

Filtración de sulfuros metálicos: influencia de las variables experimentales en la calidad de los efluentes de la planta de filtrado.

Metallic sulphides filtration: influence of experimental variables on effluent quality in filtration plant.

Facundo E. Arnaudo¹, Ana María Celeda¹, Jorge P. de Celis^{2,3}.

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

2. Laboratorio de Química de Sistemas Heterogéneos (LaQuiSiHe). Dto. de Química. Facultad de Ingeniería. UBA. Av. Paseo Colón 850. CABA. Argentina.

3. Laboratorio de Investigación y Desarrollo en Ingeniería Química, (LIDIQ). Dto. Ingeniería Química, Facultad Regional Avellaneda. UTN. Ramón Franco 5050 (1874). Villa Dominico. Pcia. de Buenos Aires. facundo.arnaudo@segemar.gov.ar

Resumen

El estudio en planta piloto de la recuperación de sulfuros metálicos por separación sólido-líquido, de suspensiones concentradas, es de interés para el diseño de procesos de bajo impacto ambiental en la industria minera. En ese sentido, en este trabajo, se ensayaron diferentes paños textiles con permeabilidades de 0,2; 2,6; 5 y 14 m³/m²min en procesos de filtración realizados a presiones de bombeo de 3 y 5 bar. El análisis de los resultados obtenidos en los ensayos realizados, muestran la posibilidad de mejorar la calidad del efluente de una planta de filtración de concentrados y paralelamente optimizar la capacidad de filtración. Mediante la selección de un textil con características adecuadas, se puede disminuir la cantidad y calidad de sólidos en el filtrado y de esta manera facilitar los procesos en la planta de tratamiento de efluentes. Los ensayos realizados mostraron además que, la presión utilizada en el bombeo para el llenado de la cámara de filtración, influye tanto en la capacidad de filtración como en la conformación estructural de los sólidos en la torta. Esto permitiría regular los efectos de las posteriores etapas de expresión por presión y secado adicional por arrastre con aire que afectaría la humedad final de la torta.

Palabras clave: Filtración, Sulfuros metálicos, Medios filtrantes.

Abstract

A pilot plant study of the recovery of metallic sulfides by solid-liquid separation, of concentrated suspensions, is of interest for the design of low environmental impact processes in the mining industry. In this sense, in this work, different textile cloths with 0,2; 2,6; 5 and 14 m³/m²min permeability were tested in filtration processes carried out at pumping pressures of 3 and 5 bar. The analysis of the results obtained in the tests performed shows the possibility of improving the effluent quality in a concentrate filtration plant and, at the same time, optimizing the filtration capacity. By selecting a textile with suitable characteristics, the quantity and quality of solids in the filtrate can be reduced and in this way improve the performance of the effluent treatment plant. The tests carried out also showed that the pressure used during the pumping for the filling of the filter chamber influences both the filtering capacity and the structural conformation of the solids in the cake. This would allow regulating the effects of the later stages of expression by pressure and additional drying by air flow that would affect the final moisture of the cake.

Keywords: Filtration, Metallic sulfides, Filter media.

1. Introducción.

La extracción de minerales metalíferos se organiza en dos tipos de estructura industrial:

- la estructura integrada, donde el concentrado del mineral portador del metal obtenido en la planta de tratamiento, se trata hidro o pirometalúrgicamente

para entregar al mercado un metal con el grado de pureza requerido.

-la estructura netamente extractiva cuyo objetivo es la obtención y venta de concentrados a otras empresas, que producen los metales, generalmente situadas en otros países en otros continentes: principalmente Europa y Asia.

En muchas operaciones mineras, los concentrados minerales se transportan a través de mineraloductos, que llevan los concentrados por cientos de kilómetros hasta los sitios de embarque. La suspensión del mineral fluye por el interior del ducto, tanto por el efecto de la gravedad como por la acción impulsora generada en estaciones de bombeo durante el trayecto.

Entre los ejemplos de transporte de concentrados minerales por mineraloductos, se pueden mencionar los proyectos: Ambatovy (níquel) en Madagascar, Samarco (hierro) en Brasil, Antamina (cobre y zinc) en Perú, Collahuasi (cobre) en Chile y Valentines (hierro) en Uruguay.

Cuando la suspensión mineral llega a destino, el concentrado debe ser recuperado por desaguado en plantas de filtrado donde se obtiene un sólido húmedo y un filtrado líquido. El sólido debe presentar una humedad óptima para su transporte, estimada en un rango entre el 7 y el 10%. Un mayor contenido de humedad incrementaría el costo del flete y un menor contenido de la misma podría provocar el desprendimiento de polvos y por ende, contaminación atmosférica. El filtrado que se obtiene podría tener mayor o menor contenido de partículas del sólido, dependiendo del sistema de separación elegido.

Habitualmente, la filtración de concentrados de minerales de sulfuros y óxidos metálicos se realiza mediante filtros que trabajan por presión: filtros prensa o filtros por presión de banda horizontal. La optimización del diseño pasa por maximizar la capacidad de filtración (expresada en $\text{kg}/\text{m}^2\text{h}$) siempre y cuando, la humedad de la torta obtenida se encuentre en el rango óptimo para el transporte. En esa línea, se impone el uso de medios filtrantes de mayor permeabilidad, operando a presiones de bombeo más elevadas. En general, se resta importancia a la cantidad de sólidos contenidos en el filtrado que, en comparación con el porcentaje de sólidos que llega a la planta, es muy bajo.

En el proyecto Valentines, se proyecta bombear el filtrado de regreso a la planta por el mismo mineraloducto. Sin embargo, en la mayoría de las plantas de filtrado se cuenta con un proceso para el tratamiento de efluentes, previo a su disposición, con el fin de cumplir con los parámetros de vertido fijados para cursos de agua y regulados por la legislación correspondiente. El tratamiento a implementar puede ser más o menos complicado, dependiendo de cuantos sólidos no se retienen en el proceso de filtrado por efecto conjunto de la granulometría de los mismos, las presiones y la permeabilidad de los medios filtrantes usados. Más aún si las partículas contenidas en el filtrado son sulfuros (de cobre, zinc, hierro etc) ya que, por

oxidación dichas partículas pueden generar aniones SO_4^{2-} e incrementar la acidez.

Alternativas como el proceso de osmosis inversa, ultrafiltración o la precipitación química de sulfatos insolubles (que también deben ser separados por filtración), son opciones con costo operativo e inversiones importantes que se destinan a una etapa no productiva. Por lo tanto, resulta relevante minimizar el contenido de sólidos en el filtrado para prescindir de las operaciones de separación ya mencionadas.

Las partículas sólidas que llegan al filtrado, son aquellas que logran atravesar el medio filtrante. El mismo se trata de un paño textil que actúa como sostén para la conformación de la torta de filtrado, durante el inicio de la etapa de bombeo. Este material ofrece mayor o menor resistencia al pasaje de los sólidos según sea la calidad y disposición de los hilos de fabricación durante el tejido del mismo. Entre las características más significativas de los medios filtrantes se puede mencionar la permeabilidad de la tela y la distribución del tamaño de poros, que permiten determinar el rendimiento del material elegido.

En este contexto, el objetivo de este trabajo es ensayar paños textiles con distintas características en el proceso de separación sólido-líquido de un concentrado de sulfuro de cobre. La finalidad perseguida es la reducción del contenido de sólidos en los efluentes de la planta de filtración y al mismo tiempo mantener el rendimiento de la separación en términos de la capacidad de filtración (expresada como $\text{kg}/\text{m}^2\text{h}$) y el porcentaje de humedad de la torta (humedad de transporte). Además, se evalúa el efecto que, sobre la calidad del efluente, tiene la presión de bombeo durante el llenado del filtro.

2. Materiales y métodos.

2.1. 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. 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 Radwag 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 $2\theta = 5^\circ$ y 70° con una relación paso/tiempo de $0,03^\circ/2s$. 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.

2.2. Características de los medios filtrantes ensayados:

Para los ensayos de filtración se emplearon telas filtrantes fabricadas por Tamfelt Oy. El material de los textiles utilizados en este trabajo es Poliéster (PES). La identificación y las características generales de los tejidos seleccionados, provista por el fabricante, se incluyen en la Tabla 1.

En todos los casos se trata de telas tejidas que se producen al entrelazar hilos de urdimbre (que se extienden y mantienen a una distancia prefijada entre ellos, a lo largo de toda la tela) e hilos de trama

(o relleno) que se entrecruzan con los anteriores todo a lo ancho del tejido. El tratamiento de termofijación, común a todas las telas, consiste en calentar el textil durante un tiempo prefijado; esto hace que los hilos reduzcan tensiones preexistentes llegando así, a un estado de equilibrio, mejorando la resistencia estructural de la tela y aumentando la permeabilidad, ya que al relajar las tensiones de los hilos se aumenta el tamaño de los poros (Naik & Gacén, 1985).

Tabla 1. Características defabricación de las telas seleccionadas para los ensayos de filtración.

| Identificación del fabricante | Características: del tejido, de hilos de urdimbre y trama |
|-------------------------------|---|
| 2206-L1-K4 | Tejida, termofijada, doble calandrado en ambos lados, Multifilamento/multifilamento |
| 2209-L1 | Tejida, termofijada Multifilamento/multifilamento |
| 2204-L1-K3 | Tejida, termofijada, calandrado en ambos lados Monofilamento/multifilamento |
| 2204-L1 | Tejida, termofijada, Monofilamento/multifilamento |

El calandrado es un tratamiento que se realizasolo en algunas telas. Este consiste en hace pasar el textil por rodillos calientes que presionan ambas caras de la tela. El tratamiento le da un acabado superficial plano que modifica la distribución de los hilos aumentando la superficie que estos cubren y como consecuencia disminuye el tamaño de las aberturas de la trama de la tela.

En la Figura 1 se incluyen los esquemas de los diferentes tipos de tejido, que comúnmente se usan en los textiles empleados en procesos de filtración.

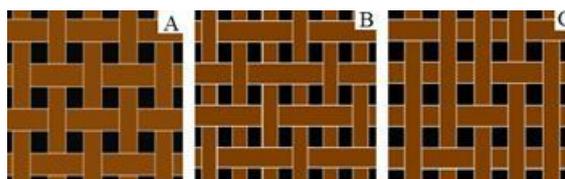


Figura 1. Tejidos: (A) tafetán (B) sarga (C) raso.

En el tejido tipo tafetán (A), cada hilo de la urdimbre se entrelaza con un hilo de la trama. El tejido tipo sarga (B), se caracteriza por el entrelazado de dos hilos de la urdimbre con un hilo de la trama en filas alternas. El tejido tipo raso (C), se caracteriza por una superficie suave y lisa que se logra pasando los hilos de la urdimbre encima de unos cuantos hilos de la trama, con un entrelazado mínimo. Estos factores determinan como son los poros de las telas, el área transversal de cada poro, el grosor de la tela y la cantidad de poros por unidad de área (Epps & Leonas, 1997). En general, la permeabilidad y la porosidad están fuertemente relacionadas entre sí. Si una tela tiene una porosidad muy alta, se puede

suponer que es permeable. Ogulata (2006) y Ventosilla (2014) modelan matemáticamente el bloqueo mecánico que pueden sufrir los poros de un textil teniendo en cuenta el tamaño de los hilos, su torsión y el tipo de estructura de los hilos.

Por último, las telas filtrantes nuevas, antes de ser usadas, fueron fotografiadas empleando un microscopio óptico Laica modelo DM2500P con una cámara incorporada Laica modelo DF295.

2.3. 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 Larox PF 0,1. El principio de funcionamiento es el de filtración por presión y en la Figura 2 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.

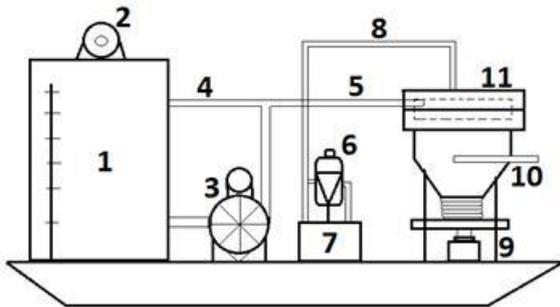


Figura 2. Esquema general del equipo y ubicación de sus componentes principales.

El equipo está provisto de una cámara de filtrado horizontal con una superficie de $0,1\text{m}^2$ (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).

Debido a que la muestra sedimenta durante el almacenamiento, la suspensión es homogeneizada mediante agitación mecánica con un agitador Baldor VL3501 de doble paleta. Luego de dispersar la totalidad de los sedimentos consolidados, se trasvasó el volumen necesario para los ensayos, al tanque del equipo (1). 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. Previo 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 empíricos utilizando los textiles cuyas características se resumieron en la Tabla 1, operando el sistema de filtración a dos presiones de bombeo diferentes 3 bar y 5 bar, respectivamente.

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

1) *Etapas de bombeo a presión constante:* la suspensión ingresa a la cámara de filtración, por la sección (A) (Figura 3). Durante los primeros instantes, la tela filtrante retiene sólidos y se convierte en la única resistencia, dejando pasar un caudal elevado de líquido que egresa de la cámara por la sección (B), arrastrando una mayor o menor cantidad de sólidos, dependiendo del tamaño de las partículas, de la presión de bombeo y de las propias características del textil empleado. A medida que el proceso transcurre, se empieza a conformar la torta. La misma permite que el líquido pase transformándose en la mayor resistencia al flujo, ya que va creciendo gracias a los sólidos que retiene en su volumen. Al mantenerse la presión de bombeo constante, el caudal del filtrado disminuye.



Figura3. Etapas de bombeo.

Luego del bombeo a presión constante, existe un período de “tiempo muerto” hasta el inicio de la etapa siguiente durante el cual, se produce la adecuación de los sistemas mecánicos del filtro para poder iniciar el prensado por diafragma. Mientras tanto, el líquido filtrado continúa permeando por efecto de la presión residual existente en la cámara. Esta presión va cayendo en la medida que la cámara se va vaciando. Al finalizar la etapa de bombeo dentro de la cámara ya existe una torta y sobre ésta queda parte de la suspensión que aún no fue filtrada.

2) *Etapas de desaguado de la torta mediante prensado por diafragma:* la cámara de filtrado posee en la parte superior un diafragma elástico móvil. El mismo desciende empujado por el agua que se bombea y que ingresa por la sección (C) (Figura 4). El descenso del diafragma comprime la suspensión,

que aún no fue filtrada, forzando al líquido a través de la torta. Este sistema exprime la torta, logrando extraer la mayor cantidad de líquido filtrado, que sale por la sección (B).

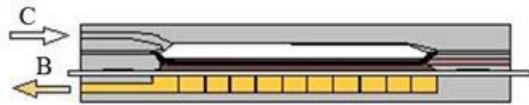


Figura 4. Etapa de prensado.

3) *Etapa de secado*: consiste en hacer circular aire a presión constante a través de la torta, para eliminar así, la mayor cantidad de líquido remanente que no pudo ser separado en las etapas anteriores (Figura 5). El aire ingresa por la sección (A), atraviesa la torta y el material filtrante, saliendo por la sección (B) con el filtrado remanente.

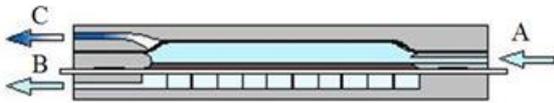


Figura 5. Etapa de secado.

En todos los ensayos se mantuvieron: los mismos tiempos de bombeo, de prensado por diafragma y de secado por aire. Además, se aplicó la misma presión de prensado por diafragma, como así también, se empleó el mismo caudal de aire de secado. En la Tabla 2 se detallan las condiciones utilizadas en los ensayos realizados empleando distintos materiales filtrantes.

Tabla 2. Condiciones experimentales generales empleadas en los test de filtración.

| | |
|---|-----------------|
| Presión bombeo: llenado cámara (bar) | 3 y 5 |
| Tiempo bombeo material a cámara (s) | 15 |
| Colección de filtrado durante llenado | 4 x 400ml c/u |
| Presión de prensado (bar) | 15 |
| Tiempo de prensado (s) | 120 |
| Tiempo de secado (s) | 90 |
| Caudal aire de secado (l/min) | 100 |
| Puntos para toma de humedad y altura | 5 |
| Permeabilidad telas $-\delta p-$ (m^3/m^2min) | 0,2; 2,6; 5; 14 |

Luego de finalizada la etapa de secado por aire, la cámara de filtración se despresurizó, se abrió y se retiró la tela con la torta que se formó sobre ella. Se determinó la masa de la torta por pesada en balanza granataria.

Se registraron las características y el volumen del líquido filtrado que se obtiene en el proceso, ya que éste se convierte en el efluente de la planta de filtración.

Antes de iniciar otro ensayo con la misma tela, fue necesario lavarla manualmente para mantener su eficiencia en los distintos ciclos de filtrado.

2.4. Caracterización de la torta obtenida:

A cada torta obtenida, en los ensayos con diferentes telas filtrantes, se le determinó el contenido de agua en su volumen (humedad) y la altura correspondiente. Para la determinación de la humedad se tomaron cinco puntos elegidos al azar, basados en un estudio estadístico del perfil de humedades en la torta, para asegurar la reproducibilidad de la medición. La altura de la torta se midió con un calibre, en los mismos sitios donde se extrajeron las muestras para la determinación de la humedad.

2.5. Caracterización del filtrado obtenido:

Para evaluar la influencia de la permeabilidad de las distintas telas, sobre la cantidad y calidad de los sólidos que se pierden durante el “tiempo de filtrado sucio”, en cada ensayo realizado, el líquido obtenido durante la etapa de bombeo, se recogió en fracciones de aproximadamente 400 ml en distintas probetas. A todas las fracciones de filtrado obtenido se le evaluó la turbidez en NTU (Nephelometric Turbidity Unit), empleando un turbidímetro LA MOTTE modelo TC-3000.

Se registró además, el volumen de filtrado obtenido en las otras etapas del proceso de filtración. Finalmente, en cada ensayo, se juntan los filtrados de las tres etapas en un único volumen sobre el cual se separa la fase sólida. Se pesó la masa de la totalidad de los sólidos recuperados y se determinó su distribución de tamaño de partículas.

3. Resultados y Discusión.

3.1. Caracterización de la suspensión modelo empleada en los ensayos de filtración:

En la Tabla 3 se resumen los valores obtenidos en los ensayos de caracterización realizados a la suspensión de partida, a los sólidos que contiene y al líquido que la compone.

Tabla 3. 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) | $4,2892 \pm 0,0070$ |

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 4 se detallan los componentes minerales mayoritarios, minoritarios y accesorios que

conforman los sólidos de la suspensión modelo y en la Tabla 5 se incluyen los resultados del análisis químico elemental de los mismos.

Tabla 4. 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 5. 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 | Ppc (100°C) | 16,70 |
| PbO | 0,24 | | |

Estos resultados muestran que el concentrado de sulfuros metálicos contiene como especie portadora de cobre a la calcopirita (CuFeS₂), que 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). 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.

El tamaño de las partículas sólidas tiene una influencia significativa en el proceso de la conformación de la torta y su disposición en la estructura del material filtrante. En consecuencia, se estudió la distribución granulométrica del sólido, obtenida por tamizado en húmedo. Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 6.

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

| Tamaño de Partículas [μm] | Porcentaje en peso |
|---------------------------|--------------------|
| > 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 7. En la misma, se exhibe 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 7. Análisis granulométrico de la fracción de sólidos con tamaños inferiores a los 45μm.

| Tamaño (μm) | % m/m referido a la fracción <45μm | % 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% |

3.2 Características de los medios filtrantes ensayados:

En la Tabla 8 se muestran las propiedades operativas de los medios filtrantes ensayados, incluidas en los catálogos del fabricante donde se informan los valores de permeabilidad presentada por la tela al paso de una corriente de aire, las características del filtrado de suspensiones modelo y la resistencia que ofrece al taponamiento.

Tabla8. Propiedades operativas de las telas seleccionadas.

| Identificación Tela | Permeabilidad al aire (δ _p) (m ³ /m ² min) | Claridad del filtrado | Resistencia al taponamiento |
|---------------------|--|-----------------------|-----------------------------|
| 2206-L1-K4 | 0,2 | excelente | normal |
| 2209-L1 | 2,6 | excelente | pobre |
| 2204-L1-K3 | 5 | normal | excelente |
| 2204-L1 | 14 | pobre | excelente |

Las fotografías tomadas a los textiles nuevos utilizados en los ensayos empíricos se presentan en

las Figuras 6 (2206-L1-K4), 7 (2209-L1), 8 (2204-L1-K3) y 9 (2204-L1).



Figura 6. Tela 2206-L1-K4, $\delta_p=0,2 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{min.}$



Figura 7. Tela 2209-L1, $\delta_p=2,6 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{min.}$

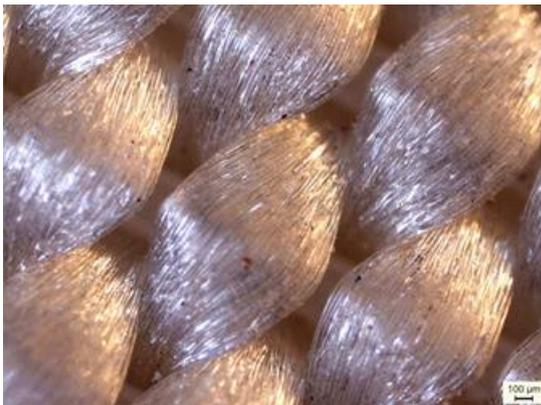


Figura 8. Tela 2204-L1-K3, $\delta_p=5\text{m}^3/\text{m}^2\text{min.}$

Las telas menos permeables poseen hilos de urdimbre multifilamento (hilos verticales). Esto se observa con mayor claridad en la tela de permeabilidad 2,6 (Figura 7). En la tela de permeabilidad 0,2 (Figura 6), no se llega a apreciar el hilo de urdimbre ya que por su acabado, los hilos horizontales lo encapsulan de manera más cerrada. En cambio, en las telas de mayor permeabilidad

(Figuras 8 y 9) se pueden apreciar claramente hilos de urdimbre monofilamento.



Figura 9. Tela 2204-L1, $\delta_p=14\text{m}^3/\text{m}^2\text{min.}$

En todos los casos, las telas son de tejido tipo tafetán, los hilos de la trama (hilos horizontales) son multifilamento pero, comparativamente, en la tela 2206-L1-K4 estos hilos parecen contener más filamentos que en los otros textiles y se puede observar el efecto del doble calandrado que “aplata” a los multifilamentos de los hilos de la trama en la parte central, justo por encima del hilo de urdimbre. Este efecto se observa también, aunque en menor medida, en los hilos de la tela 2204-L1-K3, que solamente sufrió un proceso de calandrado.

Las telas que tienen un hilo de urdimbre monofilamento presentan poros más definidos, independientemente de que hayan tenido tratamiento de calandrado (2204-L1-K3) o no (2204-L1). Sin embargo, cuando este hilo es multifilamento (para las permeabilidades más bajas), éste parece “deformarse” durante el tejido de la trama. Esto pareciera tener como consecuencia la formación de poros menos definidos. Posiblemente, esta situación podría ser la razón de una mejor retención de sólidos y mayor claridad en los líquidos filtrados (Tabla 8).

No obstante, es importante señalar que en cuanto a la resistencia al taponamiento y la claridad del filtrado líquido obtenido influye, además, la distribución del tamaño de las partículas presentes en la suspensión.

También, hay que tener en cuenta que el bloqueo mecánico de los poros por las partículas atrapadas conocido como Blinding o Taponamiento ocurre paralelamente a la formación de la torta de sólido.

3.3. Resultados de los ensayos de filtración realizados y caracterización de la torta obtenida:

En la Figura 10 se observan los resultados experimentales mediante la representación del

volumen colectado (ml) en función del tiempo (segundos), cuando la presión de bombeo fue de 3 bar. Los valores graficados corresponden al tiempo demandado en la etapa de bombeo (15 s), incluyendo el tiempo de maniobras mecánicas (tiempo muerto), entre el fin del bombeo y el inicio de la etapa del prensado, donde continúa permeando el filtrado líquido.

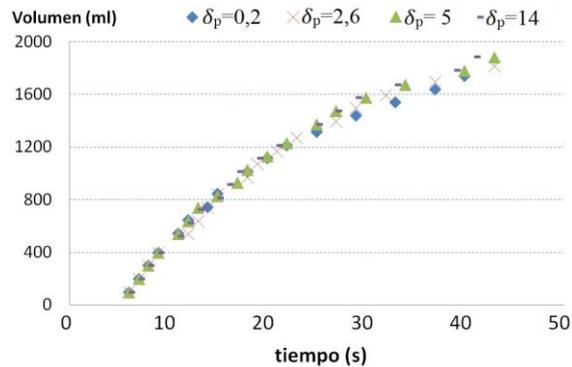


Figura 10. Volumen de filtrado en función del tiempo total de operación para ensayos a 3 bar.

Se puede apreciar que en los primeros 15 segundos donde la bomba está alimentando suspensión a la cámara de filtrado, el caudal (ml/s) se mantiene prácticamente constante. Una vez finalizado el bombeo, durante el tiempo de maniobras mecánicas, el líquido continúa filtrando desde la cámara presurizada pero con un caudal que decrece con el tiempo; esto se debe a que la diferencia de presión entre el interior y el exterior de la cámara va disminuyendo a medida que el líquido desaloja la misma. A esta presión de bombeo no se evidencian diferencias significativas en los resultados obtenidos para las distintas telas empleadas.

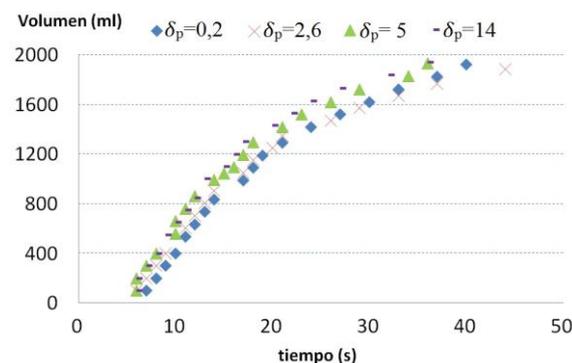


Figura 11. Volumen de filtrado en función del tiempo total de operación para ensayos a 5 bar.

Al aumentar la presión de bombeo a 5 bar (Figura 11), se mantiene la tendencia anteriormente mencionada. Sin embargo, se puede apreciar una diferencia entre los volúmenes recolectados para cada tela, donde a mayor permeabilidad, mayor es el caudal de líquido filtrado. En todo proceso de filtración de sulfuros metálicos es necesario

maximizar la capacidad del filtro (expresada en $\text{kg}/\text{m}^2\text{h}$) manteniendo niveles de humedad aptos para el transporte de sólidos. En la Figura 12 se representa la capacidad de filtración en función de la permeabilidad de la tela filtrante, para ambas presiones de bombeo.

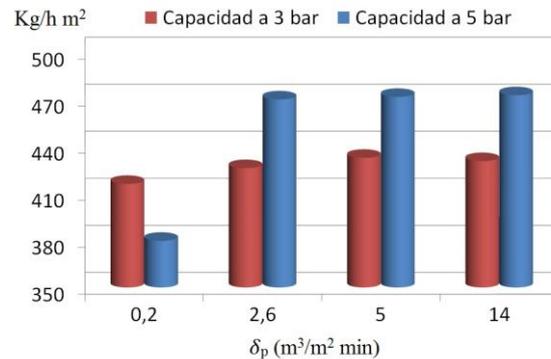


Figura 12. Capacidad de la filtración en función de la permeabilidad de la tela utilizada en la filtración.

En general, la capacidad de filtración se incrementa con el aumento de la presión de bombeo ya que, tal como se vio en las Figuras 10 y 11, inicialmente ingresa una mayor cantidad de suspensión en la cámara y por lo tanto, mayor cantidad de sólidos.

Para telas con permeabilidades entre 2,6 y 14 $\text{m}^3/\text{m}^2\text{min}$ puede decirse que el aumento de la presión de 3 a 5 bar durante el bombeo de suspensión a la cámara, modifica la capacidad de filtrado en casi 10% en peso de sólido seco. El aumento de la capacidad de filtración con el aumento de la permeabilidad es aproximadamente entre el 1 a 1,5% cuando el proceso de bombeo se realizó a 3 bar. En cambio, cuando se opera a 5 bar el incremento solo fue del 0,5%. Los resultados demuestran que, muchas veces, el aumento de la permeabilidad de la tela para una misma presión de bombeo, no se traduce en un incremento notorio de la capacidad de filtración.

A diferencia de las otras tres telas, para la de permeabilidad 0,2 $\text{m}^3/\text{m}^2\text{min}$, en las Figuras 10 y 11 se ve que el aumento de la presión de bombeo disminuye el caudal de filtración. Por lo tanto, en la Figura 12 se observa la disminución de la capacidad de filtración.

En la Figura 13 se representa la humedad porcentual de la torta en función de la permeabilidad de la tela filtrante, para ambas presiones de bombeo.

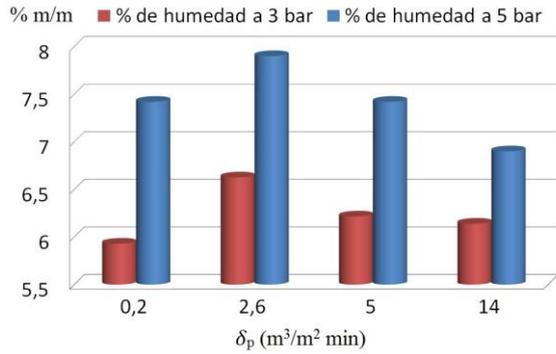


Figura 13. Humedad de la torta en función de la permeabilidad de la tela utilizada en la filtración.

La humedad remanente en la torta, para todas las telas ensayadas, se encuentran en el rango de 7 y 8%, cuando la presión de bombeo utilizada es de 5 bar. Estos valores son muy aptos para el transporte a granel del sólido, optimizando el costo del mismo y minimizando las pérdidas por emisión de partículas a la atmósfera.

Si recordamos que en todos los ensayos se mantienen iguales las condiciones del prensado y secado por aire se observa que, cuando la presión de bombeo es de 3 bar, para todas las telas se lograron humedades inferiores al 7 %; y los valores, siempre estuvieron por debajo de los obtenidos cuando se opera a 5 bar.

La mayor humedad registrada corresponde a la tela de permeabilidad $2,6 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ min}$, operando a ambas presiones de bombeo. El mayor incremento porcentual en la humedad, al aumentar la presión de bombeo, se obtiene con la tela de permeabilidad $0,2 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ min}$. Este comportamiento se podría explicar a través del fenómeno denominado Blinding, anteriormente mencionado, por el cual, las partículas con una granulometría específica se alojan en los poros tapando pasajes críticos del medio filtrante (Wei-Ming Lu, et. al; 1996), esto causa el aumento de la resistencia al flujo y disminuye la eficiencia del desagüe en las etapas de prensado y secado. Luego, la presencia de partículas con un tamaño “adecuado” en la distribución granulométrica de los sólidos hace que el fenómeno se produzca sobre la tela de $2,6 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ min}$ independientemente del aumento de la presión y en la tela de permeabilidad $0,2 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ min}$ solo cuando el aumento de la presión “fuerza” la intrusión de las partículas en el medio filtrante.

Teniendo en cuenta la altura de la torta húmeda que se obtuvo en cada ensayo y la humedad determinada en cada una de ellas, en las Figuras 14 y 15 se grafica la conformación porcentual del volumen de las tortas obtenidas con distintas telas filtrantes, para presiones de bombeo de 3 y 5 bar, respectivamente.

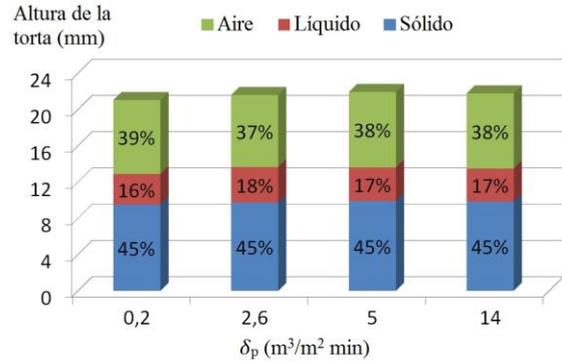


Figura 14. Conformación de la torta para la altura obtenida en función de la permeabilidad a 3 bar.

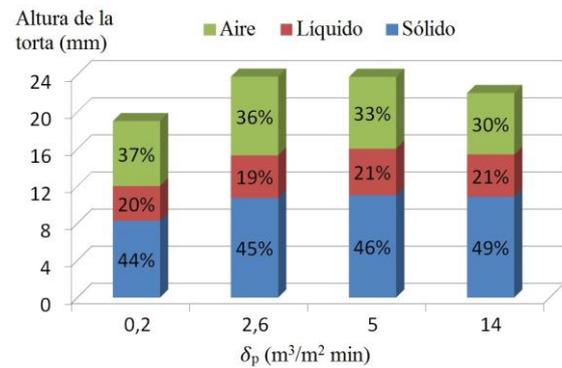


Figura 15. Conformación de la torta para la altura obtenida en función de la permeabilidad a 5 bar.

Como las condiciones de las etapas de prensado y secado por aire son iguales en todos los ensayos, la variación de la conformación volumétrica de las tortas debe estar relacionada con la estructuración inicial que adquieren los sólidos en la torta inicial que se forma en la cámara en la etapa de bombeo. Parecería ser que el proceso de bombeo a menor presión logra mantener una estructuración de los sólidos que no es influida por el cambio en la permeabilidad de la tela haciendo que, la conformación volumétrica porcentual final de la torta se mantenga prácticamente igual e independiente de la altura de la torta (cantidad de material que entro en la cámara), tal como se aprecia en la Figura 14. Al aumentar la presión de bombeo la estructuración del sólido en la conformación de la torta inicial estaría influenciada por la permeabilidad de la tela y esto, provoca cambios en la conformación volumétrica porcentual final de la torta (Figura 15).

Estos resultados indican que, en la conformación de la torta durante la etapa de bombeo a 3 bar de presión, los sólidos forman una estructura más permeable que permite una mejor evacuación del líquido durante las etapas posteriores del prensado por el diafragma y del secado por aire, por ello, para todas las telas, la humedad de las tortas es menor a menor presión de bombeo.

2.4 Caracterización del filtrado obtenido en los ensayos:

En las Figuras 16 y 17 se muestra la variación de la turbidez (NTU) en las distintas fracciones de filtrado, recogidas sucesivamente en 3 probetas durante el inicio de la etapa de bombeo, para los ensayos realizados para cada material filtrante.

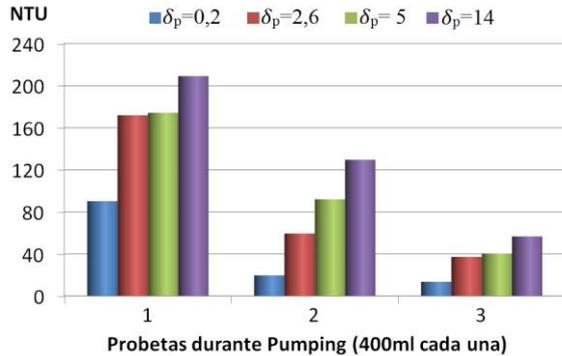


Figura 16. NTU vs. Volumen parcial recolectado para cada tela usada a la presión de bombeo de 3bar.

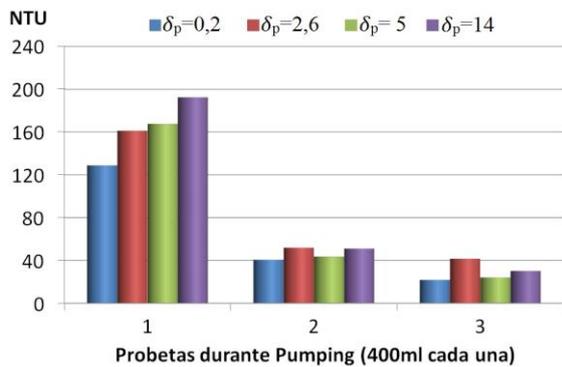


Figura 17. NTU vs. Volumen parcial recolectado para cada tela usada a la presión de bombeo de 5 bar.

Puede apreciarse que, cualquiera sea la permeabilidad de la tela y la presión usada, en la medida que avanza la entrada de material a la cámara del equipo, menor es la cantidad de sólidos que llega al filtrado. Esto se debe a la resistencia al pasaje que le ofrece la torta que se va conformando sobre el medio filtrante.

La concentración de sólidos de los filtrados totales (expresada en ppm) obtenidos en cada ensayo, usando telas de distinta permeabilidad y para ambas presiones de bombeo, se presentan comparativamente en la Figura 18.

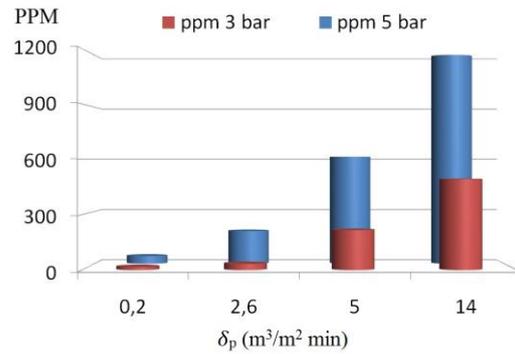


Figura 18. Contenido de sólidos en el filtrado vs. la permeabilidad de tela para ambas presiones de bombeo.

Se observa que a mayor permeabilidad de la tela, más elevada es la cantidad de sólidos que se obtienen en el filtrado total, para ambas presiones de bombeo, aunque la diferencia es superior para la tela con $14 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{min}$ de permeabilidad.

Analizando en conjunto la información suministrada en las Figuras 16, 17 y 18, se puede decir que, para todas las permeabilidades y presiones de trabajo, los primeros segundos siempre se consideran de filtrado "sucio". Luego, dependiendo de la tela y la presión de bombeo, la torta tendrá mayor o menor capacidad de mantener un filtrado limpio en las etapas sucesivas. Para la tela de mayor permeabilidad, el uso de una presión de bombeo más elevada, genera una estructura de torta con baja capacidad para mantener un filtrado limpio en etapas posteriores al bombeo. Esto produciría un filtrado total con una mayor concentración de sólidos.

Con la finalidad de profundizar el análisis de las características de los sólidos, presentes en el filtrado, se procedió a estudiar las curvas de distribución granulométrica de los mismos para las telas de permeabilidad mayor (5 y $14 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{min}$), por ser las que mostraron un contenido más elevado de sólidos. Los resultados obtenidos sobre el total de los filtrados y para ambas presiones de bombeo se muestran en las Figuras 19 y 20, respectivamente.

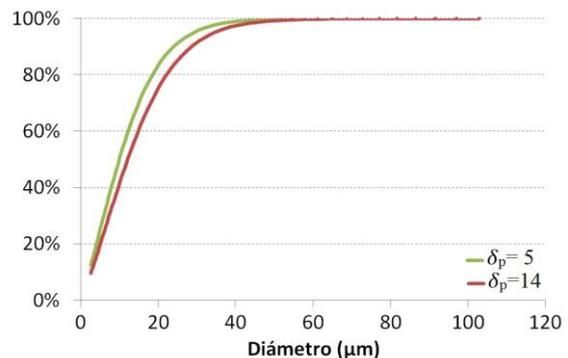


Figura 19. Distribución granulométrica de los sólidos en el filtrado a 3 bar.

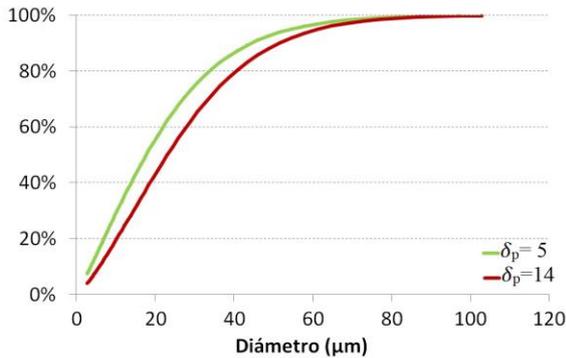


Figura 20. Distribución granulométrica de los sólidos en el filtrado a 5 bar.

Se observa que, trabajando a menor presión e independientemente de la permeabilidad de la tela, los sólidos que se obtienen son más finos (D80 entre 17 y 22 μm para presión de bombeo de 3 bar y D80 entre 33 y 40 μm para presión de bombeo de 5 bar).

Las curvas de distribución poblacional de los sólidos presentes en el filtrado, para las telas de mayor permeabilidad y para ambas presiones, se exhiben en las Figuras 21 y 22.

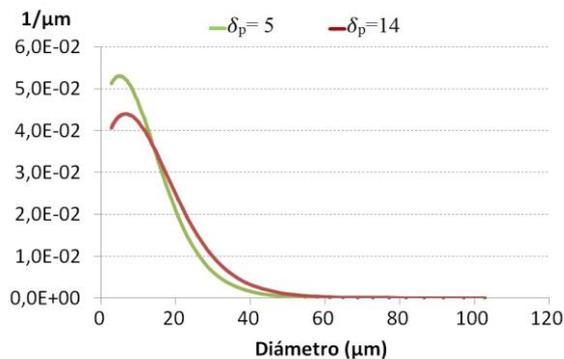


Figura 21. Probabilidad poblacional de los sólidos en el filtrado a 3 bar.

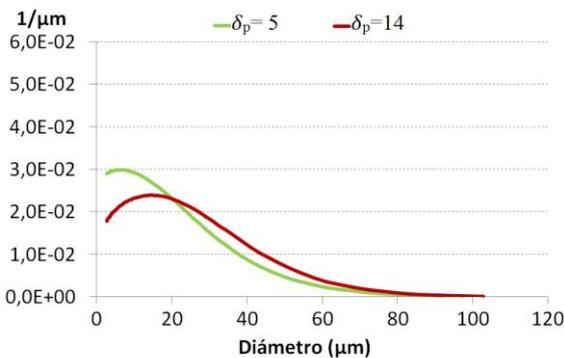


Figura 22. Probabilidad poblacional de los sólidos en el filtrado a 5 bar.

Las curvas de distribución poblacional muestran que los máximos se conservan por debajo de los 7 μm

para ambas telas, trabajando a baja presión, mientras que, al aumentar la presión, para la tela de mayor permeabilidad, la mayor cantidad de partículas se encuentran en el entorno de los 15 μm .

Es decir que el aumento de la presión favorece principalmente, el pasaje de partículas más gruesas a través de ambas telas, en el inicio de la filtración. En la Figura 22 se observa como aumenta la probabilidad de obtener partículas más gruesas en el filtrado y, en particular, para la tela de mayor permeabilidad.

Este análisis estaría de acuerdo con las características de los poros que pueden verse en las imágenes de los textiles en cuestión (Figuras 8 y 9), donde es importante el hecho de tratarse de una urdimbre monofilamento en ambos casos. La falta de tratamiento de calandrado para la tela de $14\text{m}^3/\text{m}^2\text{min}$ de permeabilidad, deja un poro más accesible a que partículas de mayor tamaño puedan atravesarla, fundamentalmente cuando son forzadas por una mayor presión de bombeo. El efecto de "achicamiento" de poros que se produce en la tela de $5\text{m}^3/\text{m}^2\text{min}$ de permeabilidad durante el calandrado restringiría el pasaje de partículas más gruesas independientemente del aumento de presión.

4. Conclusiones.

La caracterización de la suspensión de partida muestra que el componente mayoritario es la calcopirita, siendo el cobre el metal más abundante. La fracción de partículas menores a 45 μm es marcadamente predominante en las muestras de sólidos ensayadas.

Las telas de menor permeabilidad presentan poros menos definidos que aquellas de mayor permeabilidad; este factor podría incidir en la mejor retención de sólidos y el menor contenido de partículas en el filtrado observado para ambas presiones de trabajo.

La capacidad de filtración se incrementa con el aumento de presión para las telas con permeabilidad 2,6; 5 y 14 $\text{m}^3/\text{m}^2\text{min}$, ya que se verificó el ingreso de una mayor cantidad de suspensión a la cámara. Un comportamiento inverso se observa para la tela de permeabilidad 0,2 $\text{m}^3/\text{m}^2\text{min}$, donde disminuye el caudal de filtrado procesado y la altura de la torta obtenida, posiblemente por ofrecer una mayor resistencia.

El contenido de agua registrado en las tortas obtenidas se encuentra dentro de los límites aceptables para el transporte de sólidos, cuando el bombeo se realiza a 5 bar. Cuando la presión disminuye a 3 bar, se obtienen humedades menores,

muy cercanas al rango óptimo, por lo que pueden aún ser consideradas aceptables para el transporte.

El análisis de los resultados obtenidos en los ensayos realizados, muestran la posibilidad de mejorar la calidad del efluente de una planta de filtración de concentrado de sulfuros metalíferos. Mediante la selección de un textil con características adecuadas, puede disminuir la cantidad y calidad de sólidos en el filtrado y de esta manera facilitar los procesos en la planta de tratamiento de efluentes.

Los ensayos realizados mostraron además que, la presión utilizada en el bombeo para el llenado de la cámara, influye tanto en la cantidad de material ingresado a la cámara (capacidad de filtración) como en la conformación estructural de los sólidos en la torta regulando los efectos de las posteriores etapas de expresión por presión (prensado) y secado adicional por arrastre con aire (humedad final de la torta).

Por último, la tela con permeabilidad $5 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{min}$ presentaría el comportamiento más adecuado a los requisitos de producción, de transporte y de calidad de efluente.

5. Referencias.

Epps, H. H., & Leonas, K. K. (1997). The relationship between porosity and air permeability of woven textile fabrics. *Journal of testing and evaluation*, 25(1), 108-113.

Lu, W. M., Tung, K. L., & Hwang, K. J. (1997). Effect of woven structure on transient characteristics of cake filtration. *Chemical engineering science*, 52(11), 1743-1756.

Naik Kardile, A., & Gacén Guillén, J. (1985). Influencia del tratamiento y condiciones de termofijado en los parámetros de los tejidos de calada de poliéster.

Ogulata, R.T. (2006). Air Permeability of Woven Fabrics. *Journal of Textile and Apparel, Technology and Management*. 5 (2), 1-10.

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

Ventosilla, J. (2014). Selección de filtro prensa y optimización de medios filtrantes para concentrados, relaves y lodos de neutralización. *Revista del Instituto de Investigación (RIIGEO) FIGMMG-UNMSM*, 17 (34), 117-124.