS		60% SÓLIDOS		70% SÓLIDOS		80% SÓLIDOS	
Kg/h*m ²	l/h*m ²						
6,76	50,00	23,70	69,36	171,48	117,64	224,60	92,91
13,23	64,73	62,80	95,27	265,49	151,76	257,77	103,64
35,30	62,46	108,07	145,46	593,56	177,27	413,38	140,00
56,56	75,91	251,35	163,46	596,21	177,45	524,47	156,36
70,90	79,82	481,58	177,27	604,92	178,73	561,46	153,55

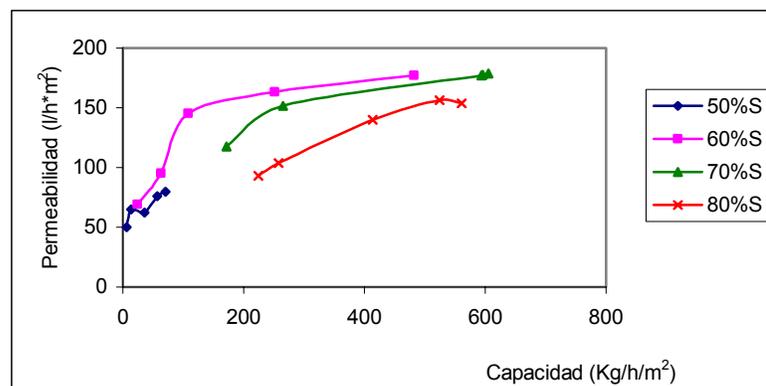


Figura 8.26 Curvas de permeabilidad del queque vs. capacidad del filtro a distintos porcentaje de sólidos obtenidas de las pruebas de filtración a presión

8.5.2.2. Permeabilidad del queque

a) Cálculo de la permeabilidad del queque mediante la ecuación de Massarani

De los cuadros que se presentan a continuación: el tiempo, presión y volumen de solución filtrada han sido extraídos de las pruebas de filtración a presión a distintos porcentajes de sólidos (ver tablas de reporte de humedad: 8.52, 8.53, 8.54 y 8.55).

De la tabla de reporte de humedad 8.52

50 %SÓLIDOS					
Tiempo filtración (min)	Volumen (ml)	Velocidad percolación (q) m / s	(Δp) bar	(Δp) Pa	$\Delta p / q^*L$ kg / m ³ s
60	550	1,389E-05	2,0	198600	2,86E+13
60	712	1,798E-05	3,0	300000	3,34E+13
60	687	1,735E-05	4,0	400000	4,61E+13
60	835	2,109E-05	5,0	500000	4,74E+13
30	439	2,217E-05	6,2	620000	5,59E+13

De la tabla de reporte de humedad 8.53

60 %SÓLIDOS					
Tiempo filtración (min)	Volumen (ml)	Velocidad percolación (q) m / s	(Δp) bar	(Δp) Pa	$\Delta p / q^*L$ kg / m ³ s
60	763	1,927E-05	2,2	220000	2,28E+13
60	1048	2,646E-05	3,2	316700	2,39E+13
60	1600	4,040E-05	4,0	400000	1,98E+13
60	1798	4,540E-05	5,0	500000	2,20E+13
10	325	4,924E-05	6,2	620000	2,52E+13

De la tabla de reporte de humedad 8.54

70 %SÓLIDOS					
Tiempo filtración (min)	Volumen (ml)	Velocidad percolación (q) m / s	(Δp) bar	(Δp) Pa	$\Delta p / q^*L$ kg / m ³ s
60	1294	3,268E-05	2,2	220000	1,35E+13
45	1252	4,215E-05	3,2	320000	1,52E+13
30	975	4,924E-05	4,2	420000	1,71E+13
30	976	4,929E-05	5,1	506700	2,06E+13
30	983	4,965E-05	6,2	620000	2,50E+13

De la tabla de reporte de humedad 8.55

80 %SÓLIDOS					
Tiempo filtración (min)	Volumen (ml)	Velocidad percolación (q) m / s	(Δp) bar	(Δp) Pa	$\Delta p / q^*L$ kg / m ³ s
15	255.5	2,581E-05	2,0	200000	1,55E+13
15	285	2,879E-05	3,0	300000	2,08E+13
15	385	3,889E-05	4,0	400000	2,06E+13
15	430	4,343E-05	5,0	500000	2,30E+13
20	563	4,65E-05	6,0	615000	2,88E+13

De las tablas obtenidas y empleando la ecuación de Massarani [3.16] (para flujos de percolación) se obtiene la permeabilidad del queque en la filtración a presión.

$$\frac{\Delta p_e}{L} = \frac{\mu}{k(\varepsilon)} q + \frac{p_f c(\varepsilon)}{\sqrt{k(\varepsilon)}} q^2$$

Tabla 8.64 Datos resumen de velocidad de percolación y $\Delta p/q^*L$ a distintos porcentajes de sólidos obtenidos de las pruebas de filtración a presión

50% Sólidos		60% Sólidos		70% Sólidos		80% Sólidos	
Veloc _{percolac} (m/s)	$\Delta p / q^*L$ Kg / m ³ s	Veloc _{percolac} (m/s)	$\Delta p / q^*L$ kg / m ³ s	Veloc _{percolac} (m/s)	$\Delta p / q^*L$ kg / m ³ s	Veloc _{percolac} (m/s)	$\Delta p / q^*L$ kg / m ³ s
1,39E-05	2,86E+13	1,93E-05	2,28E+13	3,27E-05	1,35E+13	2,58E-05	1,55E+13
1,80E-05	3,34E+13	2,65E-05	2,39E+13	4,22E-05	1,52E+13	2,88E-05	2,08E+13
1,74E-05	4,61E+13	4,04E-05	1,98E+13	4,92E-05	1,71E+13	3,89E-05	2,06E+13
2,11E-05	4,74E+13	4,54E-05	2,20E+13	4,93E-05	2,06E+13	4,34E-05	2,30E+13
2,22E-05	5,59E+13	4,92E-05	2,52E+13	4,97E-05	2,50E+13	4,27E-05	2,88E+13

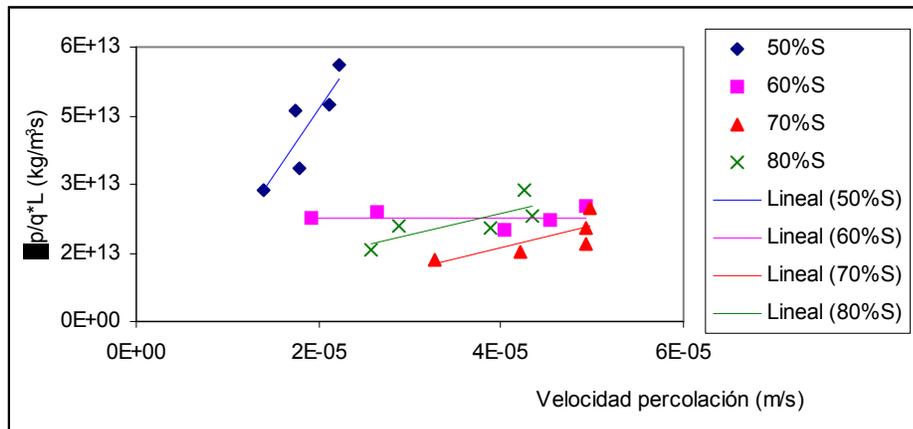


Figura 8.27 Permeabilidad del queque a distintos porcentajes de sólidos obtenida de las pruebas de filtración a presión empleando el flujo de percolación (modelo de Massarani)

Tabla 8.65 Valores de la permeabilidad del queque a distintos porcentajes de sólidos en una filtración a presión mediante la ecuación de Massarani

% Sólidos	50	60	70	80
Permeabilidad $k(\varepsilon)$ (m ²)	8,20E-17	4,39E-17	3,25E-16	2,03E-16

8.5.2.3. Cálculo de la resistencia específica del queque y medio filtrante

a) Resistencia específica del queque y medio filtrante mediante la ecuación de Wakeman & Tarleton

De los cuadros de reporte de humedad (ver tablas 8.52, 8.53, 8.54 y 8.55) y siendo constante: la densidad de sólido ($\rho_s = 5930 \text{ Kg/m}^3$) y el área de filtrado ($A = 0,011\text{m}^2$), se obtiene la porosidad del queque a distintos porcentajes de sólidos reemplazando en las siguientes ecuaciones:

$$\varphi_0 = \frac{\rho_0 - \rho_f}{\rho_s - \rho_f} \quad X = \frac{m_s}{m_s + m_f} \quad \varphi = \frac{\rho_f * X}{\rho_s(1 - X) + \rho_f * X} \quad \varepsilon = 1 - \varphi$$

Donde:

- ρ_f : Densidad del líquido
- ρ_0 : Densidad de la pulpa
- ρ_s : Densidad del sólido
- φ_0 : Fracción volumétrica
- φ : Fracción de sólidos en el queque
- X : Porcentaje en peso del queque
- ε : Porosidad del queque

Tabla 8.66 Porosidad del queque a 50% de sólidos para la filtración a presión

	50% Sólidos				
Presión (P) (bar)	2,0	3,0	4,0	5,0	6,2
Presión (P) (Pa)	199000	300000	400000	500000	620000
Densidad de la pulpa (ρ_0) (kg/m^3)	1711,4	1711,4	1711,4	1711,4	1711,4
Densidad del líquido (ρ_f) (kg/m^3)	1000	1000	1000	1000	1000
Viscosidad del líquido (μ) (Pa*s)	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Fracción volumétrica (φ_0)	0,144	0,144	0,144	0,144	0,144
Razón de humedad del queque	1,089	1,077	1,071	1,059	1,056
%sólido en peso el queque (X)	0,918	0,929	0,934	0,944	0,947
Fracción sólidos en el queque (φ)	0,654	0,688	0,703	0,741	0,749
Porosidad del queque (ε)	0,346	0,312	0,297	0,259	0,251

Tabla 8.67 Porosidad del queque a 60% de sólidos para la filtración a presión

	60% Sólidos			
Presión (P) (bar)	2,2	3,2	4,0	5,0
Presión (P) (Pa)	220000	317000	400000	500000
Densidad de la pulpa (ρ_0) (kg/m ³)	1995,3	1995,3	1995,3	1995,3
Densidad del líquido (ρ_f) (kg/m ³)	1000	1000	1000	1000
Viscosidad del líquido (μ) (Pa*s)	0,001	0,001	0,001	0,001
Fracción volumétrica (φ_0)	0,202	0,202	0,202	0,202
Razón de humedad del queque	1,089	1,079	1,041	1,019
%sólido en peso el queque (X)	0,918	0,927	0,961	0,982
Fracción sólidos en el queque (φ)	0,654	0,681	0,804	0,901
Porosidad del queque (ϵ)	0,346	0,319	0,196	0,099

Tabla 8.68 Porosidad del queque a 70% de sólidos para la filtración a presión

	70% Sólidos				
Presión (P) (bar)	2,2	3,2	4,2	5,1	6,2
Presión (P) (Pa)	220000	320000	420000	507000	620000
Densidad de la pulpa (ρ_0) (kg/m ³)	2392,1	2392,1	2392,1	2392,1	2392,1
Densidad del líquido (ρ_f) (kg/m ³)	1000	1000	1000	1000	1000
Viscosidad del líquido (μ) (Pa*s)	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Fracción volumétrica (φ_0)	0,282	0,282	0,282	0,282	0,282
Razón de humedad del queque	1,057	1,051	1,048	1,044	1,044
%sólido en peso el queque (X)	0,946	0,952	0,954	0,958	0,958
Fracción sólidos en el queque (φ)	0,747	0,768	0,779	0,792	0,795
Porosidad del queque (ϵ)	0,253	0,232	0,221	0,208	0,205

Tabla 8.69 Porosidad del queque a 80% de sólidos para la filtración a presión

	80% Sólidos				
	2,0	3,0	4,0	5,0	6,2
Presión (P) (bar)	2,0	3,0	4,0	5,0	6,2
Presión (P) (Pa)	200000	300000	400000	500000	606667
Densidad de la pulpa (ρ_0) (kg/m ³)	2985,9	2985,9	2985,9	2985,9	2985,9
Densidad del líquido (ρ_f) (kg/m ³)	1000	1000	1000	1000	1000
Viscosidad del líquido (μ) (Pa*s)	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Fracción volumétrica (φ_0)	0,403	0,403	0,403	0,403	0,403
Razón de humedad del queque	1,062	1,055	1,050	1,048	1,043
%sólido en peso el queque (X)	0,942	0,948	0,952	0,954	0,959
Fracción sólidos en el queque (φ)	0,731	0,756	0,770	0,779	0,799
Porosidad del queque (ε)	0,269	0,244	0,230	0,221	0,201

De los datos de tiempo de filtrado y volumen de solución filtrada obtenidas de las pruebas de filtración a presión (ver tablas 8.52, 8.53, 8.54 y 8.55) se grafica $t/V_f(t)$ versus $V_f(t)$ a fin de obtener la resistencia específica del medio filtrante (R_m), la permeabilidad del queque ($K(\varepsilon_0)$) y la resistencia específica del queque (α). Donde: $b = \text{tg}\theta$ es la pendiente de la recta obtenida y a es su intersección con el eje de las ordenadas. Los parámetros son obtenidos mediante las siguientes ecuaciones:

$$R_m = a \frac{\Delta p S}{\mu} \quad K(\varepsilon) = \frac{1}{b} \frac{\mu}{2S^2 \Delta p} \frac{\varphi_0}{(1 - \varphi_0 - \varepsilon)} \quad \alpha = \frac{l}{K(\varepsilon)}$$

Espesor de la membrana cerámica ($l = 0,5\text{mm}$)

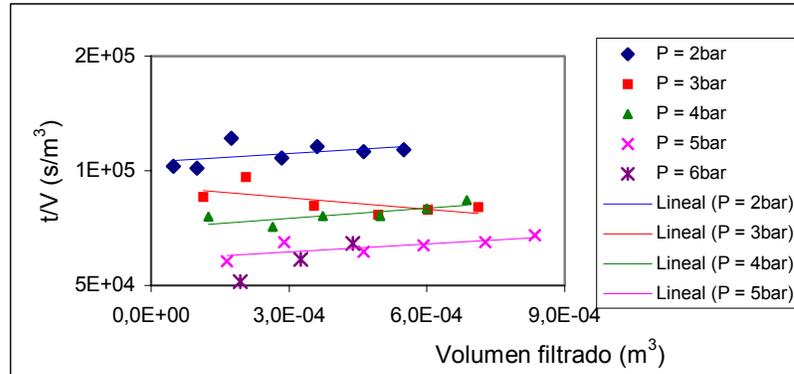


Figura 8.28 Gráficas t/V versus V a 50% de sólidos de las pruebas de filtración a presión

Tabla 8.70 Valores de la resistencia específica del medio filtrante, permeabilidad del queque y resistencia específica del queque a 50% de sólidos

50% Sólidos	PRESIÓN (bar)				
	2,0	3,0	4,0	5,0	6,2
ϵ_0	0,346	0,312	0,297	0,259	0,251
R_m (m ⁻¹)	1,36E+13	1,85E+13	1,98E+13	2,01E+13	1,57E+13
$K_{(6)}$ (m ²)	2,11E-15	-1,08E-15	9,50E-16	1,01E-15	1,41E-16
α (m ⁻¹)	2,37E+11	-4,61E+11	5,26E+11	4,96E+11	3,54E+12

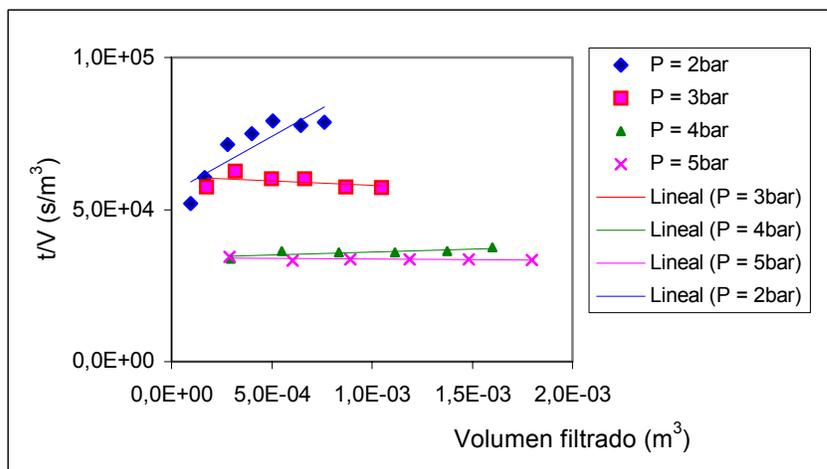


Figura 8.29 Gráficas t/V versus V a 60% de sólidos de las pruebas de filtración a presión

Tabla 8.71 Valores de la resistencia específica del medio filtrante, permeabilidad del queque y resistencia específica del queque a 60% de sólidos

60% Sólidos	PRESIÓN (bar)			
	2,2	3,2	4,0	5,0
ϵ_0	0,346	0,319	0,196	0,099
R_m (m ⁻¹)	8,08E+12	1,28E+13	9,02E+12	1,12E+13
$K_{(\epsilon)}$ (m ²)	7,73E-16	-7,12E-15	1,10E-14	-5,20E-14
α (m ⁻¹)	6,47E+11	-7,02E+10	4,56E+10	-9,61E+09

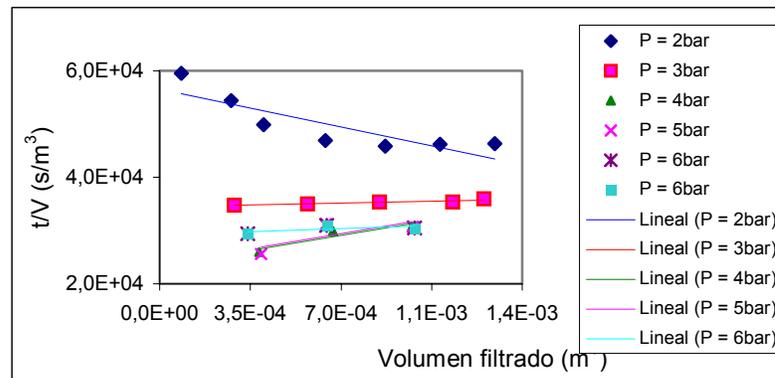


Figura 8.30 Gráficas t/V versus V a 70% de sólidos de las pruebas de filtración a presión

Tabla 8.72 Valores de la resistencia específica del medio filtrante, permeabilidad del queque y resistencia específica del queque a 70% de sólidos

70% Sólidos	PRESIÓN (bar)				
	2,2	3,2	4,2	5,1	6,2
ϵ_0	0,253	0,232	0,221	0,208	0,205
R_m (m ⁻¹)	8,22E+12	7,27E+12	6,49E+12	7,91E+12	1,20E+13
$K_{(\epsilon)}$ (m ²)	-4,06E-15	2,79E-14	2,85E-15	2,37E-15	9,66E-15
α (m ⁻¹)	-1,23E+11	1,79E+10	1,75E+11	2,11E+11	5,18E+10

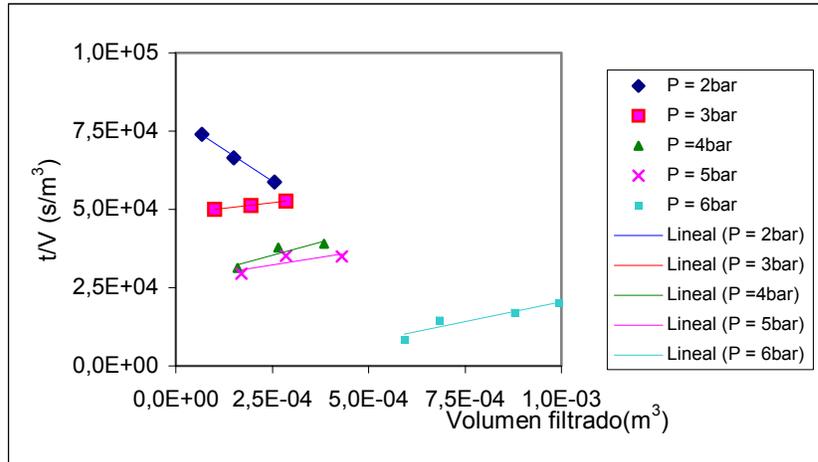


Figura 8.31 Gráficas t/V versus V a 80% de sólidos de las pruebas de filtración a presión

Tabla 8.73 Valores de la resistencia específica del medio filtrante, permeabilidad del queque y resistencia específica del queque a 80% de sólidos

80% Sólidos	PRESIÓN (bar)				
	2,0	3,0	4,0	5,0	6,2
ϵ_0	0,269	0,244	0,230	0,221	0,201
R_m (m ⁻¹)	1,05E+13	9,61E+12	7,08E+12	8,98E+12	1,35E+13
$K_{(6)}$ (m ²)	-5,60E-16	2,30E-15	7,56E-16	1,04E-15	5,31E-15
α (m ⁻¹)	-8,93E+11	2,18E+11	6,61E+11	4,81E+11	9,41E+10

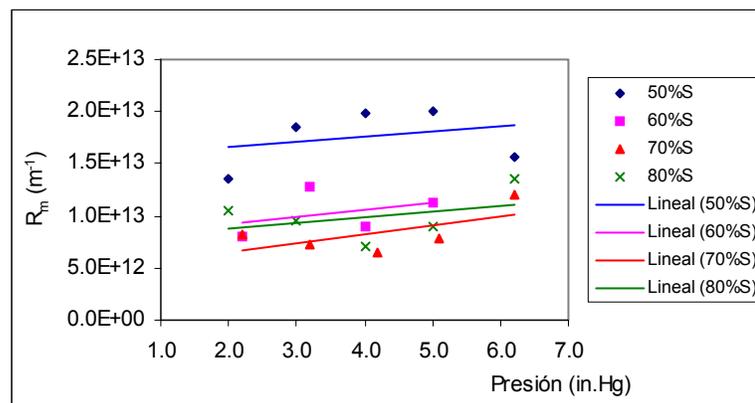


Figura 8.32 Curvas comparativas de la resistencia específica del queque (R_m) obtenida de las pruebas de filtración a presión a distintos porcentajes de sólidos

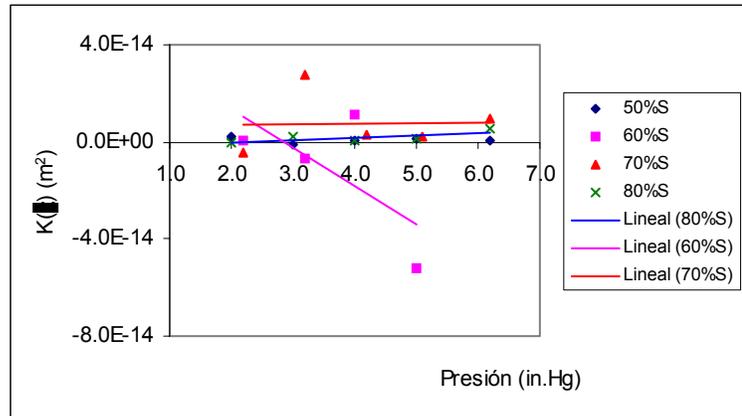


Figura 8.33 Curvas comparativas de la permeabilidad del queque ($K(\epsilon)$) obtenidas de las pruebas de filtración a presión a distintos porcentajes de sólidos

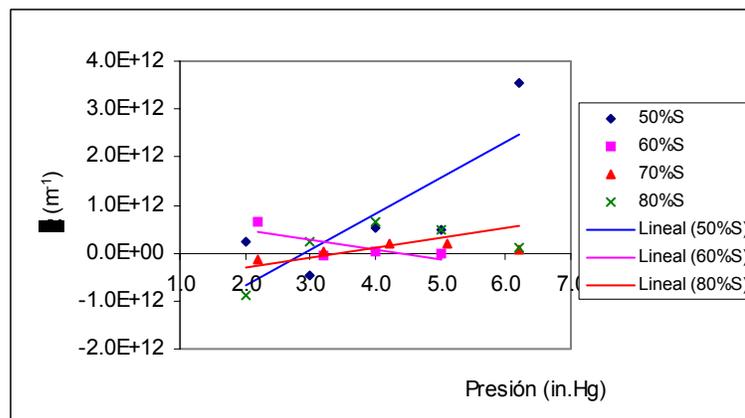


Figura 8.34 Curvas comparativas de la resistencia específica del medio filtrante (α) obtenida de las pruebas de filtración a presión a distintos porcentajes de sólidos

8.5.2.4. Espesor del queque a distintos porcentajes de sólidos

Empleando la data obtenida a distintos porcentajes de sólidos (ver tablas 8.52 al 8.55) y siendo el área de la placa cerámica $0.011m^2$, se calcula los espesores del queque mediante la ecuación [5.14].

$$\ell(t) = \frac{\varphi_0}{1 - \varphi_0 - \epsilon_0} \frac{V_f(t)}{S} \quad [5.14]$$

Tabla 8.74 Espesores del queque obtenidos de las pruebas de filtración a presión con una pulpa a 50% de sólidos y distintas presiones

%Sólidos	φ_0	Presión (bar)	Porosidad	Volumen (ml)	Tiempo filtración (min)	Espesor queque (mm)
50	0,144	2,0	0,346	0,0	0	0,00
				49,0	5	1,26
				99,0	10	2,55
				175,0	20	4,50
				284,0	30	7,31
				362,0	40	9,32
				462,0	50	11,89
				550,0	60	14,6
		3,0	0,312	0,0	0	0,00
				113,0	10	273
				206,0	20	4,97
				354,0	30	8,55
				494,0	40	11,93
				602,0	50	14,53
				712,0	60	17,19
				4,0	0,297	0,0
		125,0	10			2,93
		265,0	20			6,22
		374,0	30			8,78
		499,0	40			11,71
		599,0	50			14,06
		687,0	60			16,12
		5,0	0,259			0,00
				165,0	10	363
				290,0	20	6,37
				463,0	30	10,18
				593,0	40	13,03
				727,0	50	15,98
				835,0	60	18,35
				6.2	0,251	0,0
		194,0	10			4,21
		326,0	20			7,07
		439,0	30			9,52

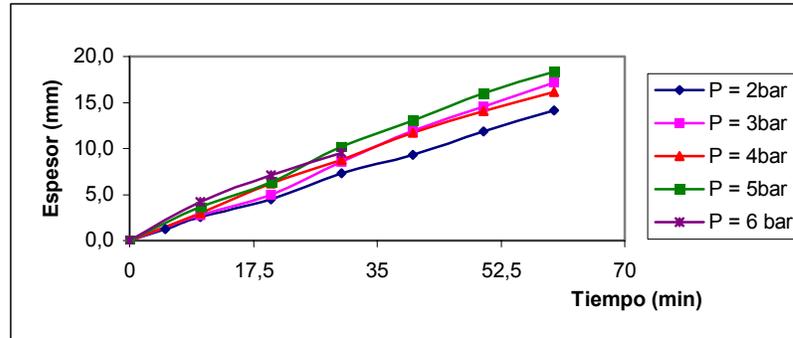


Figura 8.35 Representación gráfica del incremento del espesor del queque a través del tiempo empleando una pulpa a 50% de sólidos

Tabla 8.75 Espesores del queque obtenidos de las pruebas de filtración a presión con una pulpa a 60% de sólidos y distintas presiones

%Sólidos	φ_0	Presión (bar)	Porosidad	Volumen (ml)	Tiempo filtración (min)	Espesor queque(mm)
60	0,202	2,2	0,346	0,0	0	0,00
				96,0	5	3,90
				165,0	10	6,70
				280,0	20	11,38
				400,0	30	16,25
				505,0	40	20,52
				643,0	50	26,13
				763,0	60	31,00
		3,2	0,319	0,0	0	0,00
				174,0	10	6,67
				319,0	20	12,23
				499,0	30	19,13
				665,0	40	25,49
				870,0	50	33,35
				1048,0	60	40,17
				4,0	0,196	0,0
		295,0	10			8,99
		550,0	20			16,76
		835,0	30			25,45
		1115,0	40			33,98
		1375,0	50			41,91
		1600,0	60			48,77
		5,0	0,099			0,0
				290,0	10	7,62
				603,0	20	15,84
				893,0	30	23,45
				1188,0	40	31,20
				1483,0	50	38,95
1798,0	60			47,22		

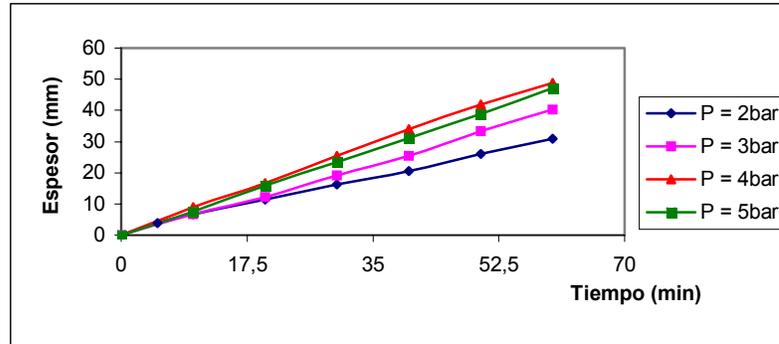


Figura 8.36 Representación gráfica del incremento del espesor del queque a través del tiempo empleando una pulpa a 60% de sólidos

Tabla 8.76 Espesores del queque obtenidos de las pruebas de filtración a presión con una pulpa a 70% de sólidos y distintas presiones

%Sólidos	φ_0	Presión (bar)	Porosidad	Volumen (ml)	Tiempo filtración (min)	Espesor queque (mm)
70	0,282	2,2	0,253	0,0	0	0,00
				84,0	5	4,64
				276,0	15	15,24
				401,0	20	22,15
				639,0	30	35,29
				872,0	40	48,16
				1083,0	50	59,82
				1294,0	60	71,47
		3,2	0,232	0,0	0	0,00
				288,0	10	15,23
				571,0	20	30,20
				849,0	30	44,90
				1132,0	40	59,87
				1252,0	45	66,22
		4,2	0,221	0,0	0	0,00
				385,0	10	19,89
				670,0	20	34,62
				975,0	30	50,37
		5,1	0,208	0,0	0	0,00
				391,0	10	19,69
				641,0	20	32,29
		6,2	0,205	0,0	0	0,00
				340,0	10	17,03
				645,0	20	32,32
983,0	30			49,25		

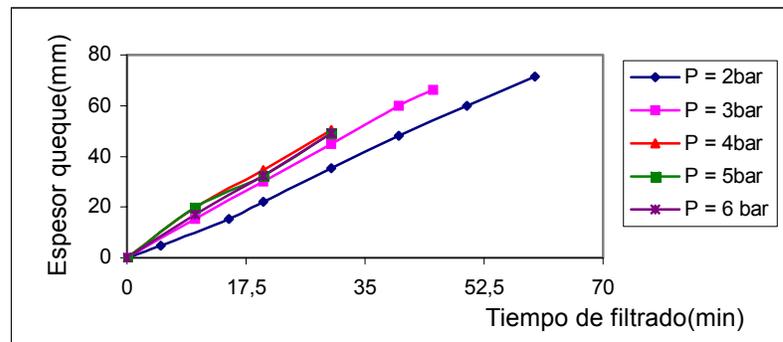


Figura 8.37 Representación gráfica del incremento del espesor del queque a través del tiempo empleando una pulpa a 70% de sólidos

Tabla 8.77 Espesores del queque obtenidos de las pruebas de filtración a presión con una pulpa a 80% de sólidos y distintas presiones

%Sólidos	φ_0	Presión (bar)	Porosidad	Volumen (ml)	Tiempo filtración (min)	Espesor queque (mm)
80	0,403	2,0	0,269	0,0	0	0,00
				67,5	5	7,52
				150,5	10	16,77
				255,5	15	28,47
		3,0	0,244	0,0	0	0,00
				100,0	5	10,37
				195,0	10	20,22
				285,0	15	29,56
		4,0	0,230	0,0	0	0,00
				160,0	5	15,94
				265,0	10	26,40
				385,0	15	38,36
		5,0	0,221	0,0	0	0,00
				170,0	5	16,53
				285,0	10	27,71
				430,0	15	41,81
		6,2	0,201	0,0	0	0,00
				163,0	5	15,08
				253,0	10	23,40
				448,0	15	41,44
563,0	20			52,07		

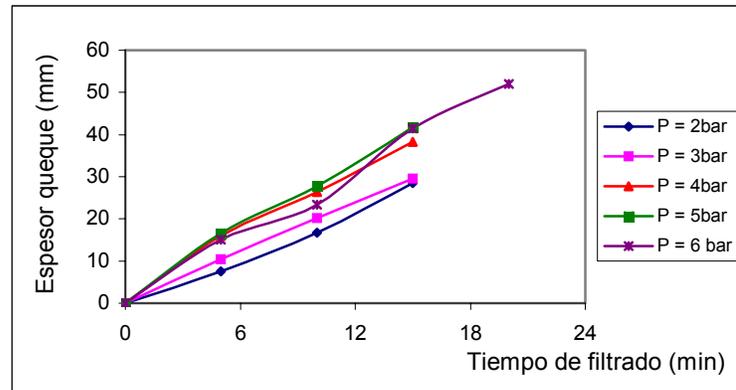


Figura 8.38 Representación gráfica del incremento del espesor del queque a través del tiempo empleando una pulpa a 80% de sólidos

a) Etapa de formación del queque

Los siguientes parámetros: volumen filtrado y tiempo de filtración obtenidos de las pruebas de filtración a presión (ver tablas 8.52, 8.53, 8.54 y 8.55) al mantener constante la caída de presión nos permite observar el comportamiento del queque durante su etapa de formación mediante la curva volumen de filtrado vs. tiempo. Durante toda esta etapa la ecuación de Darcy sigue siendo válida.

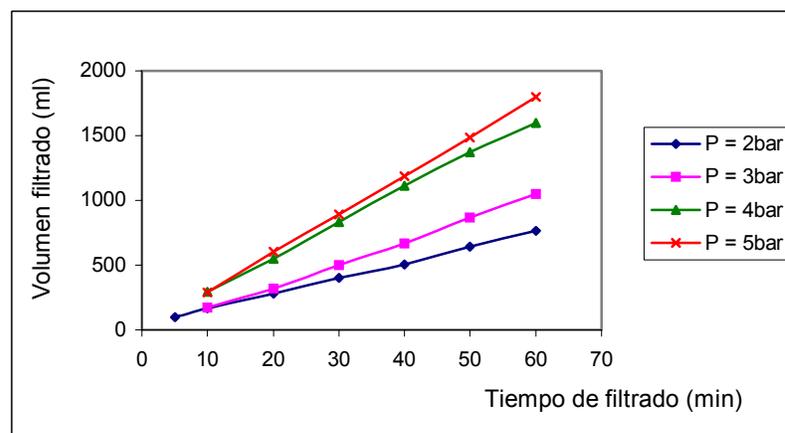


Figura 8.39 Curvas características de modelación obtenidas de las pruebas de filtración a presión durante la etapa de formación de queque con una pulpa a 60% de sólidos operando a distintas presiones

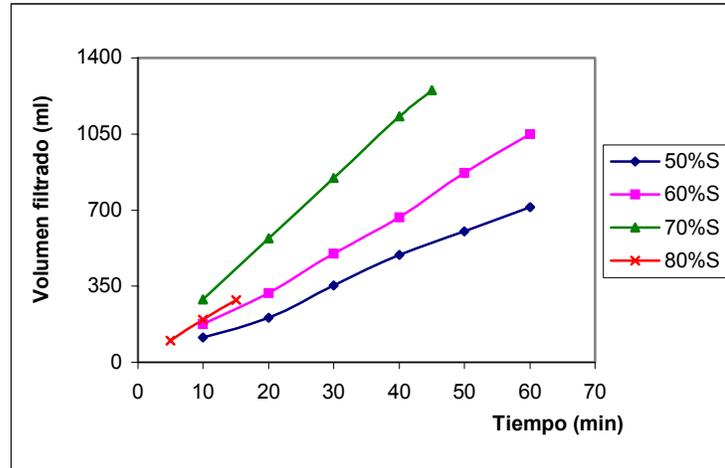


Figura 8.40 Curvas características de modelación para la etapa de formación del queque a 3bar empleando distintos porcentajes de sólidos

8.6. DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL QUEQUE Y MEDIO FILTRANTE MEDIANTE PROGRAMA DE SIMULACIÓN

El siguiente programa de simulación determina parámetros del queque (presión de formación, resistencia específica y permeabilidad del queque) y del medio filtrante (resistencia del medio filtrante) a partir de pruebas de filtración a presión constante realizadas a presión o al vacío.

Dichos parámetros pueden ser obtenidos bajo dos modalidades: utilizando el flujo de solución filtrada (ver tablas de reporte de humedad al vacío y presión) a través del programa “CONPRESS” o mediante el análisis granulométrico realizado al queque y empleando el programa de “Superficie específica por unidad de volumen para una distribución de tamaño vía Kozeny & Carman”

8.6.1. Determinación de los parámetros del queque y medio filtrante obtenidos de las pruebas de filtración al vacío

a) Empleando el flujo de solución filtrada

De las tablas de reporte de humedad obtenidas de las pruebas de filtración al vacío (ver Tablas 8.10, 8.12, 8.14 y 8.16) se obtienen las siguientes tablas con los parámetros del queque y medio filtrante antes mencionados.

Tabla 8.78 Valores de los parámetros de filtración del queque y medio filtrante para una pulpa a 50% de sólidos

50% de Sólidos	UNIDADES	PRESIÓN (in.Hg)			
		10,2	15,5	20,5	25,4
Razón de humedad del queque	---	1,114	1,110	1,107	1,100
Queque seco por volumen filtrado	kg / m ³	1129,108	1123,967	1119,332	1111,111
Presión de filtrado	Pa	135753,28	153701,14	170745,96	187452,14
Resistencia específica del queque	m / kg	4,60E+10	9,31E+10	-9,96E+10	1,07E+10
Resistencia del medio filtrante	m ⁻¹	2,85E+13	2,36E+13	2,24E+13	1,76E+13
Presión de formación del queque	Pa	2729,9	9535,7	-13314,5	3561,8

Tabla 8.79 Valores de los parámetros de filtración del queque y medio filtrante para una pulpa a 60% de sólidos

60% de Sólidos	UNIDADES	PRESIÓN (in.Hg)			
		10,1	15,0	20,1	25,3
Razón de humedad del queque	---	1,115	1,112	1,109	1,095
Queque seco por volumen filtrado	kg / m ³	1813,580	1804,105	1793,935	1750,684
Presión de filtrado	Pa	135442,86	152205,48	169476,06	186831,30
Resistencia específica del queque	m / kg	-5,014E+11	2,07E+11	9,739E+10	1,305E+10
Resistencia del medio filtrante	m ⁻¹	3,77E+13	1,76E+13	1,66E+13	1,65E+13
Presión de formación del queque	Pa	-42052,6	37779,7	29211,3	5035,0

Tabla 8.80 Valores de los parámetros de filtración del queque y medio filtrante para una pulpa a 70% de sólidos

70% de Sólidos	UNIDADES	PRESIÓN (in.Hg)			
		10,3	15,2	20,3	25,5
Razón de humedad del queque	---	1,115	1,099	1,078	1,115
Queque seco por volumen filtrado	kg / m ³	3189,692	3030,261	2852,059	3189,692
Presión de filtrado	Pa	136289,46	152882,76	169899,36	187677,90
Resistencia específica del queque	m / kg	-5,205E+10	5,099E+10	8,301E+08	9,686E+08
Resistencia del medio filtrante	m ⁻¹	2,09E+13	1,24E+13	1,16E+13	1,02E+13
Presión de formación del queque	Pa	-20528,4	29187,9	1120,9	1744,2

Tabla 8.81 Valores de los parámetros de filtración del queque y medio filtrante para una pulpa a 80% de sólidos

80% de Sólidos	UNIDADES	PRESIÓN (in.Hg)			
		10,0	15,2	20,6	25,5
Razón de humedad del queque	---	1,136	1,119	1,133	1,099
Queque seco por volumen filtrado	kg / m ³	8749,584	7652,710	8565,161	6617,115
Presión de filtrado	Pa	135188,88	152628,78	171169,26	187677,90
Resistencia específica del queque	m / kg	-2,898E+10	-1,05E+09	8,099E+09	1,582E+10
Resistencia del medio filtrante	m ⁻¹	1,70E+13	1,04E+13	8,36E+12	7,56E+12
Presión de formación del queque	Pa	-36816,2	-2657,0	24587,3	28999,7

b) Empleando el análisis granulométrico realizado al queque

Del análisis granulométrico realizado al queque obtenido de las pruebas de filtración al vacío a 60 y 70% de sólidos (ver Tabla 8.6) se obtienen los siguientes parámetros del queque.

Tabla 8.82 Valores de la permeabilidad y resistencia específica del queque para una pulpa a 60% de sólidos

Porcentaje de sólidos	60,0			
Razón de humedad del queque	1,115	1,112	1,109	1,096
Presión (in.Hg)	10,1	15,0	20,1	25,3
Densidad del sólido (kg/m ³)	5930			
Concentración queque (v/v)	0,594	0,600	0,607	0,637
Superficie específica (1/μ)	0,089	0,090	0,088	0,077
Asumiendo esferas (1/m)	532986,9	537672,4	525780,4	463045,6
Diámetro medio de Sauter (μm)	11,26	11,16	11,41	12,96
Permeabilidad (por K & C) (m ²)	1,33E-13	1,23E-13	1,19E-13	1,10E-13
Resistencia específica (m/Kg)	2,13E+09	2,29E+09	2,33E+09	2,41E+09

Tabla 8.83 Valores de la permeabilidad y resistencia específica del queque para una pulpa a 70% de sólidos

Porcentaje de sólidos	70,0			
Razón de humedad del queque	1,115	1,099	1,078	1,071
Presión (in.Hg)	10,3	15,2	20,3	25,5
Densidad del sólido (kg/m ³)	5930			
Concentración queque (v/v)	0,595	0,629	0,684	0,703
Superficie específica (1/μ)	0,068	0,058	0,053	0,048
Asumiendo esferas (1/m)	405061,5	347552,6	316008,0	288076,0
Diámetro medio de Sauter (μm)	14,81	17,26	18,99	20,83
Permeabilidad (por K & C) (m ²)	2,28E-13	2,13E-13	1,35E-13	1,27E-13
Resistencia específica (m/Kg)	1,24E+09	1,26E+09	1,83E+09	1,89E+09

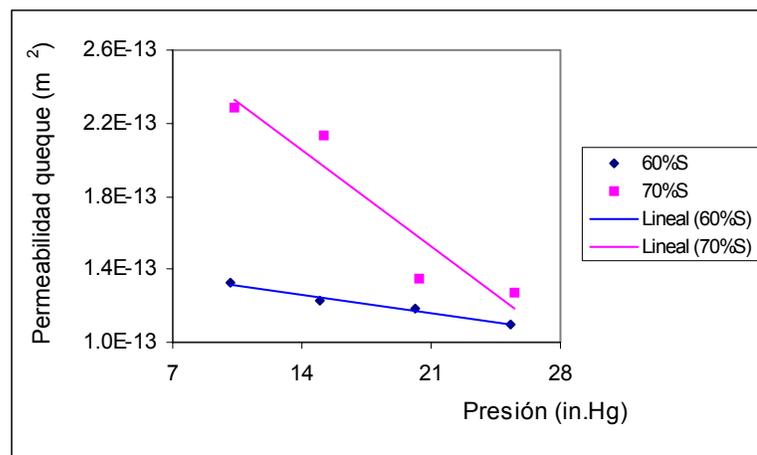


Figura 8.41 Curvas comparativas de la permeabilidad del queque en función a la presión de vacío para una pulpa a 60 y 70% de sólidos

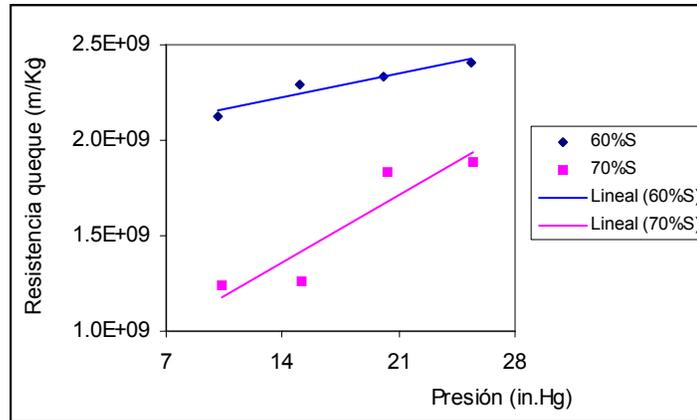


Figura 8.42 Curvas comparativas de la resistencia específica del queque en función a la presión de vacío para una pulpa a 60 y 70% de sólidos

8.6.2. Determinación de los parámetros del queque y medio filtrante de las pruebas de filtración a presión

a) Empleando el flujo de solución filtrada

De las tablas de reporte de humedad obtenidas de las pruebas de filtración a presión (ver Tablas 8.52, 8.53, 8.54 y 8.55) se obtienen las siguientes tablas con los parámetros del queque y medio filtrante antes mencionados.

Tabla 8.84 Valores de los parámetros de filtración del queque y medio filtrante para una pulpa a 50% de sólidos

50% SÓLIDOS					
PRESIÓN (bar)	2,0	3,0	4,0	5,0	6,2
Razón de humedad del queque	1,089	1,077	1,071	1,061	1,056
Queque seco por volumen filtrado (kg/m ³)	1098,01	1082,95	1076,61	1064,48	1059,82
Presión de filtrado (Pa)	198571	300000	400000	500000	620000
Resistencia específica del queque (m/kg)	3,16E+10	-6,68E+10	7,88E+10	8,03E+10	6,76E+11
Resistencia del medio filtrante (m ⁻¹)	1,36E+13	1,85E+13	1,98E+13	2,01E+13	3,51E+12
Presión de formación del queque (Pa)	11971,8	-54559,1	55427,0	80091,2	523139,4

Tabla 8.85 Valores de los parámetros de filtración del queque y medio filtrante para una pulpa a 60% de sólidos

60% SÓLIDOS				
PRESIÓN (bar)	2,0	3,2	4,0	5,0
Razón de humedad del queque	1,089	1,079	1,041	1,019
Queque seco por volumen filtrado (kg/m ³)	1732,12	1701,92	1598,49	1542,98
Presión de filtrado (Pa)	198571	316667	400000	500000
Resistencia específica del queque (m/kg)	6,15E+10	-7,97E+09	6,93E+09	-1,76E+09
Resistencia del medio filtrante (m ⁻¹)	7,29E+12	1,27E+13	9,02E+12	1,12E+13
Presión de formación del queque (Pa)	64602,9	-19695,7	38032,5	-11773,2

Tabla 8.86 Valores de los parámetros de filtración del queque y medio filtrante para una pulpa a 70% de sólidos

70% SÓLIDOS					
PRESIÓN (bar)	2,2	3,2	4,2	5,1	6,2
Razón de humedad del queque	1,057	1,051	1,048	1,044	1,044
Queque seco por volumen filtrado (kg/m ³)	2691,75	2648,56	2625,98	2602,02	2597,12
Presión de filtrado (Pa)	220000	320000	420000	506667	620000
Resistencia específica del queque (m/kg)	-1,2E+10	1,9E+09	1,9E+10	2,3E+10	3,1E+10
Resistencia del medio filtrante (m ⁻¹)	8,22E+12	7,27E+12	6,49E+12	7,91E+12	4,51E+12
Presión de formación del queque (Pa)	-80069,0	15173,1	129873,3	156994,1	304871,9

Tabla 8.87 Valores de los parámetros de filtración del queque y medio filtrante para una pulpa a 80% de sólidos

80% SÓLIDOS					
PRESIÓN (bar)	2,0	3,0	4,0	5,0	6,1
Razón de humedad del queque	1,062	1,054	1,050	1,048	1,042
Queque seco por volumen filtrado (kg/m ³)	5317,15	5114,25	5007,51	494389	4819,13
Presión de filtrado (Pa)	200000	300000	400000	500000	606667
Resistencia específica del queque (m/kg)	-4,44E+10	1,21E+10	7,82E+10	2,95E+10	6,00E+09
Resistencia del medio filtrante (m ⁻¹)	1,05E+13	9,61E+12	1,42E+13	8,98E+12	1,35E+13
Presión de formación del queque (Pa)	-114156,3	30085,1	156891,0	147551,5	32039,8

8.7. PRUEBAS DE FILTRACIÓN CON UNA PULPA DE RELAVE CIANURADO

Las pruebas de filtración con una pulpa de relave cianurado de gravedad específica 3,57g/l se realizaron a presión y al vacío. Para las pruebas de filtración al vacío se trabajó con pulpas a diferentes porcentajes de sólidos (42, 50 y 60%), manteniendo constante la velocidad de giro de la placa cerámica, mientras que para las pruebas de filtración a presión se filtró una pulpa a 42% de sólidos variando la velocidad de giro de la placa cerámica.

8.7.1. Pruebas de filtración al vacío

Para las pruebas de filtración al vacío se mantuvo constante: la presión de vacío suministrado por la bomba de vacío al filtro y el nivel de pulpa en la tina. Se filtró pulpas a diferentes porcentajes de sólidos manteniendo constante la velocidad de giro de la placa cerámica.

Condiciones de operaciones

Temperatura de la pulpa: 18°C

Presión inicial de trabajo: 15" Hg

Distancia entre raspadores: 25,5 mm

Tiempo de la P.C en dar una vuelta: 13 s

Datos de la Placa Cerámica

Tipo de placa cerámica: S3

Espesor de la P.C: 24,2 mm

Espesor de la membrana de la P.C.: 0,5 mm

Área de la P.C.: 0,011 m²

a) Prueba de filtración al vacío a 42% de sólidos

Tabla 8.88 Reporte de humedad para una prueba de filtración al vacío empleando una pulpa de relave cianurado al 42% de sólidos

Tiempo filtración (min.)	Volumen solución Filtrada (ml)	Presión (in. Hg)	Peso húmedo (g)	Peso seco (g)	% H ₂ O queque	Humedad promedio
20	97,0	15,0	19,15	15,15	20,89	22,24
40	89,0	15,0	31,10	23,80	23,47	
60	85,0	15,0	30,43	23,63	22,35	
15	79,0	20,0	32,90	26,20	20,36	20,57
30	71,0	20,0	34,65	27,35	21,07	
45	61,0	20,0	32,53	25,93	20,29	
10	68,0	25,0	31,38	25,48	18,80	18,72
20	52,0	25,0	30,83	25,03	18,81	
30	70,0	25,0	33,95	27,65	18,56	

Tabla 8.89 Reporte de producción para una prueba de filtración al vacío empleando una pulpa de relave cianurado al 42% de sólidos

42% de Sólidos	Unidades	Presión (in.Hg)		
		15,0	20,0	25,0
Peso seco total del queque filtrado	g	62,60	79,48	78,16
Volumen filtrado	l	0,271	0,211	0,190
Volumen filtrado / tiempo	l / h	0,271	0,281	0,380
Queque seco / Volumen filtrado	Kg / m ³	230,92	376,68	411,37
Queque seco / tiempo	Kg / h	0,063	0,106	0,156
Queque seco/ tiempo/ área filtrante	Kg / h / m ²	5,69	9,63	14,21

b) Prueba de filtración al vacío a 50% de sólidos

Tabla 8.90 Reporte de humedad para una prueba de filtración a presión empleando una pulpa de relave cianurado al 50% de sólidos

Tiempo filtración (min.)	Volumen solución Filtrada (ml)	Presión (in. Hg)	Peso húmedo (g)	Peso seco (g)	% H ₂ O queque	Humedad promedio
20	105,0	15,0	23,95	18,95	20,88	20,85
40	93,0	15,0	36,97	29,32	20,69	
60	96,0	15,0	36,63	28,95	20,97	
15	89,0	20,0	45,89	37,00	19,37	19,32
30	84,0	20,0	44,74	36,12	19,27	
45	77,0	20,0	44,42	35,84	19,32	
10	73,0	25,0	41,20	33,54	18,59	18,43
20	64,0	25,0	40,32	32,97	18,23	
30	67,0	25,0	41,07	33,48	18,48	

Tabla 8.91 Reporte de producción para una prueba de filtración al vacío empleando una pulpa de relave cianurado al 50% de sólidos

50% de Sólidos	Unidades	Presión (in.Hg)		
		15,0	20,0	25,0
Peso seco total del queque filtrado	g	77,22	108,96	99,99
Volumen filtrado	l	0,294	0,250	0,204
Volumen filtrado / tiempo	l / h	0,294	0,333	0,408
Queque seco / Volumen filtrado	Kg / m ³	262,65	435,84	490,15
Queque seco / tiempo	Kg / h	0,077	0,145	0,200
Queque seco/ tiempo/ área filtrante	Kg / h / m ²	7,02	13,21	18,18

c) Prueba de filtración al vacío a 60% de sólidos

Tabla 8.92 Reporte de humedad para una prueba de filtración al vacío empleando una pulpa de relave cianurado al 60% de sólidos

Tiempo filtración (min.)	Volumen solución Filtrada (ml)	Presión (in. Hg)	Peso húmedo (g)	Peso seco (g)	% H ₂ O queque	Humedad promedio
20	106,0	15,0	32,51	26,56	18,30	18,59
40	97,0	15,0	43,45	35,24	18,90	
60	101,0	15,0	40,60	33,06	18,57	
15	98,0	20,0	53,41	44,12	17,39	17,30
30	91,0	20,0	54,47	45,20	17,02	
45	86,0	20,0	54,60	45,05	17,49	
10	81,0	25,0	50,96	42,53	16,54	16,60
20	75,0	25,0	48,32	40,23	16,74	
30	77,0	25,0	52,58	43,89	16,53	

Tabla 8.93 Reporte de producción para una prueba de filtración al vacío empleando una pulpa de relave cianurado al 60% de sólidos

60% de Sólidos	Unidades	Presión (in.Hg)		
		15,0	20,0	25,0
Peso seco total del queque filtrado	g	94,90	134,37	126,65
Volumen filtrado	l	0,304	0,275	0,233
Volumen filtrado / tiempo	l / h	0,304	0,367	0,466
Queque seco / Volumen filtrado	Kg / m ³	312,04	488,62	543,56
Queque seco / tiempo	Kg / h	0,095	0,179	0,253
Queque seco/ tiempo/ área filtrante	Kg / h / m ²	8,62	16,29	23,03

Tabla 8.94 Reporte de humedad del queque a distintos porcentajes de sólidos obtenido de las pruebas de filtración al vacío con una pulpa de relave cianurado

Presión (in.Hg)	Humedad del queque (%)		
	42% Sólidos	50% Sólidos	60% Sólidos
15,0	22,24	20,85	18,59
20,0	20,57	19,32	17,30
25,0	18,72	18,43	16,60

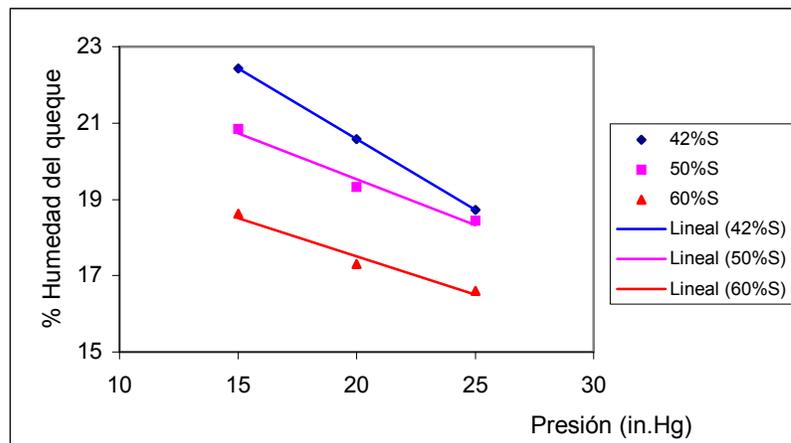


Figura 8.43 Curvas comparativas de porcentaje de humedad del queque obtenidas de las pruebas de filtración al vacío a distintos porcentajes de sólidos

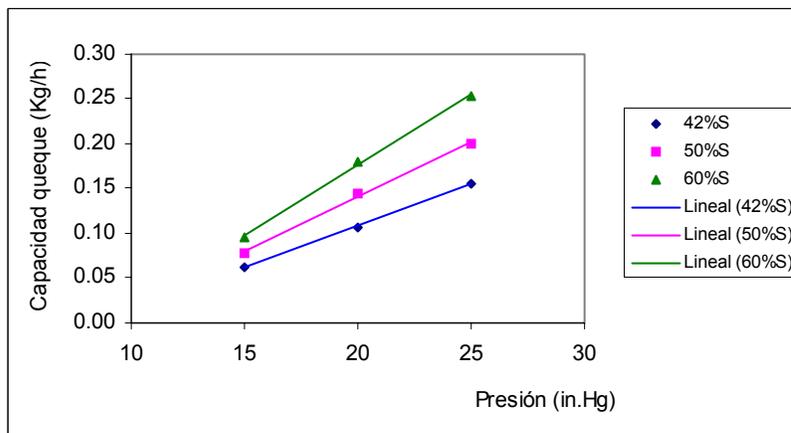


Figura 8.44 Curvas comparativas de producción del queque en función de la presión de vacío a distintos porcentajes de sólidos

8.7.2. Pruebas de filtración a presión

Para las pruebas de filtración a presión se mantuvo constante la presión de aire suministrado por la compresora al filtro y el nivel de pulpa en la tina. Se filtró una pulpa a 42% de sólidos variando la velocidad de giro de la placa cerámica.

Condiciones de operaciones

Temperatura de la pulpa: 18°C

Presión inicial de trabajo: 2 bar

Distancia entre raspadores: 25,5 mm

Datos de la Placa Cerámica

Tipo de placa cerámica: S3

Espesor de la P.C: 24,2 mm

Espesor de la membrana de la P.C.: 0,5 mm

Área de la P.C.: 0,011 m²

a) Prueba de filtración a una velocidad de giro de la placa cerámica de 4,6RPM

Tabla 8.95 Reporte de humedad para una prueba de filtración a presión empleando una pulpa de relave cianurado al 42% de sólidos

Tiempo filtración (min.)	Volumen solución Filtrada (ml)	Presión (bar)	Peso húmedo (g)	Peso seco (g)	% H ₂ O queque	Humedad promedio
15	144,0	2,0	16,51	13,35	19,14	18,54
30	89,0	2,0	39,94	32,49	18,65	
45	136,0	2,0	101,72	83,59	17,82	
10	71,0	3,0	36,50	30,00	17,81	17,51
20	79,0	3,0	27,03	22,23	17,76	
30	74,0	3,0	22,40	18,60	16,96	
5	66,0	4,0	22,68	19,21	15,30	15,42
10	69,0	4,0	14,93	12,61	15,54	
15	63,0	4,0	---	---	---	

Tabla 8.96 Reporte de producción para una prueba de filtración al vacío empleando una pulpa de relave cianurado al 42% de sólidos

42% de Sólidos	Unidades	P = 2,0bar	P = 3,0bar	P = 4,0bar
Peso seco total del queque filtrado	g	129,43	70,83	59,70
Volumen filtrado	l	0,369	0,224	0,135
Volumen filtrado / tiempo	l / h	0,492	0,448	0,810
Queque seco / Volumen filtrado	Kg / m ³	350,76	316,21	235,70
Queque seco / tiempo	Kg / h	0,173	0,142	0,191
Queque seco/ tiempo/ área filtrante	Kg / h / m ²	15,69	12,88	17,36

b) Prueba de filtración a una velocidad de giro de la placa cerámica de 3,0RPM

Tabla 8.97 Reporte de humedad para una prueba de filtración a presión empleando una pulpa de relave cianurado 42% de sólidos

Tiempo filtración (min.)	Volumen solución Filtrada (ml)	Presión (bar)	Peso húmedo (g)	Peso seco (g)	% H₂O queque	Humedad promedio
15	76,0	2,0	10,45	8,63	17,42	18,25
30	68,0	2,0	12,25	9,95	18,78	
45	59,0	2,0	3,45	2,81	18,55	
10	144,0	3,0	---	---	---	16,63
20	49,0	3,0	16,35	13,65	16,51	
30	61,0	3,0	16,13	13,43	16,74	
5	58,0	4,0	33,90	28,75	15,19	15,25
10	69,0	4,0	53,12	44,97	15,34	
15	49,0	4,0	18,59	15,76	15,22	

Tabla 8.98 Reporte de producción para una prueba de filtración al vacío empleando una pulpa de relave cianurado al 42% de sólidos

42% de Sólidos	Unidades	P = 2,0bar	P = 3,0bar	P = 4,0bar
Peso seco total del queque filtrado	g	21,39	27,08	89,48
Volumen filtrado	l	0,203	0,110	0,176
Volumen filtrado / tiempo	l / h	0,271	0,330	0,704
Queque seco / Volumen filtrado	Kg / m ³	105,37	246,18	508,41
Queque seco / tiempo	Kg / h	0,029	0,081	0,358
Queque seco/ tiempo/ área filtrante	Kg / h / m ²	2,59	7,39	32,54

Tabla 8.99 Reporte de humedad del queque obtenido al filtrar a presión una pulpa a 42% de sólidos variando la velocidad de giro de la placa cerámica

Presión (bar)	% Humedad del queque	
	4,6RPM	3,0RPM
2,0	18,54	18,25
3,0	17,51	16,63
4,0	15,42	15,25

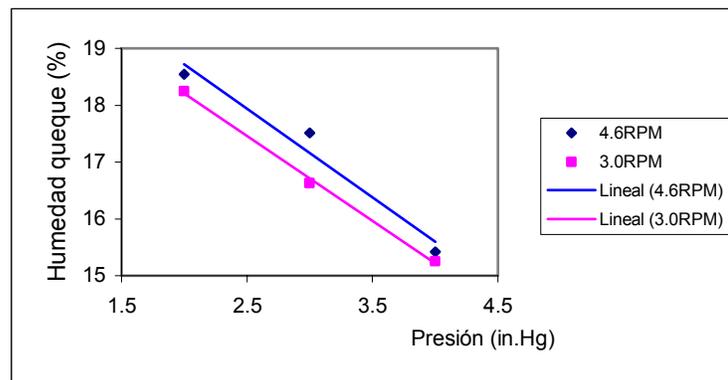


Figura 8.45 Curvas comparativas de porcentaje de humedad del queque obtenidas de las pruebas de filtración a presión con una pulpa de relave cianurado al 42% de sólidos variando la velocidad de giro de la placa cerámica

CAPÍTULO 10 CONCLUSIONES

1. De acuerdo al análisis granulométrico realizado al concentrado de Plomo antes de ser filtrado (ver tabla 8.3), se determinó que la distribución de tamaño de partículas de los sólidos fue 78.9% < 75 μ m, 58.5% < 45 μ m, 33.0% < 20 μ m.
2. Los mejores resultados de humedad del queque obtenido de las pruebas de filtración al vacío corresponden a una pulpa de 70 % de sólidos y presiones de vacío de 25 y 20 pulgadas de mercurio (in. Hg.) siendo las humedades promedio obtenidas de 6,64% y 7,22% respectivamente. Mientras para las pruebas de filtración a presión corresponden a una pulpa de 60 % de sólidos con un gradiente de presión de 6 y 5 bar siendo las humedades promedio obtenidas de 2,01% y 2,47% respectivamente. Cabe mencionar que para 4 bar de presión y 70 % de sólidos se obtuvo una humedad promedio de 4,56%.
3. Los mejores parámetros para una filtración al vacío se obtienen al filtrar pulpas de concentrado de Plomo con un tamaño promedio de 78 μ m (ver tabla 8.7).
4. De acuerdo a las pruebas de filtración al vacío, al filtrar pulpas de concentrado de Plomo incrementando la presión de vacío y el porcentaje de sólidos se formarán queques de mayor tamaño promedio de partículas (ver tabla 8.7). Asimismo, el porcentaje de partículas contenidas en el queque menores a 20 μ m disminuirá (ver tabla 8.6).
5. Operar a bajas presiones de vacío y filtrar pulpas con bajo porcentaje de sólidos conlleva a formar queques de granulometrías muy finas (menores a 20 μ m), debido a que las partículas finas tienen mayor libertad de

movimiento y son atraídas más fácilmente por una pequeña fuerza de acción capilar hacia la superficie del medio filtrante. Caso contrario ocurre al filtrar pulpas con mayor porcentaje de sólidos, debido a que las partículas adheridas sobre la superficie del medio filtrante son de distintas granulometrías (ver tabla 8.6).

6. De acuerdo al análisis granulométrico realizado al queque a 60 y 70% de sólidos para la filtración al vacío (ver tabla 8.7), se determinó que la superficie específica de las partículas contenidas en el queque disminuye con el incremento de la presión y del porcentaje de sólidos. A mayor concentración de sólidos y presión de vacío, la porosidad del queque disminuye, debido a que las partículas están más unidas, formándose queques de menor porcentaje de humedad.
7. La filtración a presión resulta ser la más eficiente con respecto a la filtración al vacío en términos de porcentaje de humedad 4,56 % vs. 9,03% (2,0 veces menor), en capacidad de solución filtrada en l/h 1,950 vs. 0,436 (4,5 veces mayor) y en producción de sólidos secos en kg/h/m² 593,6 vs. 63,11 (9,5 veces mayor).
8. De las pruebas de filtración a presión realizadas bajo las condiciones de operación indicadas en cada prueba y de acuerdo a los resultados de humedad del queque para una pulpa de concentrado de plomo con un contenido de sólidos constante se concluye que a mayor gradiente de presión la humedad disminuye. De igual forma para las pruebas de filtración al vacío se concluye que a mayor presión de vacío la humedad disminuye.
9. Las pruebas de filtración realizadas a presión siguen el principio del Modelo de Darcy, el cual describe que durante la etapa de formación del queque, el volumen filtrado aumenta inicialmente en forma proporcional al

tiempo para luego disminuir esta proporcionalidad a $t^{1/2}$. Esta tendencia ocurre cuando el queque empieza a engrosar, disminuyendo el flujo de filtrado debido a que existe una mayor resistencia al paso del fluido (ver figuras 8.39 y 8.40).

10. De acuerdo a la ecuación de Massarani para determinar la permeabilidad del medio filtrante (ecuación [3.16]), se concluye que el flujo a través del material poroso es *laminar*, debido a que la velocidad de percolación de la solución filtrada aumenta linealmente en función a la diferencia de presión (ver tablas 8.31 y 8.32).
11. De acuerdo a las pruebas de filtración a presión y al vacío, los valores de la resistencia específica del medio filtrante (R_m) a distintas presiones son casi constantes, debido a la dureza del material cerámico que hace que no se deforme el medio filtrante ni varíe el tamaño de los poros.
12. Empleando el programa de simulación para determinar los parámetros de permeabilidad y resistencia específica del queque y del análisis granulométrico del queque a 60 y 70% de sólidos se concluye que la permeabilidad del queque (mediante la ecuación de Kozeny & Carman) decrece al aumentar la presión de operación y el porcentaje de sólidos (ver tablas 8.41 y 8.42), tal como se predice en la teoría de filtración. La formación de partículas homogéneas en la superficie de la placa cerámica conlleva a formar queques más compactados de mayor resistencia específica y menor permeabilidad.
13. La resistencia específica del queque aumenta rápidamente con la disminución del tamaño de partículas. Partículas finas como las de concentrado de plomo provocan una resistencia baja del queque y en consecuencia pequeños ratios de humedad del queque.

14. El filtro cerámico minipiloto es empleado sólo para filtrar concentrados poli metálicos. Filtrar pulpas de relave cianurado implica obtener queques con alta humedad residual, debido a que las partículas a filtrar se caracterizan por ser muy finas. Asimismo, los relaves cianurados tienen la particularidad de contener moléculas de agua en su estructura, ya que estas ocupan los espacios libres dejados por el material valioso producto de la lixiviación, lo que hace difícil la separación sólido / líquido.
15. De las pruebas de filtración al vacío con una pulpa de relave cianurado se determina que operar a mayor porcentaje de sólidos e incrementando la presión de vacío se obtienen queques con menor humedad residual en menor tiempo. (ver figuras 8.41 y 8.42).
16. La solución filtrada obtenida de las pruebas de filtración a presión y al vacío a distintos porcentajes de sólidos con una pulpa de concentrado de Plomo y relave cianurado es totalmente cristalina, debido a que el medio filtrante está formado por microporos uniformes muy finos de alúmina sinterizada porosa de tamaño promedio menor a 0.7 micrones, la cual impiden el paso de las partículas por los canales de drenaje de la placa cerámica.

CAPÍTULO 11

OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

1. De las pruebas de filtración al vacío realizadas a nivel del mar el máximo gradiente de presión alcanzado fue de 28 pulgadas de mercurio (0°C) equivalente a 0.935 atmósferas. Para aplicaciones por encima de los 4000 msnm la presión de vacío disponible disminuye aproximadamente a 15 pulgadas de Hg. (0°C) equivalente a 0.501 atmósferas. Para comparar ambas tecnologías de filtración al vacío y a presión por encima de los 4000 msnm donde se ubica el mayor campo de aplicación de la industria minera considerar una presión de vacío de 15 pulgadas de Hg. (0°C).
2. De las tablas de reporte de humedades a distintos porcentajes de sólidos tanto para las pruebas de filtración al vacío como a presión se observa que el volumen de solución filtrada se incrementa conforme aumenta el gradiente de presión.
3. De las pruebas de filtración a presión realizadas a nivel del mar, el máximo gradiente de presión alcanzado fue de 6 bar equivalente a 5.921 atmósferas. Sin embargo el diseño de las placas cerámicas considera hasta 4 bar equivalente a 3.948 atmósferas. Con esta tecnología no hay problema de pérdida de presión por efecto de la altura.
4. De las tablas de reporte de humedades a distintos porcentajes de sólidos tanto para las pruebas de filtración al vacío como a presión se observa que el volumen de solución filtrada se incrementa conforme aumenta el gradiente de presión.
5. De acuerdo a los gráficos obtenidos (figuras 8.18 al 8.22 y figuras 8.34 al 8.37) de las pruebas de filtración al vacío y presión, respectivamente, se

observa que el mayor espesor del queque se obtiene al incrementar el porcentaje de sólidos y empleando la máxima presión de filtración.

6. El menor porcentaje de humedad del queque de las pruebas de filtración al vacío con una pulpa a 80% de sólidos se obtiene cuando la placa cerámica gira a 4.6RPM. Sin embargo con esta condición de operación no se produce mayor cantidad de queque debido a la velocidad de giro de la placa. Filtrar pulpas de concentrado de Plomo a 2.5RPM se obtienen los mejores parámetros de filtración (ver figuras 8.6 y 8.7).
7. La placa cerámica empleada para realizar las pruebas de filtración a presión y al vacío fue del tipo S3, la cual sólo puede operar hasta una presión de 4 bar.
8. Antes de realizar una prueba de filtración a presión o al vacío se recomienda realizar el análisis granulométrico de la alimentación a fin de compararlo con el del queque.
9. De acuerdo a las pruebas de filtración a presión y al vacío se recomienda incrementar la presión gradualmente con la finalidad de no saturar los poros de la placa cerámica.
10. De acuerdo a las pruebas realizadas a presión y al vacío, la velocidad de la paleta de agitación del filtro y la velocidad de giro de la placa cerámica dependerá del tipo de material a filtrar.
11. Al aplicar un mismo gradiente de presión se observa que el volumen de solución filtrada puede aumentar o disminuir, esto ocurre cuando no existe un nivel adecuado de pulpa en el interior del recipiente del equipo de filtración, debido a que el flujo de alimentación de la pulpa al filtro no es constante.

12. De las pruebas de filtración a presión y al vacío con pulpas de concentrado de Plomo a concentraciones superiores a 70% de sólidos se recomienda filtrar a bajas presiones de operación para no saturar los poros del medio filtrante.
13. Después de cada prueba de filtración, la limpieza de las placas cerámicas se realizará empleando ultrasonido (por espacio de una hora) o remojándolas totalmente en una solución de ácido nítrico al 1% durante varios días.
14. Antes de operar el filtro cerámico minipiloto a presión, verificar que no exista fuga de aire por las mangueras. Asimismo, evitar la fuga de aire en el momento de realizar el juego de válvulas tipo mariposa de la descarga del queque a fin de mantener el equipo presurizado.
15. Para las pruebas de filtración a presión, se recomienda que el ingreso de aire a la válvula electroneumática no exceda los 100 PSI.