

FILTRACIÓN DE CONCENTRADOS DE SULFUROS DE COBRE CON FORMACIÓN DE TORTA: DISEÑO EXPERIMENTAL Y OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO

Recibido: 31 de Mayo, 2021 • Aceptado: 17 de Agosto, 2021

Autores:

Facundo Arnaudo¹

Ana Maria Celeda¹

Jorge Pablo de Celis^{*2 3}

 <https://orcid.org/0000-0001-5036-2710>

¹ INTEMIN-SEGEMAR Av. Gral Paz 5445 Ed. 14 (1650) San Martín. Pcia. Buenos Aires.

² Laboratorio de Investigación y Desarrollo en Ingeniería Química (LIDIQ), Departamento de Ingeniería Química, Facultad Regional Avellaneda, Universidad Tecnológica Nacional. Ramón Franco 5050 (1874). Villa Domingo, Avellaneda. Buenos Aires. Argentina.

³ Laboratorio de Procesos en Ingeniería Química (LAPIQ), Escuela de Ingeniería, Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Oeste. Merlo, Buenos Aires, Argentina.

Contacto:

**Autor a quien la correspondencia debe ser dirigida: jdecelis@fra.utn.edu.ar*

Roles autorales:

Conceptualización: Ana Maria Celeda, Jorge Pablo de Celis y Facundo Arnaudo

Curaduría de Datos: Facundo Arnaudo

Investigación: Facundo Arnaudo

Administración del Proyecto: Jorge Pablo de Celis

Recursos: Ana María Celeda y Jorge Pablo de Celis

Supervisión: Ana María Celeda y Jorge Pablo de Celis

Redacción – Borrador original: Facundo Arnaudo.

Escritura – Revisión y Edición: Facundo Arnaudo, Ana Maria Celeda y Jorge Pablo de Celis

Cómo citar este artículo:

Arnaudo, F., Celeda, Ana María, de Celis, Jorge Pablo. Filtración de concentrados de sulfuros de cobre con formación de torta: diseño experimental y optimización del proceso. Revista *Rumbos Tecnológicos*, Volumen 13, 2021, pp. 99-116. Secretaria de Ciencia, Tecnología y Posgrado, Facultad Regional Avellaneda, Universidad Tecnológica Nacional. <http://rumbostecnologicos.utnfrainvestigacionyposgrado.com/tipo-de-articulo/reportes/filtracion-de-concentrados-de-sulfuros-de-cobre-con-formacion-de-torta-diseno-experimental-y-optimizacion-del-proceso>



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional

RESUMEN

Se estudió la incidencia de las variables operativas sobre el proceso de filtración de una suspensión de sulfuros metálicos proveniente de la industria minera. El sólido que la conforma representa el 60% de la masa total de la suspensión y muestra una distribución de tamaño de partículas con más del 70% de la masa inferior a 45 μm . El mismo, está compuesto principalmente por calcopirita y pirita, siendo la primera, la especie mineralógica portadora del metal de interés (cobre). El equipo utilizado es un filtro de escala piloto de 0,1 m^2 de área filtrante. Se estudió la influencia de la presión y el tiempo de bombeo sobre las variables de salida: capacidad de filtración (\dot{C}_f) y humedad de la torta (H). La selección de puntos operacionales se realizó por un diseño OHLC. De esta manera, con unos pocos ensayos se pudo delimitar las zonas de mejor performance para un análisis más exhaustivo. Se pudo observar que la zona óptima de operación resultó alrededor de los 55 segundos de operación y los 6,5 bar. En la misma, la capacidad de filtración se maximiza y la humedad retenida por el sólido se mantiene en valores apropiados para este tipo de materiales.

Palabras Claves: Filtración por presión, OHLC, Sulfuros metálicos

ABSTRACT

The incidence of operational variables on the filtration process of a suspension of metallic sulphides from the mining industry was studied. The solid that forms it represents 60% of the total mass of the suspension and shows a particle size distribution with more than 70% of the mass less than 45 μm . It is mainly composed of chalcopyrite and pyrite, the former being the mineralogical species that carries the metal of interest (copper). The equipment used is a pilot-scale filter with a filter area of 0,1 m^2 . The influence of pressure and pumping time on the output variables were studied: filtration capacity (\dot{C}_f) and cake moisture (H). The selection of operational points was carried out by an OHLC design. In this way, it was possible to delimit the best performing areas for a more exhaustive analysis with a few trials. It was observed that the optimal operating zone was around 55 seconds of operation and 6.5 bar. In it, the filtration capacity is maximized and the moisture retained by the solid is kept at appropriate values for this type of materials.

Key-words: Pressure filtration, OHLC, Metal sulphides

INTRODUCCIÓN

El beneficio de minerales o “*ore dressing*”, es la rama del procesamiento de minerales que estudia las operaciones que permiten obtener el concentrado de cobre. En esta parte del procesamiento se descarta la mayor parte de los minerales no portadores que constituyen la denominada “ganga”, “cola” o desecho del proceso. En general, el tipo de operaciones que se usan depende de las propiedades del mineral portador que desee concentrarse y el tipo de mena en que se encuentra.

Las etapas principales del procesamiento de minerales para la obtención de concentrados de cobre se pueden agrupar en 4 etapas operativas bien diferenciadas: conminución, concentración, obtención del producto final y disposición de residuos (Beregovski et al., 1972; Ballester et al., 2000).

Proceso de separación sólido-líquido por medio de filtración con formación de torta.

El proceso de filtración forma parte de la etapa de obtención del producto final ya que permite separar el líquido del sólido concentrado en minerales de cobre.

La filtración con formación de torta, utilizada generalmente en los procesos de separación de concentrados de cobre, se caracteriza porque el sólido de la suspensión es retenido en la superficie del medio filtrante como una capa denominada torta. Esto se produce naturalmente cuando los poros del medio filtrante tienen un tamaño menor que el de las partículas.

La mayoría de los equipos de filtración con formación de torta trabajan en ciclos de formación de la torta, prensado, lavado, secado y descarga. Por otro lado, existen diferentes tipos de mecanismos de operación, según la forma en que se produce el gradiente de presión requerido, ya sea por gravedad, vacío o presión positiva (Concha, 2001).

Los filtros de presión positiva son los de mayor presencia en la industria minera, junto con los filtros de vacío. El diseño de estos equipos se basa principalmente en establecer el área de filtración necesaria para mantener una elevada capacidad de procesamiento (expresada en kg de sólido seco por metro cuadrado de superficie filtrante por hora). A su vez, para la minería de obtención de concentrado metálicos (sulfuros de cobre, plomo, zinc, molibdeno etc.) se requiere mantener los valores de humedad de la torta en rangos aceptables, estimada entre el 7 y el 10% en masa para este producto. Esto se debe a que una elevada humedad encarece el transporte y una baja humedad favorece la pérdida de producto en forma de polvo.

Sin embargo, la variedad de materiales a filtrar, con propiedades muy diferentes, hace que se considere apropiado realizar pruebas de filtración a menor escala. De esta manera, se logran obtener datos empíricos que describan el comportamiento del sistema y aseguran el correcto dimensionamiento del filtro industrial. En la necesidad de optimizar recursos, tiempo y esfuerzo, existen herramientas que permiten obtener resultados confiables con pocos ensayos, basadas en análisis estadísticos y desarrollos matemáticos entre otros. En esa dirección, se propone un diseño experimental y un tratamiento matemático con la finalidad de cumplir los objetivos detallados a continuación.

OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo es estudiar el efecto de la presión de carga del filtro y el tiempo de carga sobre los parámetros de diseño a través de un diseño de experiencias mediante una matriz de

diseño OHLIC. Se realizarán ensayos de separación sólido-líquido (SSL) con la idea de establecer una zona de “confort” para la operación de filtración.

MATERIALES Y MÉTODOS

Caracterización de la suspensión modelo empleada en los ensayos de filtración

Se utilizó una suspensión de concentrado de sulfuro de cobre proveniente de un proceso de flotación. La muestra a ensayar se tomó del tanque de almacenamiento del material que ingresa a la planta de filtrado, desde un mineraloducto obviaría este detalle. Para los ensayos de filtración, se tomaron muestras representativas de la suspensión, la cual fue previamente caracterizada.

El porcentaje en masa de sólidos de la suspensión se determinó sobre una porción de la muestra, mediante secado en una balanza de humedad AND modelo MX-50, con un error del 0,01%, bajo la acción de luz halógena a una temperatura pre-establecida en 120°C, empleando una rampa de intercambio calórico programada previamente.

La densidad se determinó registrando la masa (en una balanza granataria Radweg modelo PS4500C2) de un volumen de muestra conocido, medido con una probeta de 500 ml.

Sobre otra muestra representativa, que se dejó decantar previamente, se extrajo el sobrenadante, el cual se filtró con papel de filtro para eliminar cualquier partícula remanente. Se midieron el pH y la conductividad eléctrica del líquido filtrado obtenido. Los sólidos separados durante la decantación se secaron en estufa a 65°C y se utilizaron para determinar las especies minerales presentes mediante análisis de difracción de rayos X (DRX) sobre una preparación de polvo “no orientado” utilizando un equipo Philips MPDXPert con radiación de Cu en un intervalo $5^\circ < 2\theta < 70^\circ$ con una relación paso/tiempo de 0,03º/2s. La interpretación de las señales se realizó con un software High Score Plus PANalytical.

Los componentes mayoritarios presentes en la muestra se cuantificaron mediante un análisis por fluorescencia de rayos X dispersivo en longitud de onda (EDXRF), utilizando un equipo Shimadzu modelo XRF1700, sobre una pastilla preparada por prensado con agente aglomerante.

La granulometría de la muestra representativa de la suspensión, se determinó por tamizado en húmedo utilizando tamices con mallas ASTM con aberturas de 125, 90, 75, 53 y 45 micrones bajo chorro de agua. Las partículas retenidas en cada tamiz se secaron y se registró su masa. La distribución de tamaños de los sólidos con granulometría inferior a 45 micrones se determinó con un equipo Sedigraph 5100.

La densidad real del sólido se determinó por picnometría de gases utilizando helio de ultra alta pureza en un equipo Micromeritics Acupic 1330.

Descripción del funcionamiento del equipo y de los ensayos realizados en el proceso de filtración

Los ensayos de filtración de la suspensión en estudio se llevaron a cabo utilizando un equipo en escala piloto Outotec - Larox PF 0,1. El principio de funcionamiento es el de filtración por presión y en la Figura 1 se incluye un esquema general del mismo. La operatoria del filtro permite que, durante las etapas de bombeo y prensado por diafragma, la presión en la cámara se mantenga constante en un valor pre-fijado de antemano.

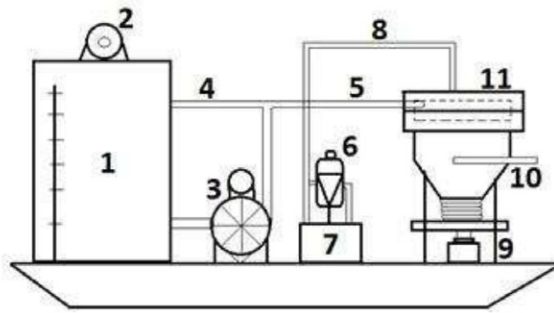


Figura 1. Esquema general del equipo y ubicación de sus componentes principales.

El equipo está provisto de un tanque con agitación donde se carga la muestra a usar durante los ensayos (1), una cámara de filtrado horizontal con una superficie de 0,1 m² (11) donde se coloca la tela filtrante previamente humedecida y tarada, cuya función es permitir que se constituya y sostener la torta de filtrado. La cámara se cierra y se abre por efecto de un pistón hidráulico (9). El líquido filtrado se recoge por una salida en la base de la cámara (10). El diafragma de prensado, en el interior de la cámara se mueve por entrada de agua (8) desde un tanque de agua (7) mediante una bomba multiplicadora de presión (6).

La homogeneidad de la pulpa en el tanque, se mantuvo en todo momento por la agitación mecánica (2) y la turbulencia que genera la bomba de doble diafragma (3) que recircula la suspensión al tanque (4), antes y después de finalizada la etapa de bombeo de material (5) a la cámara de filtrado. Pevio al inicio de cada ensayo se verificó la densidad de la suspensión, tomando una muestra en la válvula situada justo antes de la succión de la bomba (3).

Se realizaron ensayos utilizando un textiles de poliéster (PES) fabricado por TamfeltOy, con una permeabilidad al aire de 5 m³/m²/min.

El proceso de filtrado procede en tres etapas. Las mismas fueron descriptas oportunamente por (Townsend, 2003) y son:

(A) ETAPA DE BOMBEO DE LA SUSPENSIÓN A LA CÁMARA DE FILTRACIÓN

En la etapa de bombeo o de alimentación (Figura 2), la pulpa es bombeada hacia la cámara de filtración con una presión prefijada y constante.

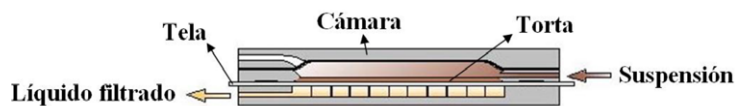


Figura 2. Representación del interior de la cámara de filtración durante la alimentación.

En esta etapa se da la separación sólido-líquido principal, ya que a medida que la suspensión ingresa a la cámara, genera la presión necesaria para que el líquido filtrado abandone el recinto, acumulándose sólido sobre el medio filtrante y permitiendo el ingreso de más suspensión.

El bombeo se prolongará durante un tiempo predeterminado. Una vez finalizado, el líquido continuará fluyendo fuera de la cámara, ya que la presión residual dentro de la misma, aún supera la resistencia que ofrecen la torta de sólido formada y el medio filtrante. Este tiempo de transición o “tiempo muerto” continuará hasta que se produzca la adecuación de los sistemas mecánicos del filtro para dar inicio a la siguiente etapa.

(B) ETAPA DE DESAGUADO MEDIANTE EL PENSADO DE LA TORTA POR UN DIAFRAGMA

El diafragma elástico que se encuentra en la parte superior de la cámara, comenzará a descender, producto del agua que es bombeada sobre este. Su desplazamiento forzará la filtración de la suspensión que aún se encuentra sobre el sólido (Figura 3). Una vez que hace contacto con la superficie de la torta conformada hasta ese momento, la presión ejercida por el diafragma podría permitir comprimir la torta, evacuando así parte del líquido que aún queda en el interior del sólido, dependiendo de cuán compresible sea el sólido.

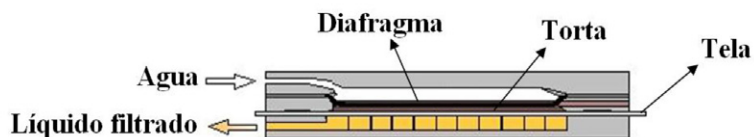


Figura 3. Representación del interior de la cámara de filtración durante el prensado.

La presión ejercida por el diafragma se mantendrá constante hasta la finalización de la etapa y al igual que con el periodo de alimentación, se prolongará durante un tiempo posterior.

(C) ETAPA DE SECADO DE LA TORTA CON AIRE COMPRIMIDO

La etapa de secado (Figura 4) consiste en hacer circular aire a presión a través de la torta, para que éste arrastre el líquido remanente que aún queda en los poros internos del lecho y que no pudo ser eliminado en las etapas anteriores.

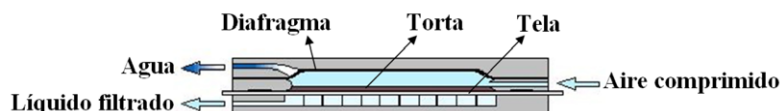


Figura 4. Representación del interior de la cámara de filtración durante la etapa de secado.

El aire introducido, además, facilita el despegue del diafragma con la torta, de la etapa anterior, y colabora con el retroceso del agua que quede sobre el diafragma. El caudal de aire se fija con una válvula que se encuentra justo antes de su alimentación.

En el caso de filtros industriales a presión, la alimentación de la suspensión se realiza, generalmente, por medio de bombas centrífugas que impulsan el concentrado. Para ello, en este tipo de

filtración, el gradiente de presión aplicado es constante durante la mayor parte de la operatoria. El flujo de filtrado depende de la resistencia ofrecida por el medio filtrante más la de la torta, que crece en espesor con el tiempo.

La duración de la etapa determinará la cantidad de sólido que ingresa a la cámara, no obstante, el volumen de la torta quedará limitado al volumen del recinto de filtración. A su vez, la presión de bombeo establecerá la velocidad con la que se realiza la filtración, como así también la forma en que se irán acomodando las partículas sobre la tela. Asimismo, la evolución de la resistencia ofrecida por el medio filtrante y por la torta en crecimiento, reducirá gradualmente el gradiente de la fuerza impulsora disminuyendo la velocidad de filtración. Dependiendo de la presión de bombeo y de las características del lecho conformado, la tasa de acumulación de líquido filtrado y de sólidos dentro de la cámara irá disminuyendo hasta hacerse nula, en casos límites.

En este sentido, establecer las zonas donde se optimice la performance del equipo, respecto a la capacidad de filtración y a la humedad de la torta, requerirá analizar el proceso en diferentes condiciones de operación.

Caracterización del producto sólido y del efluente líquido obtenidos en los ensayos de filtración.

Una vez que finalizado el ciclo completo de filtración, se procede con la despresurización y apertura de la cámara, para retirar la tela junto con la torta de sólido formada sobre ella (Figura 5). Antes de iniciar otro ensayo con la misma tela, es necesario lavarla manualmente para mantener su eficiencia en los distintos ciclos de filtrado.



Figura 5. Torta formada sobre la tela filtrante, en el filtro Larox PF 0,1.

Al final del proceso, se registró el volumen de filtrado en función del tiempo de operación de cada etapa.

La masa de la torta húmeda (M_{th}) de cada ensayo se determinó en una balanza granataria Sartorius BP 34000P. Asimismo, en cada torta obtenida, se determinó el contenido de agua en su volumen (humedad) y la altura correspondiente. Para la determinación de la humedad de la torta (H) se tomaron cinco puntos elegidos al azar, basados en un estudio estadístico (Arnaudo et al., 2018), para asegurar la reproducibilidad de la medición. La misma se realizó en una balanza de humedad AND modelo MX-50, con un error del 0,01%, bajo la acción de luz halógena a una temperatura pre-establecida en 120°C, empleando una rampa de intercambio calórico programada previamente. La altura de la torta se midió con un calibre digital, en los mismos sitios donde se extrajeron las muestras para la determinación de la humedad.

Con los datos empíricos obtenidos en cada ensayo, se calculó la capacidad de filtración (\dot{C}_f) a partir de la ecuación 1.

$$\dot{C}_f = \frac{M_{th} \cdot (1 - H)}{A \cdot t_t} \quad [1]$$

donde, H es el porcentaje en masa del líquido retenido en la torta, A es el área de filtración del equipo piloto ($0,1 \text{ m}^2$) y t_t es el tiempo que duró el ciclo completo de filtración.

Estudio de las variables operativas de la etapa de bombeo

Se realizaron ensayos en el equipo de filtración de planta piloto Outotec - Larox PF, 0,1 donde se analizó la influencia de las variables tiempo y presión de bombeo sobre los parámetros de salida: capacidad de filtración y humedad de torta; manteniendo constante las condiciones de la etapa de prensado y secado.

El límite inferior del rango de presiones de bombeo para la alimentación del filtro se estableció en 3 bar. Por cuestiones operativas de la línea de presión utilizada, el límite superior de presión de bombeo fue 7 bar.

Al comienzo de la etapa de bombeo la cámara se encuentra vacía y a presión atmosférica. A medida que la suspensión comienza a inundar el recinto y las primeras capas de sólido son retenidas, la presión en el interior se irá incrementando hasta el valor fijado para la operación, lo que se logra a los 5 segundos desde el inicio. Se estableció un tiempo de 15 segundos como tiempo mínimo de duración de la etapa de bombeo. El límite superior del tiempo de bombeo, se estableció en 60 segundos a partir de lo observado en ensayos preliminares. Cuando el llenado se prolongó más de ese tiempo, la tasa de acumulación de líquido filtrado, durante la parte final la etapa, se reduce drásticamente por la elevada cantidad de sólidos retenidos dentro de la cámara.

Los rangos de operación establecidos permiten obtener una extensa serie de combinaciones de tiempo y presión de bombeo. Sin embargo, el número de ensayos que es posible realizar, acorde al volumen de suspensión disponible, fuerza a definir las condiciones de operación para una limitada cantidad de pruebas.

Las condiciones intermedias de operación, se establecieron a partir de una matriz de diseño experimental OHLC (Hiper Cubos Latinos Ortogonales). Este diseño se implementó para seleccionar puntos (ensayos) lo más espaciadamente posible, evitando que haya más de un ensayo con el mismo tiempo o misma presión de bombeo. Este método permite obtener una primera impresión del comportamiento del sistema, en un amplio rango de valores, con unos pocos ensayos. La cantidad de niveles (tiempos y presiones) se calcula con la siguiente ecuación:

$$2^m + 1 = n$$

donde n es el número de mediciones (o de niveles), m es un número entero mayor que 1 y el término que se suma representa el punto central del diseño.

Teniendo en cuenta los rangos de presión y tiempo establecidos, se fraccionó cada uno en 9 niveles diferentes ($m = 3$). De esta manera, la presión de bombeo aumenta de 3 a 7 bar con un factor de 0,5 bar y el tiempo de bombeo aumenta desde 15 hasta 55 segundos (inferior a 60 s) con incrementos de 5 segundos y queda definida una matriz general de operación de 9×9 (81 puntos

de prueba posibles) y por medio del diseño OHLC, se fijan 9 ensayos de forma predeterminada, para generar una primera serie de pruebas preliminares.

Los puntos identificados en la matriz (Tabla 1) son los ensayos seleccionados y se encuentran con una numeración característica que representa el orden en que fueron realizados.

Tabla 1. Matriz de presión y tiempo de bombeo. Se identifican los puntos de prueba distribuidos en la matriz por un diseño OHLC.

Tiempo [s]	Presión [bar]								
	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7
15						Ensayo 1			
20							Ensayo 3		
25		Ensayo 5							
30	Ensayo 4								
35					Ensayo 2				
40									Ensayo 9
45								Ensayo 8	
50			Ensayo 6						
55				Ensayo 7					

Como se puede apreciar en la Tabla 1, los puntos se encuentran distribuidos de forma que abarcan la mayor “superficie” posible de la matriz y, a la vez, no hay ensayos que tengan el mismo tiempo o la misma presión de bombeo.

En todos los ensayos, la etapa de prensado se realizó durante 120 segundos a una presión de compresión de 15 bar y la etapa de secado se llevó a cabo durante 90 segundos empleando un caudal de aire de 100 l/min.

La elección de las variables de entrada por el diseño OHLC, permite localizar posibles zonas de mayor capacidad de filtración y zonas donde la humedad cumpla con los requisitos para el transporte.

A partir de la información producida, en los ensayos preliminares, se procedió a realizar una serie de nuevas pruebas de separación en la región de mayores capacidades del filtro y valores adecuados para la humedad de la torta. Para ello, se empleó nuevamente el diseño OHLC, utilizando la mínima cantidad de puntos posibles. Se llevaron a cabo cinco ensayos experimentales ($m = 2$). Finalmente, se determinará la región de operación donde el proceso de filtración presenta la mejor performance.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de la suspensión empleada en los ensayos de filtración

En la Tabla 2 se resumen los valores obtenidos en los ensayos de caracterización realizados a la suspensión de partida y a los sólidos que contiene.

Tabla 2. Características de la suspensión original.

Parámetro	Valor medido
% de sólidos en la suspensión	55,5
Densidad suspensión [g/cm ³]	1,84
Conductividad eléctrica del líquido (mS/cm)	3,79
pH del líquido	6,69
Densidad real del sólido (g/cm ³)	4,2892 ± 0,0070

Se puede observar que más del 50 % de la suspensión está conformada por la fase sólida y que el medio es casi neutro.

En la Tabla 3 se detallan los componentes minerales mayoritarios, minoritarios y accesorios que conforman los sólidos de la suspensión modelo. En la Tabla 4 se incluyen los resultados del análisis químico elemental de los mismos.

Tabla 3. Resultados del análisis mineralógico del sólido separado de la suspensión original, obtenido por DRX.

Componente	Identificación	Fórmula
Mayoritarios	Calcopirita	CuFeS ₂
Minoritarios	Pirita	FeS ₂
Accesorios	Esfalerita	ZnS
	Tennantita	Cu ₁₂ As ₄ S ₁₃
	Molibdenita	MoS
	Cuarzo	SiO ₂

Tabla 4. Análisis químico del sólido separado de la suspensión original, obtenido por EDXRF.

Analito	g/100g	Analito	g/100g
CuO	34,00	Al ₂ O ₃	0,18
Fe ₂ O ₃	28,70	P ₂ O ₅	0,09
SO ₃	16,40	CaO	0,06
As ₂ O ₃	1,00	K ₂ O	0,05
MoO ₃	3,00	SeO ₂	0,02
ZnO	0,85	Sb ₂ O ₃	0,01
SiO ₂	0,58	PbO	0,24
		Ppc (100°C)	16,70

Estos resultados muestran que en el concentrado de sulfuros metálicos la calcopirita (CuFeS₂), especie portadora de cobre, es el componente mayoritario. Otros sulfuros metálicos presentes son la pirita y la molibdenita. El hierro total analizado se reparte entre las especies calcopirita y pirita (FeS₂) y el arsénico se encuentra en la especie tennantita. La presencia de cuarzo como componente minoritario se confirma con el bajo contenido de SiO₂ que indica el análisis químico. El bajo contenido de aluminio y elementos alcalinos y alcalinotérreos indica la ausencia de arcillas u otro tipo de silicoaluminatos. La Ppc a 100°C es coincidente con el contenido de SO₃ que corresponde a los sulfuros presentes en la muestra. En consecuencia, se estudió la distribución granulométrica del sólido, obtenida por tamizado en húmedo. Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 5.

Tabla 5. Análisis granulométrico del sólido obtenido por tamizado en húmedo.

Tamaño de partícula [μm]	% m/m
> 125	0,3
90 – 125	1,3
75 – 90	3,2
53 – 75	10,3
53 – 45	12,1
< 45	72,8
Total	100,0

La distribución de tamaños obtenida, refleja una baja presencia de partículas superiores a 75 μm . En general, para este tipo de sulfuros este es un requerimiento importante para el transporte de suspensiones por cañerías, para evitar la sedimentación durante el trayecto. La mayor proporción de partículas (por encima del 70%) se distribuye en granulometrías menores a los 45 μm . Estos últimos se analizaron con el analizador de partículas Sedigraph 5100. Los resultados alcanzados se incluyen en la Tabla 6. En la misma, se incluye la distribución de tamaños de los sólidos con granulometría inferior a los 45 μm en su fracción y referidos a la muestra total de sólidos. La distribución de tamaños muestra una asimetría, con un valor modal ubicado en el rango comprendido entre los 16 y 24 μm . Además, la muestra de partículas comprendidas entre los 12 y los 45 μm representa casi el 60 % de la población total.

Tabla 6. Análisis granulométrico del sólido obtenido por tamizado en húmedo.

Tamaño [μm]	% m/m referido a la fracción <45 μm	% m/m referido al total de sólidos
0-2	3,24%	2,36%
2-3	4,87%	3,54%
3-4	4,62%	3,36%
4-6	8,50%	6,19%
6-8	7,73%	5,62%
8-12	12,42%	9,04%
12-16	9,65%	7,02%
16-24	17,91%	13,03%
24-32	15,78%	11,48%
32-40	9,22%	6,71%
40-45	6,05%	4,40%
Total	100,00%	72,8%

Selección de los ensayos representativos de la etapa de bombeo y determinación de la zona óptima de operación

Los valores obtenidos para la capacidad del filtro y la humedad de la torta en los ensayos preliminares seleccionados se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Capacidad del filtro y humedad de la torta obtenidos en los ensayos preliminares.

Ensayo	Tiempo [s]	Presión [bar]	Capacidad [kg/m ² h]	Humedad [% m/m]
1	15	5,5	494	5,9
2	35	5,0	522	6,7
3	20	6,0	553	5,8
4	30	3,0	508	5,8
5	25	3,5	499	6,0
6	50	4,0	572	6,2
7	55	4,5	575	6,8
8	45	6,5	629	6,5
9	40	7,0	595	6,7

En las Figuras 6 y 7 se representa la capacidad del filtro de los 9 ensayos preliminares, en función del tiempo de bombeo y la presión de operación. Ambas figuras muestran la misma superficie vista de diferentes orientaciones, para que de esta manera, se pueda apreciar la evolución de la variable de salida en función de las variables de entrada. El patrón de colores utilizado va desde los valores más bajos de capacidad de filtración en color azul hasta los valores más elevados en color rojo.

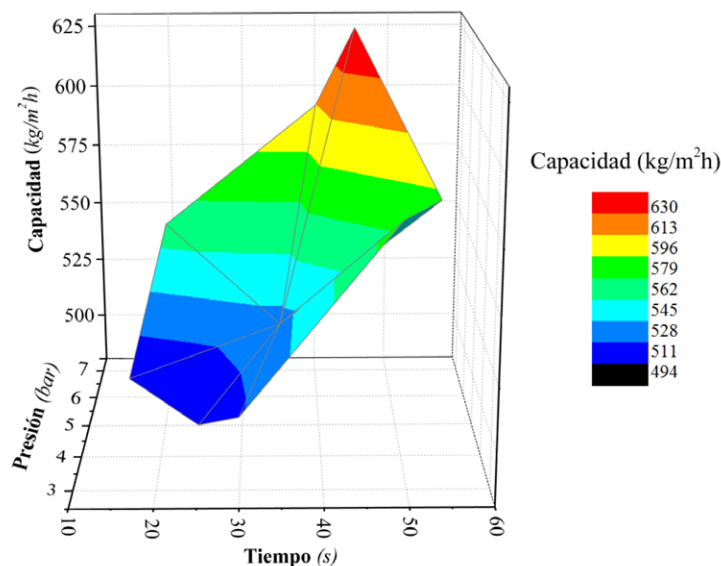


Figura 6. Capacidad del filtro para los ensayos de filtración en función del tiempo de bombeo y la presión de operación.

La superficie obtenida presenta una tendencia ascendente hacia los tiempos más elevados. La zona indicada en coloración roja representa la de mayor capacidad y se da en el entorno de los 45 segundos. Este sería el tiempo de bombeo del ensayo con mayor capacidad de filtración.

Por otro lado, se observa que al incrementar la presión de bombeo se produce el aumento de la capacidad de filtración. Sin embargo, el máximo valor de la variable de salida se da a una presión inferior a la máxima ensayada.

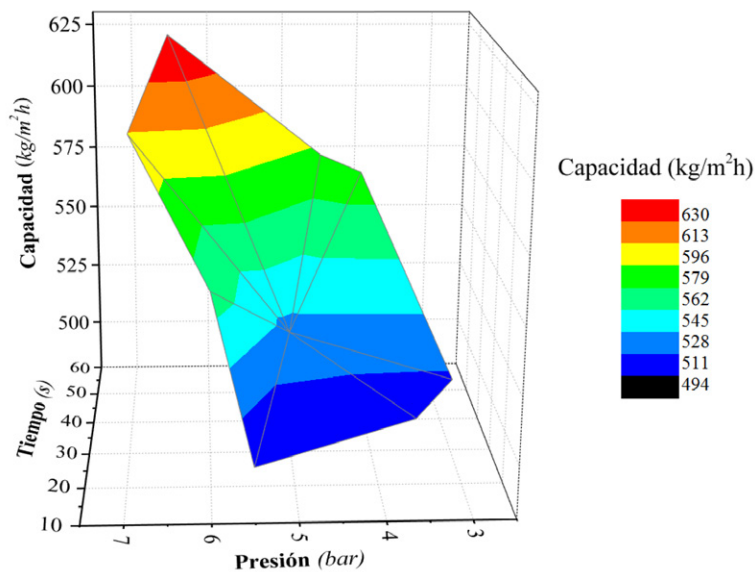


Figura 7. Capacidad del filtro para los ensayos de filtración en función del tiempo de bombeo y la presión de operación.

La capacidad depende de los kilogramos de sólido seco que sean retenidos por hora y por metro cuadrado de la superficie filtrante, la cual aumenta con el tiempo de bombeo ya que ingresará una mayor cantidad de suspensión a la cámara filtrante. El tiempo considerado para calcular la capacidad es el correspondiente al ciclo total; este incluye todas las etapas del proceso más un cierto tiempo muerto. Cabe resaltar que la duración de la etapa de bombeo no modifica apreciablemente el tiempo total del ciclo, pero sí provoca una variación significativa de la cantidad de sólidos retenidos por el filtro. Sin embargo, el tiempo que puede prolongarse la etapa de bombeo se encuentra limitado por el tamaño de la cámara de filtración.

El aumento en la presión de bombeo permite el ingreso de una mayor proporción de sólidos, provocando el crecimiento de la torta incrementándose la resistencia al pasaje del flujo.

Asimismo, la fuerza impulsora se amplifica y permite que la filtración se dé con mayor rapidez. No obstante, cuando la cámara se encuentra completa con el material sólido, no será posible el ingreso de la suspensión, independientemente de la presión de bombeo.

En la Figura 8 se muestra la misma superficie de las Figuras 6 y 7 vista desde un plano superior. De esta manera, la superficie queda proyectada sobre el plano presión de operación – tiempo de bombeo. En la misma se ve que los valores mayores de capacidad de filtración se obtienen en el entorno de un tiempo de bombeo algo menor a los 50 segundos y una presión de operación un tanto mayor a los 6,5 bar.

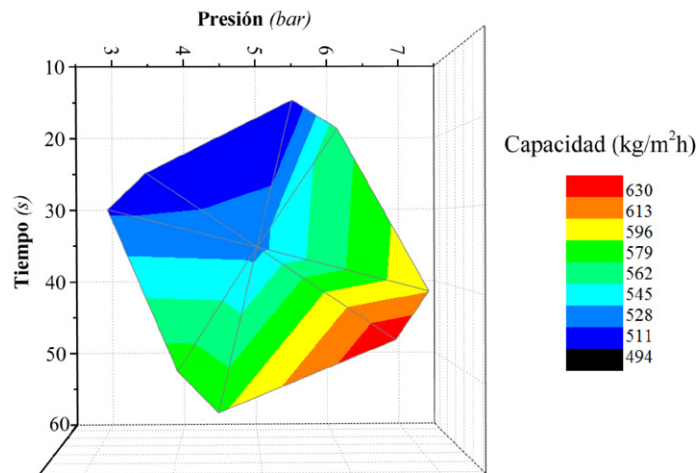


Figura 8. Proyección de la capacidad de filtración sobre el plano presión - tiempo.

De la misma forma, se analizó la cantidad de líquido remanente en la torta en el proceso de filtración. En la Figura 9 se representan los valores para la humedad de la torta obtenidos en los ensayos seleccionados en función del tiempo de bombeo y la presión de operación.

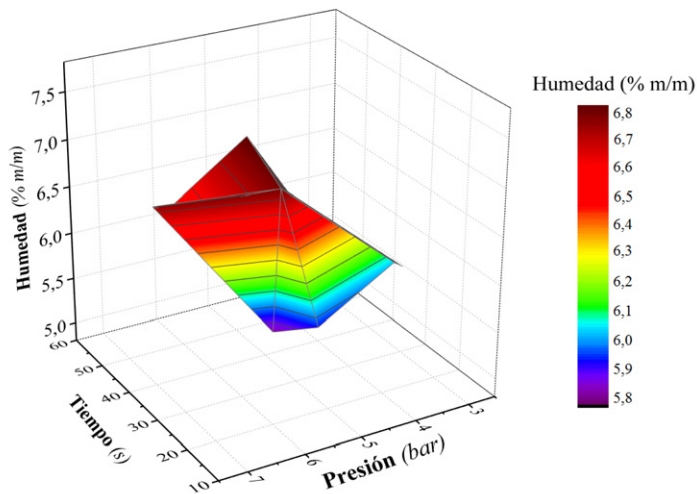


Figura 9. Humedad de la torta para los ensayos de filtración en función del tiempo de bombeo y la presión de operación.

Al observar la superficie obtenida para la humedad de la torta, no se visualiza una tendencia idéntica a la registrada para la capacidad de filtración. Para una observación más clara de los resultados, se muestra dicha superficie desde una vista superior proyectada sobre el plano presión - tiempo; esto se puede apreciar en la Figura 10. En la misma se puede divisar un patrón en forma de "V invertida" con cierta inclinación, correspondiente a la zona de mayor retención de líquido por parte de la torta. Es importante resaltar que a presiones cercanas a los 4,5 bar y a tiempos superiores a los 50 segundos se encuentran los mayores valores de humedad.

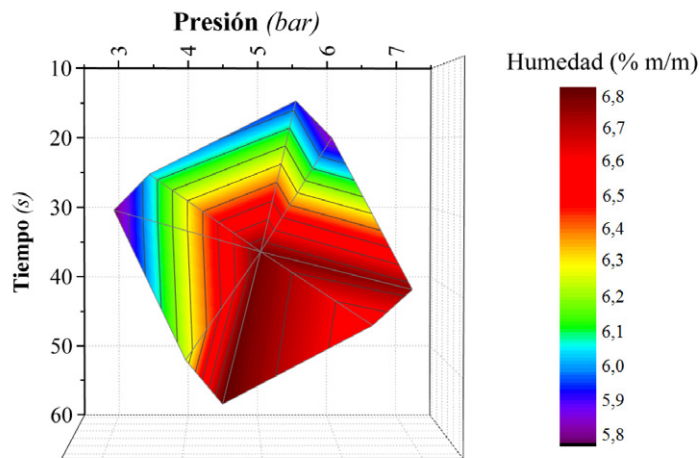


Figura 10. Proyección de la humedad de la torta sobre el plano presión-tiempo.

El rango de humedades considerado óptimo, para el producto mineralógico estudiado, se encuentra entre el 7 y el 10%. En función de los ensayos estudiados, se podría inferir que a presiones superiores a los 4,5 bar y tiempos por encima de los 40 segundos, los valores de humedad obtenidos se encuentran en una zona aceptable. Además se puede afirmar que la mayoría de la superficie registra valores de humedad superiores al 6%, lo que nos permitiría el transporte del material sólido en forma segura, por su proximidad a la región óptima.

A partir de la información producida, se llevaron a cabo cinco ensayos experimentales ($m=2$), donde se acotó la presión de operación máxima a un valor de 6,5 bar.

La selección de esta presión se hizo debido a que a partir de la misma, la capacidad comienza a disminuir, como se ve en la Figura 7.

En la Tabla 8 se presenta la primera matriz acotada de los ensayos elegidos, con una numeración arbitraria vinculada al diseño experimental propuesto.

Tabla 8. Matriz acotada de presión y tiempo de bombeo. Se muestran los puntos de prueba distribuidos en la matriz por un diseño OHLC.

	Presión [bar]				
Tiempo [s]	4,5	5	5,5	6	6,5
40		Ensayo 10			
45					Ensayo 8
50			Ensayo 11		
55	Ensayo 7				
60				Ensayo 12	

Como se puede observar, se llevaron a cabo tres nuevos ensayos de acuerdo al diseño OHLC (resaltados en la Tabla 8), con la finalidad de abarcar la mayor extensión posible de la matriz presentada. Los ensayos se encuentran distribuidos de forma que los tiempos de bombeo sean distintos y se opere a diferentes presiones, con el propósito que no haya ensayos con tiempos o presiones de bombeo iguales. El rango acotado de operación abarcó, también, las condiciones en las que se habían realizado los Ensayos 7 y 8.

Los valores obtenidos para la capacidad del filtro y la humedad de la torta en los ensayos seleccionados para la matriz acotada, se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Capacidad del filtro y humedad de la torta para los ensayos de la matriz acotada.

Ensayo	Tiempo [s]	Presión [bar]	Capacidad [kg/m ² h]	Humedad [% m/m]
7	55	4,5	575	6,8
8	45	6,5	629	6,5
10	40	5,0	538	6,8
11	50	5,5	578	6,6
12	60	6,0	616	7,0

Los valores de la humedad máxima y mínima difieren aproximadamente en un 7%; en todos los casos se obtienen registros aceptables para esta variable. Por otro lado, se aprecian dos ensayos con valores de la capacidad de filtración superior a los 600 kg/h m²; ambos se obtienen a las mayores presiones de operación: 6 y 6,5 bar, con una variación en la capacidad del filtro, entre los valores máximo y mínimo, del orden del 15%.

Los resultados indicarían que para las mayores presiones ensayadas, la capacidad del filtro es mayor como sería esperable. Además, los valores de líquido retenido por la torta para estos registros son adecuados. Por otra parte, no se observan cambios significativos en las variables de salida con respecto a los tiempos de bombeo estudiados.

En la dirección de optimizar las variables de entrada, se estudia la zona de máxima capacidad de filtración. A partir de lo analizado, queda definida en la Tabla 10 la matriz de ensayos optimizada donde se establecen los tiempos y presiones de operación.

Tabla 10. Matriz optimizada. Se muestran los ensayos enumerados en forma arbitraria.

Tiempo [s]	Presión [bar]	
	6	6,5
40	Ensayo 14	Ensayo 13
45	Ensayo 15	Ensayo 8
50	Ensayo 17	Ensayo 16
55	Ensayo 19	Ensayo 18
60	Ensayo 12	Ensayo 20

En este caso, se llevaron a cabo todos los ensayos resaltados en la tabla anterior que completan la matriz en su totalidad.

Los resultados obtenidos para la capacidad del filtro y la humedad de la torta para los nuevos ensayos y los realizados con anterioridad (8 y 12) se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11. Capacidad del filtro y humedad de la torta para los ensayos de la matriz optimizada.

Ensayo	Tiempo [s]	Presión [bar]	Capacidad [kg/m ² h]	Humedad [% m/m]
14	40	6	551,42	6,8
15	45		555,02	6,8
17	50		558,22	7,0
19	55		616,17	6,7
12	60		616,07	7,0
13	40	6,5	551,09	6,9
8	45		629,07	6,5
16	50		591,80	7,2
18	55		578,71	6,7
20	60		631,76	6,6

Cuando se analizan los valores a una presión de 6 bar se observa que con el aumento del tiempo del bombeo se incrementa la capacidad del filtro alcanzando un valor máximo de 616 kg/m²h. Cuando se incrementa la presión a 6,5 bar se observa la misma tendencia pero afectada, probablemente, por el error empírico asociado al proceso no automatizado. Sin embargo, se observa un incremento en la capacidad del filtro con el aumento de la presión alcanzándose un valor en el orden de los 630 kg/m²h.

En líneas generales, para el rango de presiones y tiempos estudiados, la capacidad de filtración se encuentra entre los 550 y los 630 kg/m²h aproximadamente, con un valor medio de 588 kg/m²h y un desvío de 33 kg/m²h. La variabilidad de este parámetro se encuentra en el entorno del 6 % para todos los ensayos realizados.

Por otro lado, el contenido de líquido retenido se encuentra muy próximo al 7%, siendo este valor admisible para este tipo de muestras mineralógicas.

CONCLUSIONES

La muestra utilizada en este estudio, se corresponde con las generalidades esperadas para un concentrado de cobre obtenido por proceso de flotación espumante.

A partir de los ensayos realizados en diferentes condiciones de bombeo, se pudo observar que la presión y el tiempo en los que se realiza esta etapa poseen una influencia marcada en la capacidad de filtración. A medida que se incrementan ambas variables de entrada, la filtración es más rápida, aumentando la cantidad de sólidos retenidos en la cámara. Como consecuencia de esto, la capacidad del proceso se incrementa.

Sin embargo, el máximo valor de la capacidad de filtración se da a una presión inferior a la máxima posible de operación y a un tiempo intermedio. Esto se debe a que la capacidad de filtración llegaría a un máximo, a causa del aumento de la resistencia al flujo ofrecida por la torta en crecimiento y por el espacio limitado dentro de la cámara.

La humedad retenida por el sólido se vio afectada levemente, por las condiciones de operación durante la etapa de bombeo.

Para presiones de bombeo superiores a los 4,5 bar y tiempos de operación por encima de los 40 segundos, se optimizarían los valores de la humedad de la torta. En este sentido, el contenido de líquido retenido fue del orden del 7%, siendo este valor admisible para este tipo de muestras mineralógicas.

REFERENCIAS

Arnaudo, F., Celeda, A. M., de Celis, J. & Correa, A. F. (2018). Determinación confiable de la humedad y la altura de tortas de filtración mediante mediciones según un diseño NOHLC, Congreso Latinoamericano de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, San Rafael, Mendoza, Argentina, p. 194.

Ballester, A.; Verdeja, L.F.; Sancho, J.: (2000). Metalurgia extractiva: Volumen I y II, Editorial Síntesis, S. A. (Madrid, 2000). Vol. I de 507 pags. y Vol. II de 428 pags. ISBN: 84-7738-804-0.

Beregovski, V. y Kistiakovski, B. (1972). La metalurgia del cobre y del níquel. Editorial MIR.

Concha, F. (2001). Manual de filtración & separación. Universidad de Concepción, Departamento de Ingeniería Metalúrgica.

Townsend, I. (2003). Automatic pressure filtration in mining and metallurgy. Minerals engineering, 16(2), 165-173.