

Universidad de Concepción

Facultad de ingeniería

Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Profesor Patrocinante:

Dr. Fernando Betancourt Cerda

**ESTUDIO DEL EFECTO DE LA
TEMPERATURA DEL AIRE EN LAS
VARIABLES DE FILTRACIÓN USANDO
EQUIPO FILTRASET**

EDUARDO FAÚNDEZ CONTRERAS

Informe de Memoria de Título

para optar al título de

Ingeniero Civil Metalúrgico

DICIEMBRE, 2018

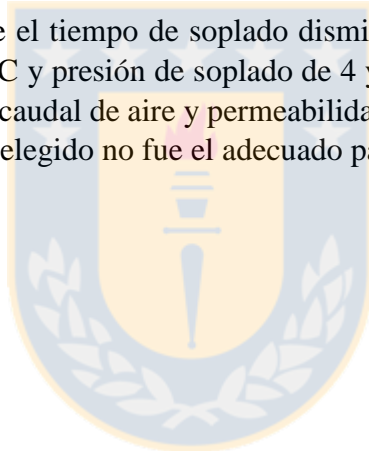
RESUMEN

El presente trabajo es realizado con el objetivo de optar al título de Ingeniero Civil Metalúrgico de la Universidad de Concepción, en él se desarrollará una investigación experimental en busca de mejorar la etapa de filtración con el desarrollo de una nueva tecnología y equipo de filtración llamado Filtraset, el cual incorpora un calentador de aire y flujómetro digital.

Actualmente en el proceso de filtración solo se han realizado estudios correspondiente al uso de reactivos tensoactivos como ayuda filtrante, estudio de telas de filtración, pero se ha dejado de lado el estudio del efecto de la temperatura del aire de soplado, ya que solo se sopla a temperatura ambiente (alrededor de 20 °C), de esta manera se desarrolló un programa para evaluar el efecto de la temperatura del aire en el tiempo de soplado, caudal de aire a través del queque, permeabilidades del aire y líquido, humedad residual y saturación del queque.

Para medir el efecto de esta variable se decidió trabajar con 5 temperaturas diferentes: 20, 30, 40, 50 y 60 °C, con 3 presiones de soplado diferentes: 4, 5 y 6 bar, y con un mineral de relaves mineros.

Los resultados indican que el tiempo de soplado disminuye alrededor de 30 % en promedio para una temperatura de 30 y 40 °C y presión de soplado de 4 y 5 bar respecto al resultado de 20 °C. Respecto al estudio del efecto del caudal de aire y permeabilidades del aire no se obtuvo un resultado concluyente, ya que el flujómetro elegido no fue el adecuado para el estudio de la investigación.



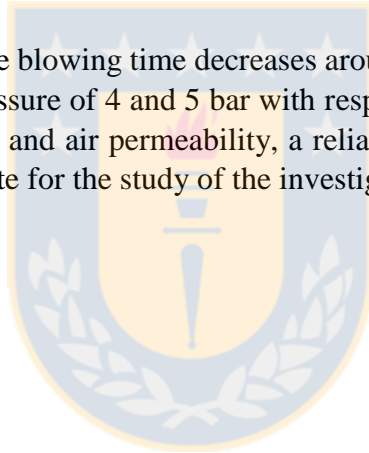
ABSTRACT

The present work is carried out with the objective of obtaining the title of Metallurgical Civil Engineer of the University of Concepción, in which an experimental research will be developed in order to improve the filtration stage with the development of a new technology and filtration equipment called Filtraset, which incorporates an air heater and digital flow meter.

Currently in the filtration process only studies have been carried out corresponding to the use of surfactant reagents as filtering aid, study of filtration fabrics, but the study of the effect of the temperature of the blowing air has been ignored, since only blowing at room temperature (around 20 °C), this way a program was developed to evaluate the effect of air temperature on the blowing time, air flow through the cake, permeabilities of the air and liquid, residual humidity and saturation of the cake.

To measure the effect of this variable, it was decided to work with 5 different temperatures: 20, 30, 40, 50 and 60 °C, with 3 different blowing pressures: 4, 5 and 6 bar, and with a mine tailings mineral.

The results indicate that the blowing time decreases around 30% on average for a temperature of 30 and 40 ° C and blowing pressure of 4 and 5 bar with respect to the result of 20 ° C. Regarding the study of the effect of air flow and air permeability, a reliable result was not obtained, since the chosen flowmeter was not adequate for the study of the investigation.



ÍNDICE

RESUMEN.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	v
ÍNDICE DE TABLAS.....	vii
NOMENCLATURA.....	ix
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Objetivo general.....	1
1.2. Objetivos específicos.....	1
2. ANTECEDENTES.....	2
2.1. DEFINICIÓN, EQUIPOS Y OPERACIÓN.....	2
2.1.1. Filtración con formación de queque.....	2
2.1.2. Filtración sin formación de queque.....	3
2.1.3. Filtración profunda.....	3
2.2. TEORÍA DE FILTRACIÓN.....	4
2.2.1. Formación de queque.....	5
2.2.2. Filtración a presión constante.....	6
2.2.3. Filtración a volumen constante.....	8
2.2.4. Secado o soplado del queque.....	9
2.3. Efecto de la temperatura en la viscosidad del aire y agua y de la densidad del agua.....	12
2.4. OPERACIÓN.....	14
2.5. EQUIPOS DE FILTRACIÓN A PRESIÓN.....	14
2.5.1. Filtro prensa de placas verticales.....	15
2.5.2. Filtro Prensa de Placas Horizontales.....	15
2.6 Conceptos fisicoquímicos aplicables a la filtración.....	16
2.6.1. Tensión superficial.....	16
2.6.2. Angulo de contacto.....	17
2.6.3. Capilaridad.....	19
3. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	20
3.1. Equipamiento experimental.....	20
3.1.2. Sub-Componentes.....	22
3.2. Procedimiento.....	42

3.3.	Muestreo y caracterización de mineral	43
3.3.1	Análisis granulométrico	43
3.4.	Pruebas de filtración con aire caliente.....	43
3.4.1.	Pruebas experimentales.	44
4.	RESULTADOS Y DISCUSIONES	47
4.1.	Caracterización del mineral	47
4.1.1.	Análisis granulométrico	47
4.2.	Pruebas de filtración	48
4.2.2.	Pruebas de capilaridad	50
4.2.3.	Pruebas de filtración	51
4.2.4.	Pruebas etapa de formación	51
4.2.2.	Pruebas de soplado	52
5.	CONCLUSIONES	63
6.	BIBLIOGRAFÍA	64
7.	ANEXOS	65
7.1.	Datos pruebas de filtración.....	65
7.2.	Resultados pruebas de filtración.....	71
7.2.1	Resultados humedad residual.....	71
7.2.2.	Resultados saturación residual.....	75
7.3.	Ejemplos.....	79
7.3.1.	Ejemplo calculo N°1	79
7.3.2.	Ejemplo de cálculo N°2	80
7.3.3.	Ejemplo de cálculo N°3 (utilizar datos ejemplo N.º 2).....	82
7.4.	Análisis granulométrico	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Filtración con formación de queque.....	3
Figura 2: Filtración sin formación de queque.	3
Figura 3 : Filtración profunda.	4
Figura 4: Filtración de queque plano.....	5
Figura 5 : Permeabilidades relativas del liquido y aire. Fernando Concha A.. (2005). Solid–Liquid Separation in the Mining Industry. Concepción,Chile: Springer.	11
Figura 6: Gráfico viscosidad del aire versus temperatura.Haynes, WM (2014). Manual CRC de química y física . Prensa CRC.....	12
Figura 7: Viscosidad del agua en función de la temperatura.....	13
Figura 8: Densidad del agua en función de la temperatura	13
Figura 9:Filtro de placas verticales Fernando Concha A.. (2005). Solid–Liquid Separation in the Mining Industry. Concepción,Chile: Springer.	15
Figura 10: Filtro Larox Fernando Concha A.. (2014). Solid–Liquid Separation in the Mining Industry. Concepción,Chile: Springer.).	16
Figura 11: representación de desbalance de fuerzas en la superficie del líquido.	17
Figura 12: ángulo de contacto entre un sistema sólido, líquido, vapor.	17
Figura 13: tipos de mojado, total, parcial, secado, para un sistema sólido-líquido-vapor.....	18
Figura 14: Balance de fuerza.	18
Figura 15: representación capilar.....	19
Figura 16: Partes generales equipo filtraset.....	21
Figura 17: Calentador de aire PACK 6000X.....	22
Figura 18: Válvula de purga.....	23
Figura 19: Válvula de alivio.....	23
Figura 20: Válvula de alivio con silenciador.....	24
Figura 21: Regulador de presión	24
Figura 22: Válvula 2.....	25
Figura 23: Manómetro digital.....	25
Figura 24: Vaso de Filtración.....	26
Figura 25: Partes del vaso de filtración	26
Figura 26: Gráfico distribución de tamaño de partícula.	47
Figura 27 : Curva de Capilaridad para distintas temperaturas.....	50
Figura 28: Tiempo etapa de formación, presión de formación 3 bar, masa de sólido 120g masa de agua 120 g.	51
Figura 29: Filtrado etapa de soplado (superior) y humedad residual (inferior), presión de soplado 6 bar, masa sólido 120 g, masa líquido 120 g, válvula de purga en condición 1.....	54
Figura 30: Filtrado etapa de soplado (superior) y humedad residual (inferior), presión de soplado 4 bar, masa sólido 120 g, masa líquido 120, válvula de purga en condición 1.....	55
Figura 31: Filtrado etapa de soplado (superior) y humedad residual(inferior),presion de soplado 5 bar, masa solido 180 g, masa liquido 180g, válvula de purga en condición 1.....	56
Figura 32: Saturacion residual,presion de soplado 5 bar, masa solido 180 g, masa liquido 180g ,válvula de purga en condición 1	57
Figura 33: Caudal de aire promedio en función de la temperatura, P=5 bar, condición 1 válvula de purga...	60
Figura 34: Caudal de aire	60

Figura 35: Caudal promedio etapa de soplado, para distintas condiciones de la válvulas de alivio, P=5 bar .	61
Figura 36: Comparación permeabilidad relativas a diferentes temperaturas,P=5 bar, masa sólido 180 g masa líquido 180 g , condición operación 1	62
Figura 37: Curva Capilaridad.....	79
Figura 38 : t/V_f vs V_f	81
Figura 39: Simulación volmuen filtrado	83
Figura 40: Simulación caudal de aire.....	84
Figura 41: Caudal filtrado estapa soplado.....	85
Figura 42: Permeabilidades efectivas del líquido y del aire	85
Figura 43: Permeabilidades relativas líquido y aire.....	86
Figura 44: Porcentaje de humedad residual	87



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Diseño pruebas de capilaridad.....	44
Tabla 2: Diseño pruebas de permeabilidad	44
Tabla 3: Diseño experimental Abertura de la Válvula de purga, donde la condición indica aberturas distintas de la válvula de purga.....	45
Tabla 4: Resultados de interés del análisis granulométrico.....	47
Tabla 5: Tiempo de soplado para las diferentes condiciones de presión , masa sólido y líquido.	48
Tabla 6: Saturación residual	50
Tabla 7: Resultados promedio pruebas de formación	51
Tabla 8: Tiempo promedio de soplado para saturación definida, para 120 (g) de sólido y 120 (g) de líquido aproximadamente, válvula de purga en condición 1	57
Tabla 9: Tiempo promedio de soplado para humedad residual definida, para 120 (g) de sólido y 120 (g) de líquido aproximadamente, presión de soplado 4 bar, válvula de purga en condición 1	58
Tabla 10: Tiempo promedio de soplado para humedad residual definida, para 120 (g) de sólido y 120 (g) de líquido aproximadamente, presión de soplado 6 bar, válvula de purga en condición 1	59
Tabla 11: Tiempo promedio de soplado para humedad residual definida, para 180 (g) de sólido y 180 (g) de líquido aproximadamente, presión de soplado 5 bar, válvula de purga en condición 1	59
Tabla 12: Variación porcentual del caudal promedio respecto a la prueba de 20 (°C) para diferentes posiciones de la válvula de purga.....	61
Tabla 13: Datos pruebas de filtración, derecha 50 °C, Izquierda 60 °C, presión de soplado 5 bar, masa sólido 120 g, masa líquido 120 g posición 1 válvula de Purga.	65
Tabla 14: Datos pruebas de filtración, derecha 40 °C, Izquierda 30 °C, presión de soplado 5 bar, masa sólido 120 g, masa líquido 120 g posición 1 válvula de Purga.	66
Tabla 15: Datos pruebas de filtración, 20 °C, presión de soplado 5 bar, masa sólido 120 g, masa líquido 120 g posición 1 válvula de Purga.....	67
Tabla 16: Datos pruebas de filtración, derecha 60 °C, Izquierda 50 °C, presión de soplado 4 bar, masa sólido 120 g, masa líquido 120 g posición 1 válvula de Purga	68
Tabla 17: Datos pruebas de filtración, derecha 40 °C, Central 30 °C Izquierda 20 °C, presión de soplado 4 bar, masa sólido 120 g, masa líquido 120 g posición 1 válvula de Purga	68
Tabla 18: Datos pruebas de filtración, derecha 60 °C, Izquierda 50 °C, presión de soplado 6 bar, masa sólido 120 g, masa líquido 120 g posición 1 válvula de Purga	69
Tabla 19: Datos pruebas de filtración, derecha 40 °C,central 30 °C Izquierda 20 °C, presión de soplado 6 bar, masa sólido 120 g, masa líquido 120 g posición 1 válvula de Purga	69
Tabla 20: Datos pruebas de filtración, derecha 20 °C,central 30 °C Izquierda 60 °C, presión de soplado 5 bar, masa sólido 180 g, masa líquido 180 g posición 1 válvula de Purga	70
Tabla 21: Humedad residual, presión soplado 5 bar, masa sólido 120 g, masa líquido 120 g aprox.....	71
Tabla 22: Humedad residual, presión soplado 5 bar, masa sólido 180 g, masa líquido 180 g aprox.....	72
Tabla 23: Humedad residual, presión soplado 6 bar, masa sólido 120 g ,masa líquido 120 g aprox.	73
Tabla 24: Humedad residual, presión soplado 4 bar, masa sólido 120 g, masa líquido 120 g aprox.	74
Tabla 25: Saturación residual, presión soplado 5 bar, masa sólido 150 g, masa líquido 180 g aprox	75
Tabla 26: Saturación residual, presión soplado 5 bar, masa sólido 120 g, masa líquido 120 g aprox	76
Tabla 27: Tiempo -Saturación residual, presión soplado 4 bar, masa sólido 120 g, masa líquido 120 g aprox	77
Tabla 28: Tiempo-Saturación residual, presión soplado 6 bar, masa sólido 120 g, masa líquido 120 g aprox	78
Tabla 29: Curva capilaridad	80
Tabla 30: Datos etapa formación de queque	80

Tabla 31: Datos etapa formación 81
Tabla 32: Etapa de soplado 88
Tabla 33: Sympatec Helos Vectra - U. de Concepcion - Ing. Metalurgia..... 89



NOMENCLATURA

‰: Porcentaje.

m: Metro, unidad de SI de longitud, [L].

cm: Centímetro, 10^{-2} m, [L].

μm: Micrómetro, micrón o micra, 10^{-6} m, [L].

kg: kilogramo, unidad del SI de masa, [M].

g: Gramo, 10^{-3} kg, [M].

mg: Milígramo, 10^{-3} g, [M].

s: Segundo, unidad del SI tiempo, [T].

L: Litro, unidad de volumen, [L³].

mL: Mililitro, 10^{-3} L, [L³].

N: Newton, unidad del SI de fuerza, $\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ [M*L*T-2].

dina: Dina, unidad del sistema cgs de fuerza, $\text{g}\cdot\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$, [M*L*T-2].

bar: Bar, unidad de presión del SI, $10^5\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$, [M*L-1*T-2].

°C: Grado Celsius, unidad de temperatura [Θ].

ε₀: Porosidad del Queque.

q(t): Velocidad de filtrado, $\text{cm}^3\cdot\text{s}^{-1}$, [L³*T-1].

Δp: Delta de presión, unidad de presión del SI, $10^5\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$, [M*L-1*T-2].

μ_l-μ_a: Viscosidad del líquido y del aire, Dina, unidad del sistema cgs de fuerza, $\text{g}\cdot\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$, [M*L*T-2].

L_m: Espesor del medio, cm, [L].

k_m: Permeabilidad del medio, cm^{-2} , [L-2].

k(ε₀): Permeabilidad del queque, cm^{-2} , [L-2].

Q(t): Caudal de filtrado, $\text{cm}^3\cdot\text{s}^{-1}$, [L³*T-1].

S: Área de filtración, cm^2 , [L²].

φ₀= Fracción volumétrica.

k_{ef.l}-k_{ef.q}: Permeabilidad efectiva del líquido y del aire, cm^{-2} , [L-2].

q_l-q_g: Velocidad de percolación del líquido y del aire, $\text{cm}^3\cdot\text{s}^{-1}$, [L³*T-1].

k_l-k_g: Permeabilidades relativas del líquido y del aire.

1. INTRODUCCIÓN

Se denomina filtración a la operación en que una suspensión es llevada por medio de una fuerza impulsora hacia un medio filtrante o material poroso con el fin de retener el componente sólido y permitir el paso del líquido.

Esta operación se enmarca en las llamadas operaciones de separación sólido-líquido, las que a su vez forman parte de un campo mucho más amplio de operaciones denominadas procesos de separación de fases.

En la filtración de concentrados de cobre, los filtros a presión cobran especial relevancia. Estos son de carácter discontinuos y operan en ciclos, donde cada ciclo está compuesto por una etapa de formación de queque, soplado o secado y de forma opcional están las etapas de compresión o prensado y lavado de queque. La utilización y características de cada una de estas etapas dependen del tipo de concentrado a filtrar. Por ejemplo, un concentrado con una granulometría más fina afectará las etapas de formación de queque y soplado. Una mayor o menor densidad de alimentación de la pulpa producirá también cambios en el rendimiento, y por último está el problema del contenido de arcillas presente en el concentrado, el que afectará la presión capilar del sistema produciendo efectos negativos especialmente en la etapa de soplado del queque. los factores anteriores afectan de forma directa la optimización del rendimiento y capacidad de tonelaje de los filtros, por ellos unas propuestas que busca la optimización del rendimiento y capacidad de tonelaje del filtro seria el aumentos de los equipos de filtración o el tamaño de estos, lo que implica un gasto enorme en inversión y restructuración del layout de la planta lo que convierte estas iniciativas inviables en el corto plazo, por esto se presenta una nueva alternativa la cual consiste en disminuir del tiempo de residencia de la pulpa en el filtro lo cual aumenta la capacidad de tonelaje del equipo, cambiando las condiciones de operación , específicamente a través del aumento de la temperatura del aire de soplado a través de un precalentamiento.

Para ello se propone los siguientes objetivos:

1.1. Objetivo general

Estudiar, analizar y evaluar a escala de laboratorio el efecto del aire precalentado en el proceso de filtración con formación de queque mediante el equipo Filtraset

1.2. Objetivos específicos

Definir variables de operación

Diseñar metodología de trabajo para evaluar el efecto de la temperatura de precalentamiento del aire.

- Evaluar el efecto de la temperatura de precalentamiento del aire de soplado en la etapa de formación del queque evaluando tiempo de formación y permeabilidad del medio (k_m).

- Evaluar el efecto de la temperatura de precalentamiento del aire de soplado en las pruebas de capilaridad evaluando curvas de saturación.
- Evaluar el efecto de la temperatura de precalentamiento del aire de soplado y presión en la etapa de soplado del queque, evaluando tiempo de soplado, caudal del aire de soplado, permeabilidades relativas del aire (k_g) y líquido (k_l), saturación y humedad residual.

2. ANTECEDENTES

2.1. DEFINICIÓN, EQUIPOS Y OPERACIÓN

El proceso de filtración se enmarca dentro de las operaciones de separación sólido-líquido, en que el sólido es separado del líquido en una suspensión haciéndolo pasar a través de un lecho poroso que se denomina medio filtrante. El lecho es el encargado de retener las partículas sólidas y el fluido pasa a través de este y recibe el nombre de filtrado, mientras que el sólido de la suspensión puede o no formar un queque sobre el medio filtrante dependiendo del tipo de filtración del cual se trate.

Para que este fenómeno ocurra se debe aplicar un gradiente de presión como fuerza impulsora, el cual se puede originar de diferentes formas, por ejemplo: 1) por gravedad, 2) presión, 3) vacío, 4) presión y vacío combinados, 5) una fuerza centrífuga y 6) un gradiente de saturación. Dependiendo de cómo se origina este gradiente de presión van a existir distintos equipos asociados, los que reciben el nombre de filtros.

En el proceso de filtración podemos distinguir tres tipos, a) Filtración con formación de queque, b) Filtración sin formación de queque y por último c) Filtración profunda.

2.1.1. Filtración con formación de queque

Este tipo de filtración se caracteriza por que el sólido de la suspensión (ver figura 1) queda retenido sobre el medio filtrante formando una capa denominada queque, y que se origina debido a que los poros del medio filtrante son de menor tamaño que el tamaño de las partículas del sólido. Cuando esto no ocurre se debe cubrir el medio filtrante con una delgada capa de material fibroso denominado ayuda de filtración que bloquea el paso de las partículas a través del medio filtrante. Este tipo de filtración es el más ampliamente utilizada en la industria minera y es el que se detallará en los próximos capítulos.

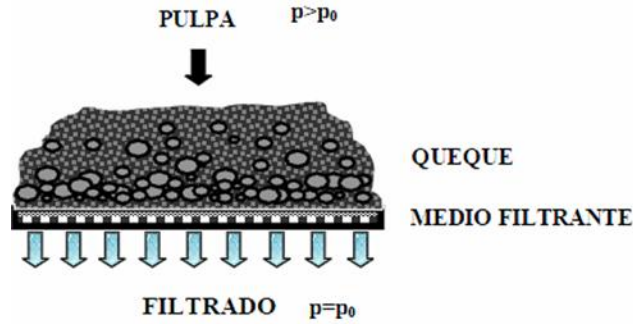


Figura 1: Filtración con formación de queque.

2.1.2. Filtración sin formación de queque

La filtración sin formación de queque se caracteriza por que el flujo de suspensión es paralelo al medio filtrante (ver figura 2) por lo que su capacidad de retener los sólidos es baja. Esto debido a que el flujo de suspensión produce una tasa de cizalle muy alta que impide la retención de sólidos sobre el medio, en este proceso el líquido atraviesa el medio filtrante mientras que el sólido permanece en la suspensión. A diferencia de la filtración con formación de queque en este tipo de filtración no es posible alcanzar humedades tan bajas y su uso más común se da en la filtración de gases polvorientos.

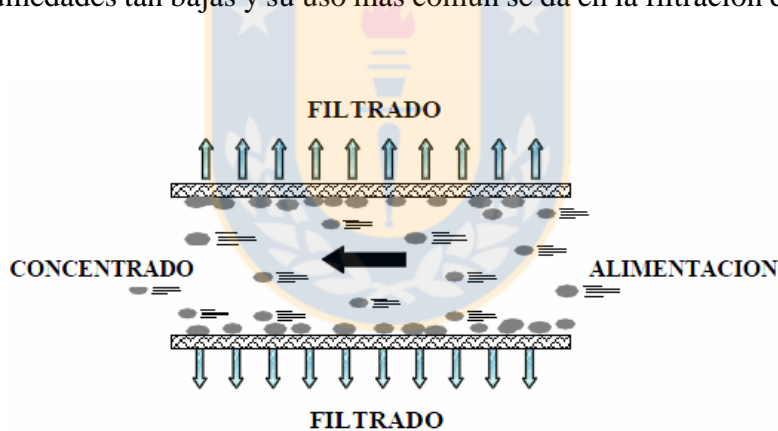


Figura 2: Filtración sin formación de queque.

2.1.3. Filtración profunda

La filtración profunda filtrante (ver figura 3) se caracteriza por que los poros del medio filtrante son de mayor tamaño que las partículas sólidas de la suspensión, y por lo tanto retienen en su interior las partículas sólidas. Se utiliza este tipo de filtración para suspensiones muy diluidas. La principal desventaja es que el medio filtrante pierde su capacidad de filtración después de un cierto tiempo, y debe ser limpiado para eliminar partículas finas desde su interior. Ejemplos de este tipo de filtros son:

los filtros de arenas de piscinas o filtros de aire de los automóviles.

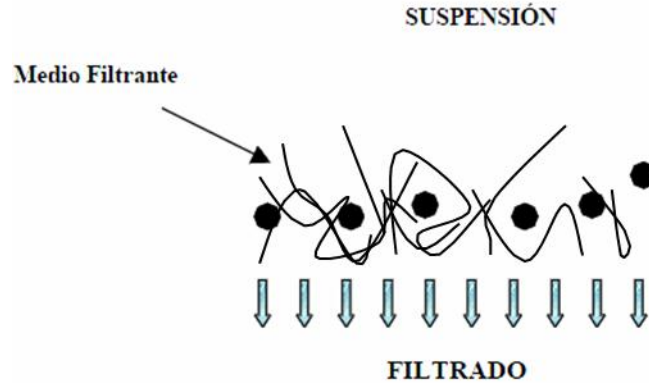


Figura 3 : Filtración profunda.

2.2. TEORÍA DE FILTRACIÓN

La teoría de filtración que a continuación se describe se aplicará a queques de filtración incompresibles, caso más común en las plantas de procesamiento de minerales y, en especial, cuando se trata de concentrados de cobre que utilizan floculantes en la etapa de espesamiento. Por todo ello hablamos de flujo en un lecho poroso rígido.

Se consideran además las siguientes restricciones:

- i) Las propiedades de la suspensión, filtrado y 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 medio filtrante es muy lenta.

Esta última suposición permite aplicar la ley de Darcy a la velocidad de percolación, la que describiremos más adelante.

En la filtración se distinguen dos etapas fundamentales: a) la formación de queque, que incluye tanto la alimentación a los filtros como la compresión de la suspensión sobre el medio filtrante, esta última finaliza cuando desaparece la suspensión y el queque se encuentra completamente saturado, es decir, sus poros están completamente llenos de líquido; b) soplado del queque, etapa que consiste en la eliminación del líquido contenido en los poros mediante la aplicación de aire a presión, el aire desplaza el líquido primero de los poros de mayor tamaño para luego eliminar el agua de poros más pequeños, hasta llegar a una saturación residual, a la cual ya no es posible eliminar más líquido.

2.2.1. Formación de queque

Para describir el proceso de filtración debemos tener en cuenta las siguientes variables: la porosidad del queque $\varepsilon(z,t)$ la que se considera constante debido a la suposición ii) que considera el material como incompresible; la velocidad del filtrado $q(z,t)$ que se considerará dependiente solo del tiempo y por último la presión en exceso a la hidrostática $p_e(z,t)$ la que, mediante la aplicación de la ley de Darcy, se puede representar por la siguiente ecuaciones:

$$\varepsilon(z, t) = \varepsilon_0 \quad (1)$$

$$q(z, t) = q(t) \quad (2)$$

$$\nabla p_e = -\frac{\mu}{k(\varepsilon)} * q \quad (3)$$

donde μ es la viscosidad del líquido

Esquemáticamente este gradiente de presión entre ambos extremos del queque y del medio filtrante se muestra a continuación filtrante (ver figura 4):

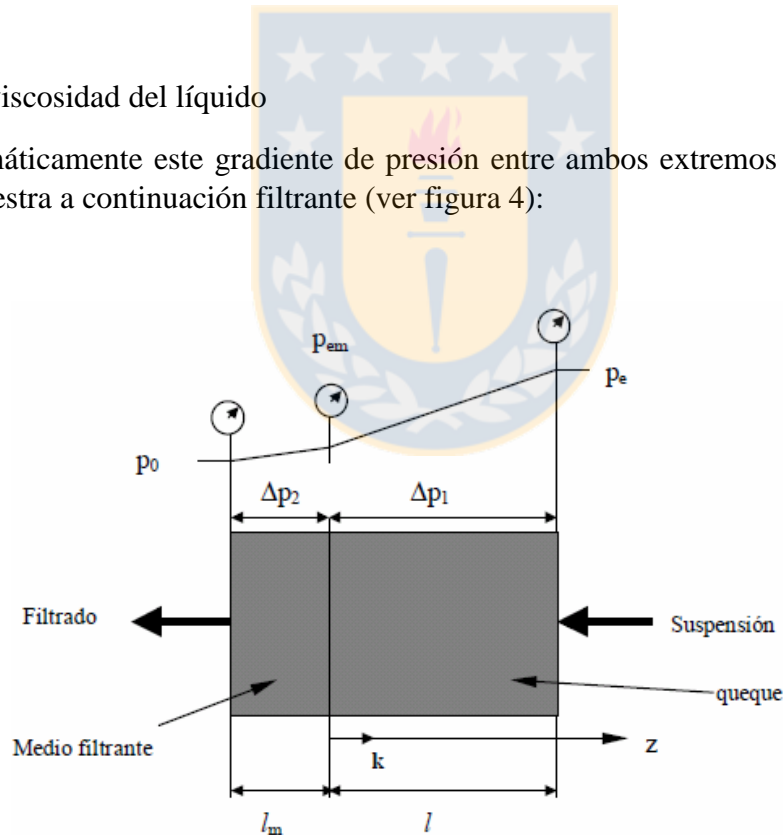


Figura 4: Filtración de queque plano.

Se cumple que $\Delta p_1 = p_e - p_{em} > 0$ y $\Delta p_2 = p_{em} - p_0 > 0$ cuyas condiciones de contorno son:

$$p_e(-l_m) = p_0 \quad (4)$$

$$p_e(l(t)) = p_e \quad (5)$$

Donde p_e es la presión en la interfaz entre el queque y el medio filtrante, p_e es 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 $z=-l_m$

Se denomina 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 a 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

Cuando la bomba inicia su acción hay poca resistencia en el filtro por lo que hay una baja presión y un caudal alto 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.

2.2.2. Filtración a presión constante

Como se indico 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, y se mantiene relativamente constante. Analicemos este caso. Designemos por p_0 la presión en $z = -l_m$, por p_{em} la presión en $z=0$, y por p_e la presión en $z=l(t)$, con $\Delta p_1 = p_e - p_{em} > 0$ y $\Delta p_2 = p_{em} - p_0 > 0$ de modo que:

$$\Delta p_e = p_e - p_0 = \Delta p_1 + \Delta p_2 > 0 \quad (6)$$

Considerando, además, que $\Delta p_e = \frac{dp_e}{dz}$, se puede integrar la ecuación (3) y

obtener expresiones para las caídas de presión:

$$\Delta p_2 = \frac{l_m}{k_m} * \mu * q(t) \quad (7)$$

$$\Delta p_2 = \frac{\mu}{k(\varepsilon_0)} * q(t) \quad (8)$$

Donde l_m y k_m son el espesor y la permeabilidad del medio filtrante, respectivamente, $k(\varepsilon_0)$ y $l(t)$ son la permeabilidad y el espesor del queque, respectivamente, y $q(t)$ es la velocidad de percolación (flujo de filtrado por unidad de área). Si se reemplazan (7) y (8) en (6) se obtiene una expresión para el gradiente total de presión del queque y el medio filtrante.

$$\Delta p_e = \mu * \left(\frac{l_m}{k_m} + \frac{l(t)}{k(\varepsilon_0)} \right) * q(t) \quad (9)$$

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

$$Q(t) = q(t) * S = \frac{dV_f(t)}{dt} \quad (10)$$

Donde S es el área de filtración. Si se reemplaza esta expresión en la ecuación (9), se obtiene:

$$\Delta p_e * s = \mu * \left(\frac{l_m}{k_m} + \frac{l(t)}{k(\varepsilon_0)} \right) * \frac{dV_f(t)}{dt} \quad (11)$$

Ahora bien, si se incorpora el término de la fracción volumétrica de sólidos, definido como relación entre el volumen de sólido y el volumen de la suspensión, se puede relacionar el espesor del queque $l(t)$ con el volumen de filtrado obtenido $V_f(t)$ en la forma:

$$l(t) = \frac{\varphi_0}{1 - \varphi_0 - \varepsilon_0} * \frac{V_f(t)}{S} \quad (12)$$

Expresión que al ser reemplazada en (11) resulta:

$$\Delta p_e * s = \mu * \left(\frac{l_m}{k_m} + \frac{1}{k(\varepsilon_0)} * \frac{\varphi_0}{1 - \varphi_0 - \varepsilon_0} * \frac{V_f(t)}{S} \right) * \frac{dV_f(t)}{dt} \quad (13)$$

Donde la única variable es $V_f(t)$, de manera que al integrar la expresión (13) entre 0 y t y entre 0 y V_f , resulta:

$$\frac{\Delta p_e * s * t}{\mu} = \frac{l_m}{k_m} * V_f + \frac{1}{2 * k(\varepsilon_0)} * \frac{\varphi_0}{1 - \varphi_0 - \varepsilon_0} * \frac{V_f^2}{S} \quad (14)$$

Para valores de $t > 0$ y $V_f > 0$, la expresión (14), puede ser reordenada en la forma:

$$\frac{t}{V_f} = \frac{\mu}{\Delta p_e * S} * \left(\frac{l_m}{k_m} + \frac{\varphi_0}{1 - \varphi_0 - \varepsilon_0} * \frac{V_f}{S * k(\varepsilon_0)} \right) \quad (15)$$

Luego, si se desprecia el valor de la resistencia específica del medio filtrante resulta:

$$\frac{t}{V_f} = \frac{\mu}{2 * S^2 * \Delta p_e} * \frac{\varphi_0}{(1 - \varphi_0 - \varepsilon_0) * k(\varepsilon_0)} * V_f \quad (16)$$

Expresión que puede reordenarse para obtener

$$k(\varepsilon_0) = \frac{V_f^2}{t} * \frac{\mu}{2 * S^2 * \Delta p_e} * \frac{\varphi_0}{(1 - \varphi_0 - \varepsilon_0)} \quad (17)$$

Si se utiliza la expresión (15), es posible determinar la resistencia del medio filtrante (R_m) y la permeabilidad del queque $k(\varepsilon_0)$ graficando t/V_f vs V_f , y definiendo $\mathbf{b}=\text{tg}\theta$ como la pendiente de la recta obtenida y \mathbf{a} su intersección con el eje de las ordenadas, los parámetros serán:

$$R_m = a * \Delta p * \frac{S}{\mu}$$

$$k(\varepsilon_0) = \frac{1}{b} * \frac{\mu}{2 * S^2 * \Delta p_e} * \frac{\varphi_0}{(1 - \varphi_0 - \varepsilon_0)}$$

2.2.3. 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 (9) sigue siendo válida, ahora con Δp_e como variable y q constante:

$$\Delta p_e(t) = \mu * \left(\frac{l_m}{k_m} + \frac{l(t)}{k(\varepsilon_0)} \right) * q \quad (18)$$

$$\Delta p_e(t) * S = \mu * \left(\frac{l_m}{k_m} + \frac{l(t)}{k(\varepsilon_0)} \right) * Q/S \quad (19)$$

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

$$l(t) = S * \frac{k(\varepsilon_0)}{\mu * Q} * \Delta p_e(t) - l_m * k(\varepsilon_0)/k_m \quad (20)$$

$$m_s(t) = S * \rho_s * (1 - \varepsilon_0) * k * \frac{\varepsilon_0}{\mu * Q} * \Delta p_e(t) - (l_m * \rho_s * (1 - \varepsilon_0) * k(\varepsilon_0))/k_m \quad (21)$$

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

2.2.4. 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 a 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 de 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 $0 < s < 1$. Si $s=0$, el queque está seco y si $s=1$, el queque está lleno de líquido o saturado, y en el caso de que el queque se encuentre totalmente seco la saturación será 0. Para la condición mencionada en el párrafo anterior, en que ya no es posible seguir reduciendo el contenido de líquido en el queque, se habla de saturación residual s_∞ .

Para el cálculo del flujo de aire a través del queque húmedo se utiliza la teoría de flujo bifásico en medios porosos (Concha, 2001). Se debe utilizar una permeabilidad efectiva para cada fluido, la que dependerá de la saturación.

$$q_l(s) = \frac{K_{ef.l}}{\mu_l} * \Delta p_e \quad (22)$$

$$q_g(s) = \frac{K_{ef.g}}{\mu_g} * \Delta p_g \quad (23)$$

Donde q_l y q_g son las velocidades de percolación del líquido y el gas respectivamente, y $k_{ef. l}$, $k_{ef. g}$ las permeabilidades efectivas de cada uno.

Se denomina permeabilidad relativa del fluido al cociente entre el flujo de fluido en un queque no saturado y el flujo de este en un queque saturado con el mismo fluido bajo el mismo gradiente de presión.

$$k_l(\varepsilon_0, s) = q_l(\varepsilon_0, s)/q_l(\varepsilon_0, s = 1) = \frac{\left(\frac{k(\varepsilon_0, s)}{\mu_l} * \frac{dp_e}{dz}\right)}{\frac{k(\varepsilon_0)}{\mu_l} * \frac{dp_e}{dz}} = \frac{k_{ef.l}(\varepsilon_0, s)}{k(\varepsilon_0)} \quad (24)$$

$$k_g(\varepsilon_0, s) = q_g(\varepsilon_0, s)/q_g(\varepsilon_0, s = 1) = \frac{\left(\frac{k(\varepsilon_0, s)}{\mu_g} * \frac{dp_e}{dz}\right)}{\frac{k(\varepsilon_0)}{\mu_g} * \frac{dp_e}{dz}} = \frac{k_{ef.g}(\varepsilon_0, s)}{k(\varepsilon_0)} \quad (25)$$

Donde, k_l y k_g son la permeabilidad relativa del líquido y el gas respectivamente, y μ_l y μ_g sus viscosidades.

De las expresiones (24) y (25) se desprende que las permeabilidades efectivas del filtrado y del aire se pueden escribir de la forma:

$$k_{ef.l}(\varepsilon_0, s) = k(\varepsilon_0) * k_l(\varepsilon_0, s) \quad (26)$$

$$k_{ef.g}(\varepsilon_0, s) = k(\varepsilon_0) * k_g(\varepsilon_0, s) \quad (27)$$

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

$$q_l(s) = -k_l(\varepsilon_0, s) * \frac{k(\varepsilon_0)}{\mu_l} * \Delta p_e \quad (28)$$

$$q_g(s) = -k_g(\varepsilon_0, s) * \frac{k(\varepsilon_0)}{\mu_g} * \Delta p_g \quad (29)$$

Las permeabilidades relativas de cada fluido deben ser obtenidas experimentalmente, y como se mencionó anteriormente dependerán de la saturación del queque, curvas típicas de permeabilidad filtrante (ver figura 5)

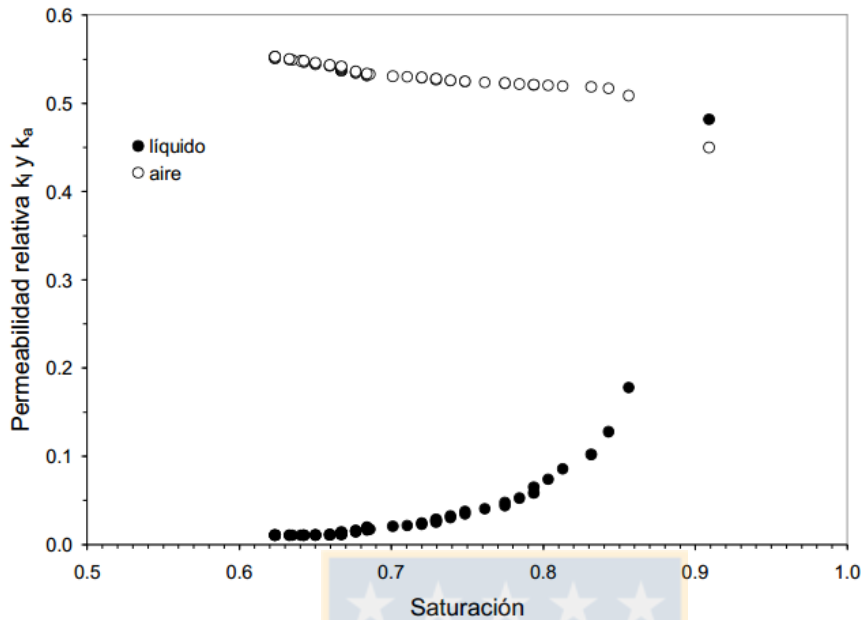


Figura 5 : Permeabilidades relativas del líquido y aire. Fernando Concha A.. (2005). *Solid–Liquid Separation in the Mining Industry*. Concepción, Chile: Springer.

La importancia de obtener la permeabilidad relativa del líquido es que una vez conocida la función que mejor ajusta la curva de permeabilidad, se puede obtener el tiempo de soplado para llegar a una determinada humedad o saturación.

Si se Considera la ecuación (22) e integrándola se obtiene:

$$\frac{\Delta p_e}{\mu_l} = R_m + \frac{l}{k(\varepsilon_0) * k_l(\varepsilon_0, s)} * q_l \quad (30)$$

El espesor del que permanece constante, la cantidad de líquido contenida en los poros a cada instante t es $S l \varepsilon_0 s(t)$ donde la saturación s es inicialmente 1 y disminuye con el tiempo, el volumen de filtrado V_f a cada instante t es: $V_f(t) = S l \varepsilon_0 (1 - s(t))$ y su derivada $q_1 S = dV_f / dt = S l \varepsilon_0 ds / dt$ por lo que reemplazando e integrando posteriormente entre 1, y s se obtiene:

$$\frac{\Delta p_e}{\mu l \varepsilon_0} * t = R_m (1 - s) + \frac{l}{k(\varepsilon_0)} * \int_s^1 \frac{d\eta}{f_l(\varepsilon_0, \eta)} \quad (31)$$

La integral se puede calcular conociendo la permeabilidad relativa y ajustándola con alguna función, que es de tipo exponencial.

2.3. Efecto de la temperatura en la viscosidad del aire y agua y de la densidad del agua

La viscosidad y la densidad del agua y del aire (ver figuras 6,7 y 8) sufre cambios a diferentes valores de la temperatura. Por ello se hace necesario saber las fluctuaciones de sus valores, para lo cual se recurrió a la bibliografía y así obtener tablas de datos de estas propiedades en función de la temperatura con los cuales modelar matemáticamente estas propiedades con el fin de utilizarlas de manera automatizada en el análisis y estudios de los resultados.

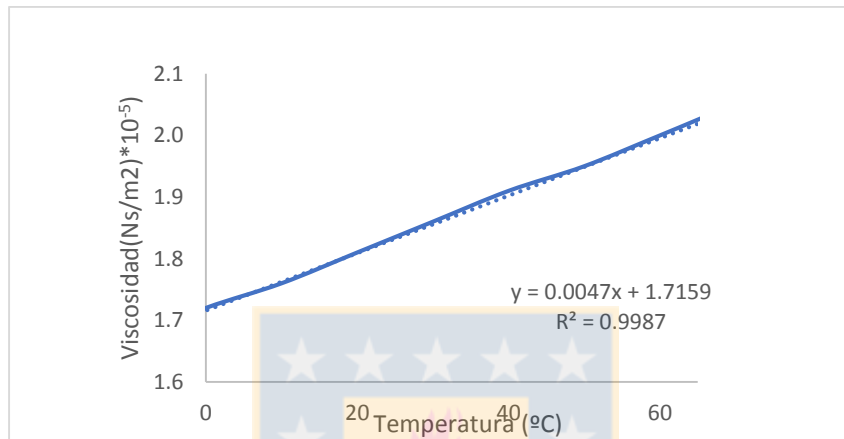


Figura 6: Gráfico viscosidad del aire versus temperatura. Haynes, WM (2014). Manual CRC de química y física . Prensa CRC.

De la figura 17, se obtiene la siguiente aproximación de la viscosidad del aire en función de la temperatura.

$$\mu_a = 0,0047 * T + 1,7159 \left(\frac{Ns}{m^2} \right) * 10^{-5} \quad (32)$$

En la figura 18 se muestra los valores de la viscosidad del agua desde 20 a 60 grados Celsius.

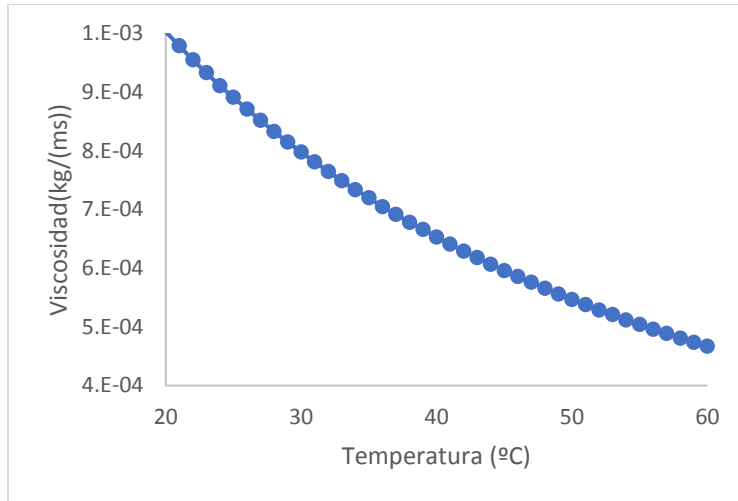


Figura 7: Viscosidad del agua en función de la temperatura

Se obtiene el siguiente modelo matemático

$$\mu_l = -5 * 10^{-4} * \ln(T) + 0,0025 \left(\frac{kg}{ms} \right) \quad 20 \leq T \leq 60 \quad (33)$$

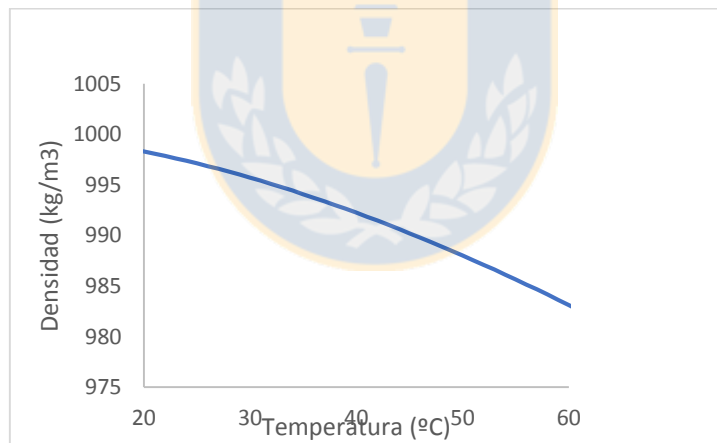


Figura 8: Densidad del agua en función de la temperatura

Se obtiene el siguiente modelo matemático:

$$\rho_l = -0,0036 * T^2 - 0,0762 * T + 1000,9 \quad 20 \leq T \leq 60 \quad (34)$$

2.4. OPERACIÓN

La mayoría de los equipos de filtración, sean continuos o discontinuos, trabajan en ciclos de formación del queque, lavado, secado y descarga:

- **Formación del queque:** La magnitud de material depositado en el medio filtrante depende del gradiente de presión, de la concentración de la suspensión y del tiempo de succión. En este ciclo hay un flujo continuo de filtrado a través del medio filtrante y del queque.
- **Lavado del queque:** La necesidad de lavar el queque depende del objetivo perseguido por el proceso de filtración. El lavado se efectúa para eliminar impurezas del queque o para recuperar líquidos valiosos. El lavado del queque implica calcular la cantidad mínima de agua necesaria para desplazar el líquido de los poros y el tiempo necesario.
- **Secado del queque:** Secado del queque es aquella etapa en que el agua retenida en los poros del queque es desplazada soplando aire o succionado aire de la atmósfera. Para controlar esta etapa es necesario conocer la cantidad de agua retenida en el queque. El criterio para seleccionar la humedad residual del queque es económico, cuando no es una restricción del equipo.
- **Descarga del queque:** El desprendimiento del queque y su descarga es de gran importancia para una operación eficiente. En el caso de filtración a vacío la descarga es muy simple y consiste en raspar las telas y eliminar el producto por gravedad. En el caso de filtración a presión, o filtración hiperbárica, la descarga se complica por la necesidad de mantener la presión en la cámara, de modo que es necesario tener válvulas que permitan presurizar y despresurizar la zona de descarga en ciclos controlados.

2.5. EQUIPOS DE FILTRACIÓN A PRESIÓN

Como se mencionó en el capítulo anterior, para que el fenómeno de filtración se lleve a cabo se debe aplicar un gradiente de presión al sistema, y dependiendo de cómo este se origine van a existir distintos equipos asociados, este capítulo se centrará en los equipos de filtración, que utilizan presión como fuerza impulsora.

La diferencia de los equipos que utilizan presión frente a otro tipo de equipos, por ejemplo, los que emplean vacío como fuerza impulsora, radica en que los equipos de filtración a presión deben usar mecanismos muchos más complejos, especialmente para las etapas de alimentación y descarga. Sin embargo, en los filtros a vacío está el problema de la limitación en el máximo gradiente de presión que se puede aplicar al proceso, el que está determinado por la presión atmosférica del lugar. Como las faenas mineras en Chile se encuentran en su mayoría a gran altitud, hacen que el gradiente de presión que se puede aplicar sea muy pequeño, lo que se traduce en menores rendimientos de los equipos y la obtención de queques de una humedad relativamente alta.

Otro hecho a considerar son los grandes y recientes avances tecnológicos en mecanismos y sistemas de control que se han introducido a los filtros a presión y que los han transformado en el producto preferido en la industria minera en la actualidad.

2.5.1. Filtro prensa de placas verticales

En los filtros de presión de placas verticales (ver figura 9) la separación toma lugar en cámaras formadas entre las superficies de drenaje de placas filtrantes moldeadas que se mantienen unidas entre sí. Estas placas poseen orificios para la alimentación de la pulpa y el drenaje líquido filtrado, las placas están fijas entre sí mediante una presión hidráulica, están montadas verticalmente sobre y entre dos barras laterales o suspendidas de vigas. Estas barras o vigas están conectadas en un extremo a un cabezal fijo o alimentador, mientras que por el otro extremo están conectados a un cabezal de cierre.

Las placas se comprimen entre sí mediante un arreglo de cierre de un pistón hidráulico en cuyo extremo se encuentra el cabezal móvil que empuja ordenadamente las placas contra el cabezal fijo, formando así una sola unidad filtrante compuesta por el grupo de placas de filtración.



Figura 9: Filtro de placas verticales Fernando Concha A.. (2005). Solid–Liquid Separation in the Mining Industry. Concepción, Chile: Springer.

2.5.2. Filtro Prensa de Placas Horizontales.

El filtro de prensa de placas horizontales (ver figura 10) es un filtro a presión semi-continuo de gran popularidad dentro de las empresas mineras. Las características que lo hacen atractivo para el proceso de filtración de concentrados de cobre son su gran capacidad y la posibilidad de obtener concentrados con baja humedad.

Este filtro consiste básicamente en una cámara filtrante horizontal situada dentro de un marco de estructura principal. Por su forma de diseño permite la incorporación de cámaras adicionales montadas unas sobre otras, permitiendo incrementar el área de filtración sin generar un aumento en el área de piso de la instalación.

Cada una de estas cámaras de filtración posee sellos inflables en ambos extremos, los que se dilatan durante la operación para sellar la cámara. Las cámaras se encuentran fijadas a la estructura y no poseen movimiento durante la operación de filtrado.

Cada cámara posee una correa filtrante montada sobre un rodillo impulsor en cada extremo, operando independientemente de las otras correas que posee el equipo. Cada rodillo posee un motor hidráulico que acciona la correa durante la operación de descarga del queque. En la parte superior de cada cámara se encuentra instalado un diafragma de goma flexible que es utilizado para comprimir la suspensión y el queque, siendo éste el encargado de formar y reducir la humedad del queque.



Figura 10: Filtro Larox Fernando Concha A.. (2014). Solid-Liquid Separation in the Mining Industry. Concepción, Chile: Springer.).

2.6 Conceptos fisicoquímicos aplicables a la filtración.

Los conceptos fisicoquímicos que poseen mayor relevancia para el estudio son la tensión superficial, fuerza capilar y ángulo de contacto y serán descritos a continuación.

2.6.1. Tensión superficial.

Se define la tensión superficial (ver figura 11) como la fuerza que ejerce un líquido sobre una determinada superficie debido a la existencia de una atracción no compensada hacia el interior de este sobre las moléculas individuales de la superficie del líquido.

Una partícula dentro de un fluido será sometida a la acción de fuerzas de atracción por parte de las partículas vecinas, estas fuerzas son pequeñas, del tipo Van der Waals. Una molécula al interior de la solución será atraída en todas las direcciones, por lo que las fuerzas ejercidas por las partículas vecinas se anulan entre sí y se tiene una fuerza resultante nula (Lewis, 1993). Debido a que las partículas de la superficie se encuentran rodeadas sólo por una cierta cantidad de partículas de fluido,

existe una fuerza resultante neta hacia el interior del fluido, que es a la que se hace mención en el párrafo anterior. En esta condición se dice que la superficie del líquido se encuentra en un estado de tensión, y será necesario trabajo para extender la superficie o para que una partícula escape de la superficie, por ejemplo, por evaporación. Por consiguiente, estas fuerzas actúan en la superficie intentando minimizar su área, a estas fuerzas se les conoce como fuerzas de tensión superficial y dependerán del fluido del que se trate.

La tensión superficial se entiende, entonces, como la fuerza por unidad de longitud que actúa sobre una determinada superficie y que atrae las partículas de la superficie del fluido al interior de este. Las unidades de medida más utilizadas son newton por metro (N/m) o dinas por centímetro (dyn/cm).

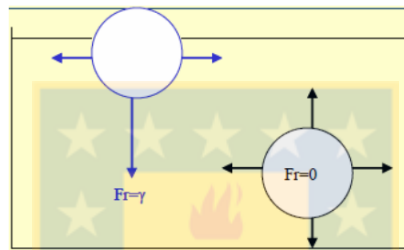


Figura 11: representación de desbalance de fuerzas en la superficie del líquido.

2.6.2. Angulo de contacto.

Cuando un líquido se encuentra en contacto con un sólido (ver figura 12), es importante saber si el líquido es capaz o no de mojar al sólido bajo ciertas condiciones. Para ello es de vital importancia analizar el ángulo de contacto generado por el contacto de estas fases, el cual se define como: el ángulo formado por el plano de la superficie del sólido y un plano tangente a la superficie de los fluidos involucrados, por ejemplo, aire y agua, en algún punto sobre la línea de contacto de las tres fases

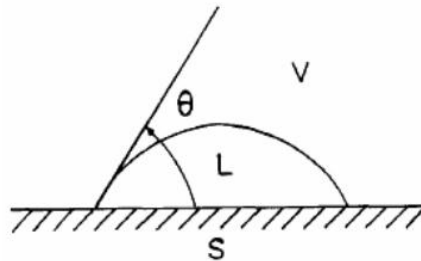


Figura 12: ángulo de contacto entre un sistema sólido, líquido, vapor.

Dependiendo del valor del ángulo de contacto (ver figura 13), se puede tener las siguientes situaciones:

- a) Mojado total: para valores de ángulo de contacto de 0° , la gota de líquido se extiende perfectamente sobre el sólido y se dice que el mojado es total. Ej. Aire, vidrio, agua.
- b) Mojado parcial: ángulo de contacto entre 0° y 180° . El líquido moja parcialmente al sólido.
- c) Secado total: ángulo de contacto de 180° . El líquido no moja el sólido, decimos que el secado es total o completo. Ej. Agua, aire, teflón.

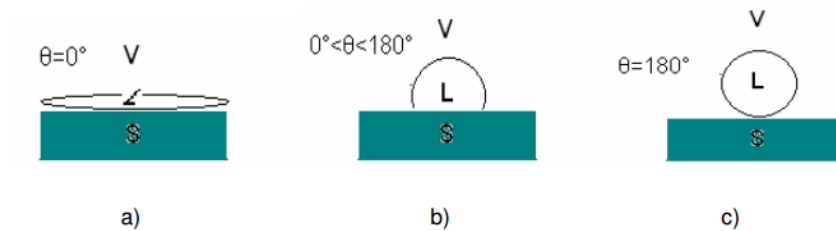


Figura 13: tipos de mojado, total, parcial, secado, para un sistema sólido-líquido-vapor.

Según Thomas Young (1805) (ver figura 14), en ausencia de gravedad o despreciando sus efectos, el ángulo de contacto se puede determinar conociendo las tensiones superficiales de las tres interfaces que se encuentran en la línea de contacto formada entre la gota y el sustrato (sólido-líquido, sólido-vapor, líquido-vapor). La forma de obtener esta relación es realizando un balance de fuerzas en el equilibrio, para las componentes que actúan en el eje paralelo a la superficie sólida.

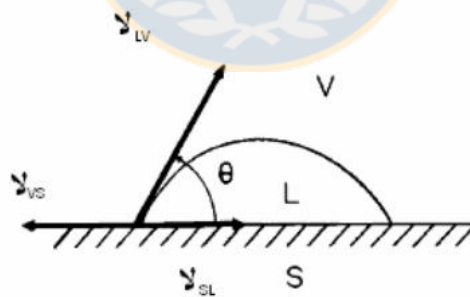


Figura 14: Balance de fuerza.

Del balance de fuerzas, se tiene entonces:

$$\gamma_{vs} = \gamma_{sl} + \gamma_{lv} * \cos \theta \tag{35}$$

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{vs} - \gamma_{sl}}{\gamma_{lv}} \tag{36}$$

2.6.3. Capilaridad.

Al introducir en un capilar un líquido, este asciende o desciende por el mismo. A este fenómeno lo denominamos capilaridad (ver figura 15), y está determinado por las interfaces que limitan la columna del líquido y que forman el ángulo de contacto descrito en el punto anterior.

Teniendo en cuenta que la fuerza capilar es $\gamma_{lg} * \cos \theta * \pi * d$

La presión capilar será:

$$p_c = 4 * \gamma_{lg} * \cos \theta * \frac{1}{d} \quad (37)$$

De la ecuación 37 se tiene que un aumento en el ángulo de contacto provocará una disminución de la presión capilar y, por lo tanto, se necesitará menor presión para eliminar el agua del capilar además la disminución del diámetro del capilar o poro provocará un aumento de la presión capilar.

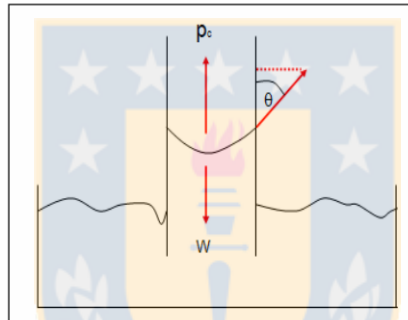


Figura 15: representación capilar

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1. Equipamiento experimental

El equipo utilizado en el desarrollo de este trabajo es el Filtraset cuya característica principal es trabajar a presiones de entre 0 a 10, además de presentar una innovación que permite controlar la temperatura del aire de soplado entre 20 a 60 ° Celsius por lo que es posible simular prácticamente cualquier proceso de filtración a presión o vacío. Para medir el flujo de aire se dispone de un flujómetro digital, cuya presión se regula y mide mediante un manómetro digital.

El equipo está conectado a una balanza digital que mide el aumento de masa del filtrado en el tiempo, y cuyos datos junto al flujómetro son enviados a un computador portátil que registra estos datos a cada instante por medio de un software especialmente diseñado para el equipo. Dependiendo de la precisión que se requiera, el intervalo de tiempo entre cada medición puede ser incluso inferior a 1segundo. El programa está diseñado para registrar los datos y almacenarlos en una planilla Excel.

3.1.1. Secciones Filtraset

El equipo Filtraset se compone por diferentes piezas y equipos individuales los cuales fueron integrados para construirlo, siendo presentados en la figura 16, además de una breve descripción de su función:

- Calentador de aire pack 6000x sago (1): permite el calentamiento del aire para el sistema desde 20 a 60 grados celsius.
- Sensor de humedad y temperatura (2): medir temperatura y humedad del aire a la salida del calentador.
- Válvula de alivio con silenciador (3): permite/impide el paso del aire a la cámara de filtración.
- Regulador de presión (4): permite la regulación de la presión al interior de la cámara de filtración.
- Válvula de alivio (5): permite la correcta operación del calentador de aire.
- Manómetro digital (6): entrega el valor de la presión al interior de la cámara de filtración y en la línea de alimentación a esta. desde 0 a 10 bar.
- Flujómetro digital (7): entrega el valor de flujo desde 0.05 a 10 m³/s.
- Cámara digital (8): permite conocer el nivel del agua al interior de la cámara de filtración.
- Caja eléctrica (9): energizar y conectar el sistema eléctrico.
- Balanza digital (10): registra la masa de agua extraída.

- Cámara de filtración (11): sección donde se carga la pulpa.
- Vaso de filtración (12): sección inferior del cámara de filtración, permite la formación del que queque.
- Línea de alimentación aire (13): suministra el aire al sistema.
- Válvula 2 (14): permite la medición diferenciada del manómetro.
- Válvula de purga (15): permite regular el flujo de aliemntacion de aire

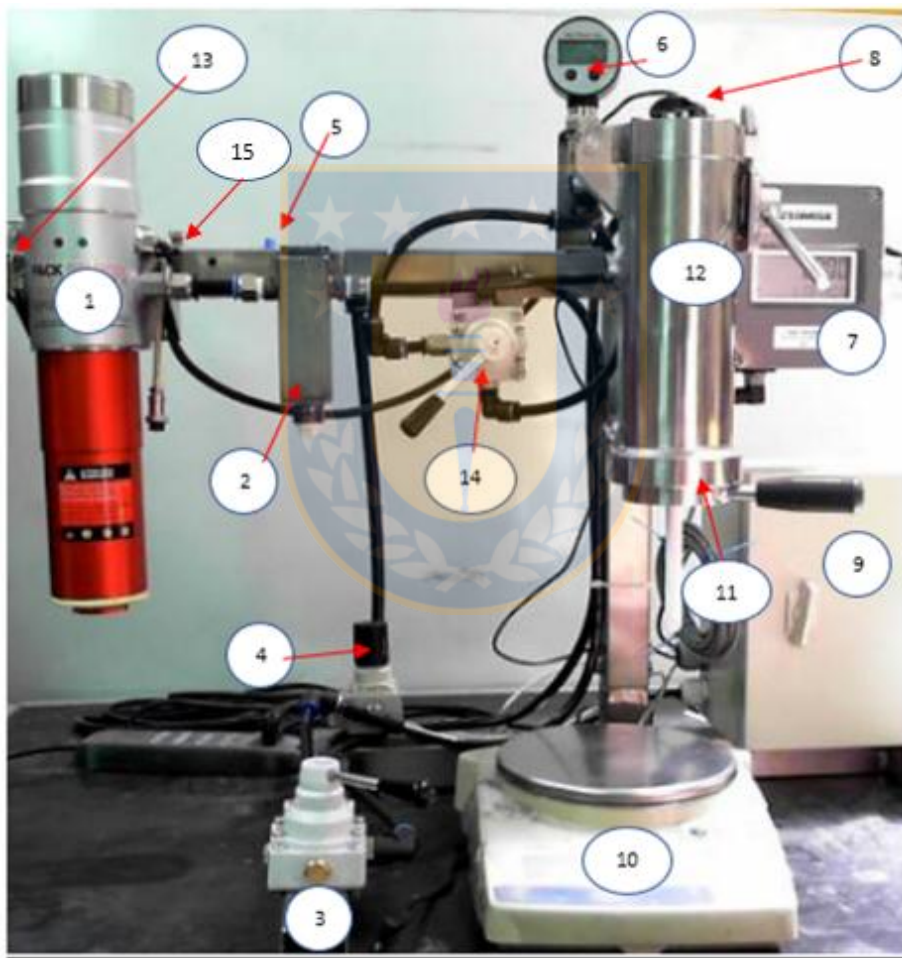


Figura 16: Partes generales equipo filtraset.

3.1.2. Sub-Componentes

3.1.2.1. Calentador de aire PACK 6000X

Es un equipo diseñado por la empresa española Sagola, (ver figura 17) diseñado principalmente para calentar el aire entre 20 a 70 °Celsius, pero por razones de seguridad se recomienda hasta 60 °C, dentro de sus especificaciones generales se encuentran:

- Es apto para calentar el aire comprimido con cualquier fin industrial.
- Presión máxima de 7 bar de aire.
- Comprimido seco y limpio (en base al tratamiento previo del aire comprimido).
- Consumo mínimo de 150 L/min. y un máximo de 750 L/min.
- Temperatura máxima de 70 °C.



Figura 17: Calentador de aire PACK 6000X

Indicaciones de uso:

- Pilotos rojo (1): indica que el equipo esta calentado el aire.
- Piloto verde (2): indica que la temperatura del aire alcanzo la temperatura de setpoint
- Botón 1 (3): aumenta la temperatura de setpoint
- Botón 2 (4): disminuye la temperatura de setpoint
- Interruptor (5): enciende (arriba) o apaga (abajo) el calentador.
- Pantalla a (6): indica la temperatura actual de la temperatura en grados celsius.
- Pantalla b (7): indica la temperatura de setpoint en grados celsius.

3.1.2.2. Válvula de Purga

La válvula de purga, (ver figura 18) es fundamental en el correcto funcionamiento del equipo Filtraset, especialmente en la operación del calentador, ya que al realizar pruebas de filtración no se alcanza el caudal mínimo necesario para operar el calentador, por lo que se recomienda abrir esta válvula para pruebas con temperatura de soplado mayores a 30 °C. Además, permite la regulación del flujo de aire de alimentación. Esta válvula se encuentra abierta cuando se comienza a girar en el sentido horario, a la vez tiene la característica de asemejarse a un tornillo, lo que le permite poseer diferentes puntos de operación.



Figura 18: Válvula de purga

3.1.2.3. Válvula de alivio

Esta válvula, (ver figura 19) es esencial para el correcto funcionamiento del Filtraset ya que permite abrir o cerrar el paso de aire hacia la válvula de purga siendo una válvula ON/OFF.



Figura 19: Válvula de alivio

3.1.2.4. Válvula de alivio con silenciador

Esta válvula (ver figura 20) permite el paso de aire hacia la cámara de filtración y su modo de uso es descrito en el párrafo siguiente

Posición A: impide el paso de aire a la cámara de filtración

Posición B: permite el paso del aire a la cámara de filtración



Figura 20: Válvula de alivio con silenciador

3.1.2.5. Regulador de presión

Es fundamental para el funcionamiento, ya que permite establecer la presión de trabajo requerida mediante sus movimientos serán descritos en la figura 21.

- Movimiento horario: disminuye la presión de la cámara de filtración
- Movimiento antihorario: aumenta la presión de la cámara de filtración

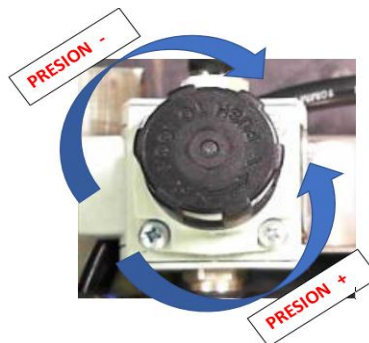


Figura 21: Regulador de presión

3.1.2.6. Válvula 2

Esta válvula (ver figura 22) permite tener lecturas de la presión existente en la línea de alimentación y en la cámara de filtración mediante los siguientes movimientos:

- Posición A: permite la medición de la presión en la línea de alimentación a la cámara de filtración.
- Posición B: permite la medición de la presión en la cámara de filtración.

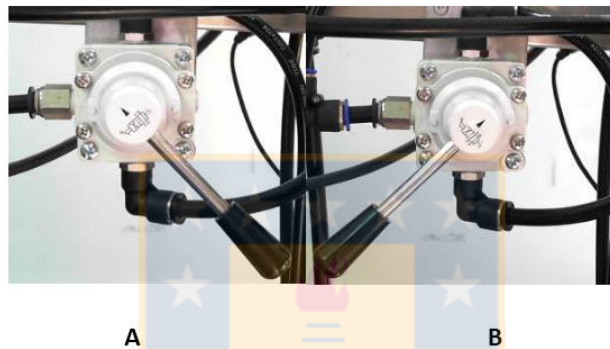
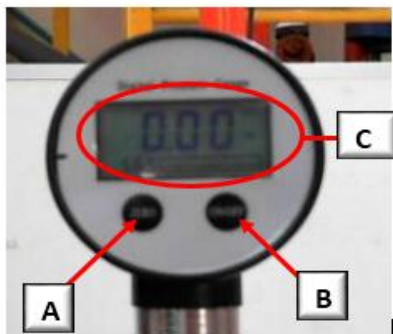


Figura 22: Válvula 2

3.1.2.7. Manómetro digital

Esta pieza (ver figura 23) cumple un papel fundamental ya que permite la lectura de la presión ejercida en el interior de la cámara de filtración, además de ser un equipo versátil ya que permite obtener la lectura de la presión en Bar, Atmosferas, PSI y Pascales. Sus indicaciones de uso son descritas a continuación:



- A: Botón tare/cambio de unidad (mantener presionado)
- B: Botón de encendido/apagado
- C: Lectura de la presión

Figura 23: Manómetro digital

3.1.2.8. Vaso de filtración

En esta parte de la cama de filtración, ocurre la formación del queque, posee dos partes, la inferior donde se encuentra la tela filtrante y la superior donde se forma el queque. Sus partes son descritas a continuación y en la figura 24

- A) Parte inferior: ocurre la filtración del agua
- B) Parte superior: ocurre formación del queque

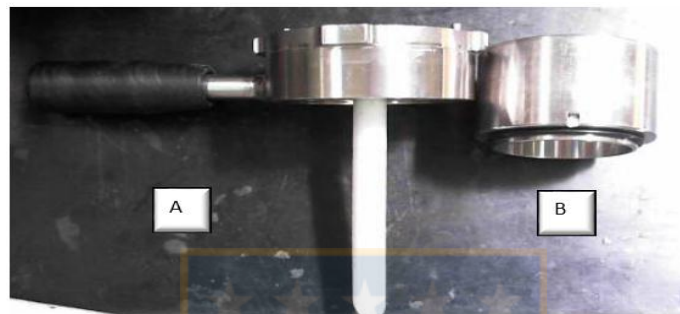


Figura 24: Vaso de Filtración

3.1.2.9. Partes vaso de filtración

El vaso de filtración es la parte inferior de la cámara de filtración, se compone de diferentes accesorios los cuales se observan en la figura 25.



- A) Parte superior
- B) Soporte del vaso
- C) Tela filtrante
- D) Fondo falso
- E) Fondo con canaleta de recolección de agua

Figura 25: Partes del vaso de filtración

3.2. Procedimiento

Es fundamental del correcto uso del equipo Filtraset para evitar pérdidas de pulpa, fallas en el calentador de aire, errores en la medición de presión y masa de filtrado, por ello se describe a continuación paso a paso el uso del equipo.

- 1) Preparar pulpa de alimentación la cual debe poseer como mínimo 100 cm³ y como máximo 500 cm³. Con porcentaje en peso establecido.
- 2) Iniciar el ordenador ingresando los valores de operación en el menú principal.
- 3) Encender el calentador subiendo el interruptor.
- 4) Establecer temperatura de setpoint .
- 5) Regular válvula de pruga.
- 6) Abrir válvula 3.
- 7) Posicionar la válvula 2 en A y regular la presión de alimentación establecida para realizar la prueba.
- 8) Verter la pulpa al interior de la cámara de filtración.
- 9) Cerrar y sellar cámara de filtración (posición B cerrada y posición C cerrada y sellada).
- 10) Posicionar válvula 2 en B para medir la presión de la cámara de filtración.
- 11) Posicionar la válvula 1 en B para alimentar aire a la cámara de filtración y presionar inicio de prueba en el programa. (inicio etapa de formación).
- 12) Observar la imagen de la webcam para determinar el fin de la etapa de formación de queque (termino de espejo de agua).
- 13) Posicionar la válvula 1 en A para cortar la alimentación de aire a la cámara de filtración y presionar botón “fin formación”.
- 14) Posicionar la válvula 2 en A, para modificar la presión de alimentación para la etapa de soplado.
- 15) Posicionar la válvula 1 en b para alimentar aire a la cámara de filtración y presionar botón “datos continuos”.
- 16) Ejecutar etapa de soplado hasta que acabe el tiempo estipulado.
- 17) Posicionar la válvula 1 en A para cortar la alimentación de aire a la cámara de filtración y presionar boton “fin etapa de soplado”
- 18) Presionar botón termino de prueba para guardar los datos y generar archivo excel.
- 19) Apagar el calentador de aire y cerrar válvula 3.
- 20) Sacar vaso de filtración.

- 21) Medir espesor del queque.
- 22) Masar queque húmedo.
- 23) Limpiar vaso de filtración, extrayendo la tela de filtración.
- 24) Colocar vaso de filtración.
- 25) Secar queque en horno a baja temperatura (~60°C).
- 26) Registrar la masa del queque seco.

3.3. Muestreo y caracterización de mineral

Las muestras usadas para el desarrollo de las experiencias corresponde a relaves de procesos mineros.

3.3.1 Analisis granulométrico

La distribución de tamaño de partícula es una característica del sólido que cobra importancia en el proceso de filtración, puesto que es determinante en el tipo de empaquetamiento del queque y, por ende, en la respuesta de filtración de la pulpa además de la calidad y tamaño de los poros formados.

Para determinar la distribución de tamaño de partícula, se realizó un análisis granulométrico por difracción láser a cada una de las muestras, para esto se utilizó el equipo Helos-Rhodos de Sympatec, perteneciente al DIMET, con alícuotas de sólido seco.

3.4. Pruebas de filtración con aire caliente

Las pruebas experimentales de filtración se llevaron a cabo en el equipo Filtraset, cuyo manejo permite establecer el proceso de filtrado en las dos etapas fundamentales descritas en el Capítulo 2, a saber, formación de queque y soplado de queque. Se excluyen las etapas de alimentación de pulpa y descarga de queque puesto que estas etapas son realizadas manualmente por el operador del equipo. La primera consiste en la aplicación de presión a la pulpa a través de aire inyectado a la celda, de manera de desplazar el agua sobrenadante en la misma y formar el queque, la etapa termina cuando no queda líquido en la superficie del queque formado y este se encuentra completamente saturado. La segunda etapa corresponde al soplado de aire sobre el queque, para desplazar el agua contenida en los poros, como en cualquier otro equipo de filtración, se realiza por un tiempo fijado, o hasta que se cumpla algún otro criterio determinado.

Como ya se ha señalado, el fin de la etapa de formación de queque corresponde al momento en que ya no hay líquido sobrenadante en el queque y este se aprecia seco en su superficie, esto puede observarse gracias a una cámara instalada en la parte superior de la celda.

3.4.1. Pruebas experimentales.

Para el desarrollo de las pruebas se estableció 3 bar de presión de formación de queque, la etapa de formación acabaría cuando el espejo de agua haya desaparecido, además de utilizar 5 temperaturas distintas las cuales son 20, 30, 40, 50 y 60 °C. Encontrándose dos tipos de experimentaciones:

- Pruebas de capilaridad
- Pruebas de permeabilidad

Por último, se decidió trabajar con el mismo porcentaje de sólido en todas las pruebas, además de utilizar 120 y 180 gramos de sólido y agua lo que equivale a trabajar con 50 % en sólido.

De esta forma se obtiene las siguientes pruebas (ver tablas 2, 3, 4):

Tabla 1: Diseño pruebas de capilaridad

Pruebas de Capilaridad	
Pruebas	Temperatura °C
1	20
2	30
3	40
4	50
5	60

Tabla 2: Diseño pruebas de permeabilidad

Pruebas de Permeabilidad			
Pruebas	Presión formación	Presión soplada	Temperatura °C
1	3	4	20
2	3	4	30
3	3	4	40
4	3	4	50
5	3	4	60
6	3	5	20
7	3	5	30
8	3	5	40
9	3	5	50
10	3	5	60
11	3	6	20
12	3	6	30
13	3	6	40
14	3	6	50
15	3	6	60

Por otro lado, durante el trabajo de experimentación, se observó que al modificar la abertura de la válvula de purga se obtenían resultados diferentes en la etapa de soplado (es similar a un tronillo), por lo que se determinó designar la abertura de esta válvula como una variable de operación, naciendo de esta manera una variable cualitativa y se consideraron tres posiciones distintas de la válvula. Como el efecto solo insidó en los resultados de la etapa de soplado, se desarrolló el siguiente diseño experimental, donde se realizó la etapa previa de formación, con 180 g de sólido, 180 g de agua, presión de formación 3 bar, presión de soplado 5 bar.

- Condición 1: corresponde la posición inicial de la válvula de purga en que se desarrollaron la mayor parte de las pruebas.
- Condición 2: corresponde a la segunda posición de la válvula de purga, y se aumentó medio giro la abertura en comparación a la condición 1
- Condición 3: corresponde a la segunda posición de la válvula de purga, y se aumentó un giro la abertura en comparación a la condición 1

Tabla 3: Diseño experimental Abertura de la Válvula de purga, donde la condición indica aberturas distintas de la válvula de purga

Abertura Válvula de purga	temperatura (°C)
condición 1	20
condición 1	30
condición 1	40
condición 1	50
condición 1	60
condición 2	20
condición 2	30
condición 2	40
condición 2	50
condición 2	60
condición 3	20
condición 3	30
condición 3	60

Las pruebas de capilaridad se realizaron por duplicado al igual que las pruebas de permeabilidad y se utilizó el siguiente algoritmo:

- Pruebas de capilaridad

Se masaron 120 g de mineral y 120 g de agua y se midió la temperatura del agua, luego se formó la pulpa, dejando 20 g de agua para limpiar las paredes del vaso de precipitado y se agito la pulpa durante 5 minutos, cuidando no derramar. Pasado estos 5 minutos se vertió la pulpa en la cámara de filtración (cuidar que no queden restos de pulpa en el vaso de precipitado y paredes de la cámara de filtración), sellar la cámara de filtración, tarar la balanza y dar inicio la etapa de formación con 3 bar de presión hasta que se acabe el espejo de agua. Una vez terminada se reportó la masa de filtrado y seteó el calentador en la temperatura elegida (se utilizó 20, 30, 40 y 50 °C para el desarrollo de las

pruebas, no se logró trabajar con 60 °C ya que el equipo sufría daños) y para el manómetro en 0.5 bar de presión para dar inicio a la etapa de soplado hasta acabar el goteo o hasta alcanzar un goteo constante de una gota por cada dos minutos y reportar la masa de filtrado obtenido. Luego repitió lo anterior, pero se aumentó la presión en 0.5 bar hasta llegar a dos 2 bar, luego se aumentó 1 bar hasta llegar a 6 bar de presión. cuando acabo este proceso, se extrajo el queque y se contabilizo su altura y masa, por ultimo seco durante 24 horas y maso el queque seco para realizar los cálculos necesarios. Cada prueba tuvo una duración superior a dos horas.

- Pruebas de permeabilidad

las pruebas de permeabilidad se componen de dos etapas: formación de queque y soplado. Hasta la etapa de formación se procedió de la misma forma de las pruebas de capilaridad, además de utilizar 120 y 180 g de mineral y agua, la utilización de cámaras digitales para realizar el análisis de datos de cada prueba y el seteo el calentador en la temperatura elegida al inicio de la etapa de formación posicionando en “ON” la válvula de alivio (se utilizó 20, 30, 40,5y 60 °C). Una vez terminada la etapa de formación, se seteo el nanómetro en 4, 5 y/o 6 bar (dependiendo de la prueba), solando por un tiempo determinado (ya que al utilizar el criterio del goteo constante la prueba se prolonga en el tiempo y dañar al calentador). Cuando termino la prueba de soplado se extrajo el queque, midiendo su altura y masa y llevado al horno de secado durante 24 horas paras más tarde medir la masa del queque seco para realizar los cálculos pertinentes. Para el caso del cambio de posición de la válvula de purga, esta modificación se realizó al inicio de la etapa de formación siendo el único cambio en la operación del equipo

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Caracterización del mineral

4.1.1. Análisis granulométrico

El análisis granulométrico es esencial para determinar el tamaño característico d_{80} , pero en el proceso de filtración, además de conocer este valor es necesario conocer el contenido de finos, partículas cuyos tamaños son menores $10\mu\text{m}$ $50\mu\text{m}$, debido a que estas partículas determinan el empaquetamiento del queque en la filtración, debido que estas se depositan en las cavidades dejadas por las partículas más grandes.

Se observa en la figura 28 y tabla 5 que el mineral utilizado es un material fino, debido a que existe un 87,61 % de partículas con un tamaño menor a 50 micras y 55,73% menor a 10 micras. Además, se observa que el mineral utilizado posee 4 modas.

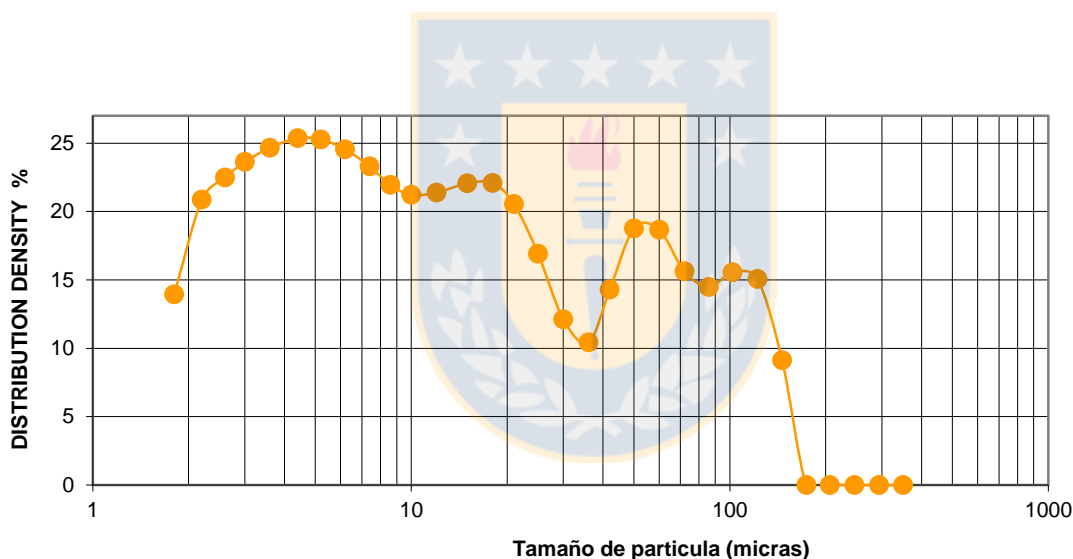


Figura 26: Gráfico distribución de tamaño de partícula.

Tabla 4: Resultados de interés del análisis granulométrico.

Tamaño	Micras
d_{80}	33,41
d_{50}	7,67
d_{10}	1,33
Porcentaje < $10\mu\text{m}$	55,73%
Porcentaje < $50\mu\text{m}$	87,61%

4.2. Pruebas de filtración

Antes de comenzar a discutir los resultados se debe exponer ciertos aspectos los cuales juegan un papel fundamental en el desarrollo de las pruebas experimentales y en el análisis de ellos que se describen en el siguiente apartado adicionalmente en el anexo se describirán los ejemplos de cálculo en la obtención de los resultados (ver anexo 7.1)

Condiciones experimentales

Algunos aspectos adicionales a considerar en el análisis de los resultados son la temperatura del agua de filtrado, balances de agua y solido durante la etapa de filtración, tiempo de soplado, resultados teóricos y experimentales y conceptos fisicoquímicos.

- **Tiempo de respuesta:** las respuestas obtenidas al finalizar cada prueba corresponden valores de gramos de filtrado en función del tiempo, correspondientes a tablas de datos.
- **Tiempo de filtración:** se define como el tiempo al cual el queque alcanza una determina saturación y humedad residual, en la práctica operacional del estudio se dividió el tiempo en dos partes, el tiempo de formación el cual se define como el tiempo en que se acaba el espejo de agua, el cual no se puede modificar y manipular, y el tiempo de soplado el cual se fijó y no tuvo variaciones (ver tabla 5)

Tabla 5: Tiempo de soplado para las diferentes condiciones de presión, masa sólido y líquido.

Presión	Masa sólido	Masa líquido	Tiempo (minutos)
4	120	120	6
6	120	120	2
5	120	120	4
5	180	180	10

- **Temperatura del agua:** durante el desarrollo de las diferentes pruebas que la temperatura del agua fue medida al inicio y termino de cada prueba, registrando aumentos de 0.5 a 1.5 °C, no superando los 17 ò 19 °C, lo que indica que el tiempo de contacto con el aire precalentado no es suficiente para calentar el agua y lograr evaporación. Además, esta diferencia no afecta la propiedad del agua como viscosidad y densidad, por lo tanto, se consideró que la temperatura del agua permanecía constante y correspondería al valor inicial que se registró al iniciar la prueba.
- **Balance de agua:** el balance de masa del agua se consideró de la siguiente manera:

$$mH_2O_{inicial} = mH_2O_{filtrado} + mH_2O_{queque} + pérdidas$$

donde:

$m_{H_2O_{inicial}}$: masa de agua al inicio de la prueba, correspondiente a 120 o 180 g dependiendo del caso

$m_{H_2O_{filtrado}}$: masa de agua que corresponde al filtrado obtenido al término de la etapa de soplado.

$m_{H_2O_{queque}}$: masa de agua que queda en el interior del queque al término de cada prueba, corresponde a la humedad residual.

pérdidas: las pérdidas corresponden a la masa de agua que permanece en las paredes del recipiente donde se preparó la pulpa y en la pared de la cámara de filtración, además de las pérdidas provocadas durante la agitación de la pulpa. La evaporación no se consideró como pérdidas debido al bajo aumento de la temperatura que sufrió el agua durante el desarrollo de cada prueba.

En todos los casos las pérdidas luego de sacar el queque estas correspondían entre 1 a 2 g de agua.

- **Pruebas de tensión superficial:** este tipo de pruebas no se realizaron ya que se tomó la decisión entre el experimentador y tutor que no era una variable significativa para este estudio.
- **Balance de sólido**

El balance de masa del sólido se consideró de la siguiente manera:

$$m_{sólido\ inicial} = m_{sólido\ en\ queque} + pérdidas$$

donde:

$m_{sólido\ inicial}$: masa de sólido medida al inicio de la prueba, correspondiente a 120 o 180 g dependiendo de cada prueba.

$m_{sólido\ en\ queque}$: masa de sólido que corresponde al queque obtenido después de terminada la filtración y el secado.

pérdidas: las pérdidas corresponden a la masa de sólido que permanece en las paredes del recipiente donde se preparó la pulpa, en las paredes de la cámara de filtración y en la bandeja donde fue vertido para ser secado, además de las pérdidas provocadas durante la agitación de la pulpa.

En todos los casos las pérdidas luego de sacar el queque estas correspondían entre 1 a 2 g de sólido.

Tipo de análisis: se utilizó dos tipos de análisis teórico y experimental ya que para los resultados de la etapa de soplado se requería cuantificar de forma exacta los resultados. De esta manera se modeló matemáticamente los resultados de saturación y humedad residual obtenidos en función del siguiente tipo $f(t) = \sim sat$, para los casos de pruebas de capilaridad y formación solo se utilizaron resultados experimentales. Por otro lado, para obtener el punto de operación óptimo se fijó para cada set la prueba realizada a 20 °C ya que esta prueba en la práctica se acerca de mejor manera al funcionamiento actual de las plantas de filtración en la minería, de esta forma se comparó esta prueba con las restantes y la variación obtenida se expresó en porcentaje, siendo el caso favorable una variación porcentual negativa e ídem para el caso opuesto y una variación.

4.2.2. Pruebas de capilaridad

Dentro del programa de pruebas, se decidió realizar primero las pruebas de capilaridad para conocer la saturación residual y humedad que deberían tener las pruebas de filtración y por consenso con el tutor y experimentador.

En la figura 37 y tabla 10, se observa que las pruebas de saturación residual se obtuvo valores entre 0,334 como mínimo y 0,376 como máximo para 40 y 20 °C respectivamente. De estos resultados la curva de 40 ° C indica que la máxima extracción de líquido del queque se logra a esta temperatura y una mejora del 11,2%, respecto a la saturación de la prueba a 20 ° C seguida de la prueba a 30° C la mejora corresponde a un 7 %. Por otro lado, las pruebas a 50 y 20 °C corresponde a las respuestas de menor extracción de fluido desde el queque. Debido a que la diferencia entre los valores obtenidos varía entre 7 a 11% se podría asumir que esta diferencia se debe al error experimental de cada prueba. La discusión y explicación de estos resultados se realizará en el siguiente apartado.

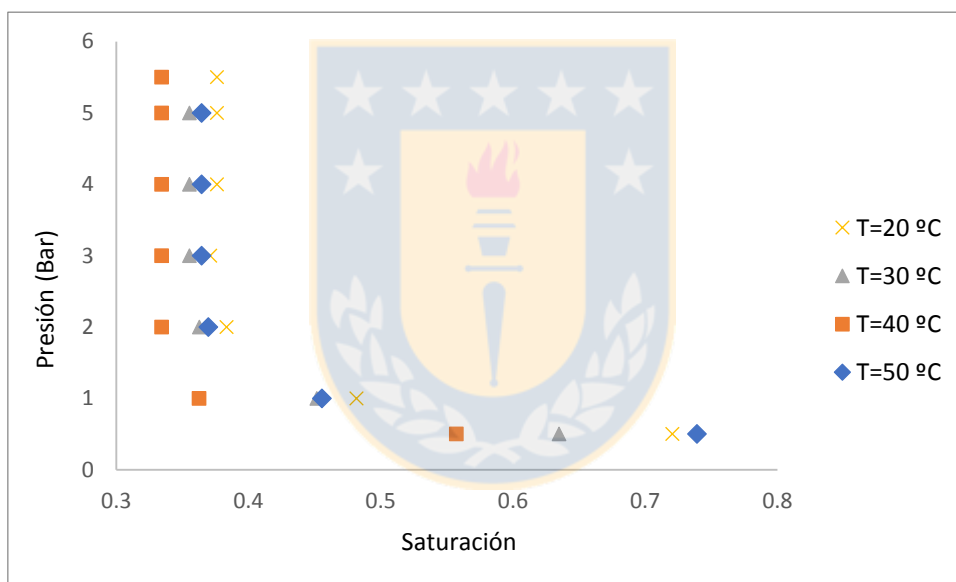


Figura 27 : Curva de Capilaridad para distintas temperaturas.

Tabla 6: Saturación residual

Prueba	Saturación residual
P-20°C	0,376
P-30°C	0,355
P-40°C	0,334
P-50°C	0,365

4.2.3. Pruebas de filtración

Como se mencionó anteriormente para las pruebas de formación y soplado, se utilizó 5 temperaturas diferentes y 3 presiones diferentes, además se fijó una presión de formación de 3 bar y se mantuvo para todas las pruebas. Cada una de las pruebas se realizaron por duplicado.

4.2.4. Pruebas etapa de formación

En la Figura 28 se muestran las gráficas de la etapa de formación de queque para las pruebas de 120 g de sólido, 120 g de agua, 3 bar de presión de formación y la temperatura del aire en 20, 30, 40, 50 y 60 °C, y en tabla 7 los valores promedio de la permeabilidad del medio k_m , obteniendo como valor promedio $3,21 \cdot 10^{-4}$ (cm²), y comparados con este valor promedio los valores de k_m varían entre 2,39 y 8,3 % lo que indica que k_m es independiente de la temperatura, al igual que el tiempo de formación hay diferencias notorias en la resistencia del medio R_m debido a que para cada conjunto de prueba de las misma temperatura y presión se utilizaba el mismo medio filtrante y para las pruebas de 5 bar fueron realizadas con un medio filtrante diferente a las primeras.

La permeabilidad k_m es independiente de la temperatura, ya que en esta etapa no hay contacto directo con el flujo de aire por lo que teóricamente las pruebas son realizadas a temperatura ambiente y en todos los casos es la misma.

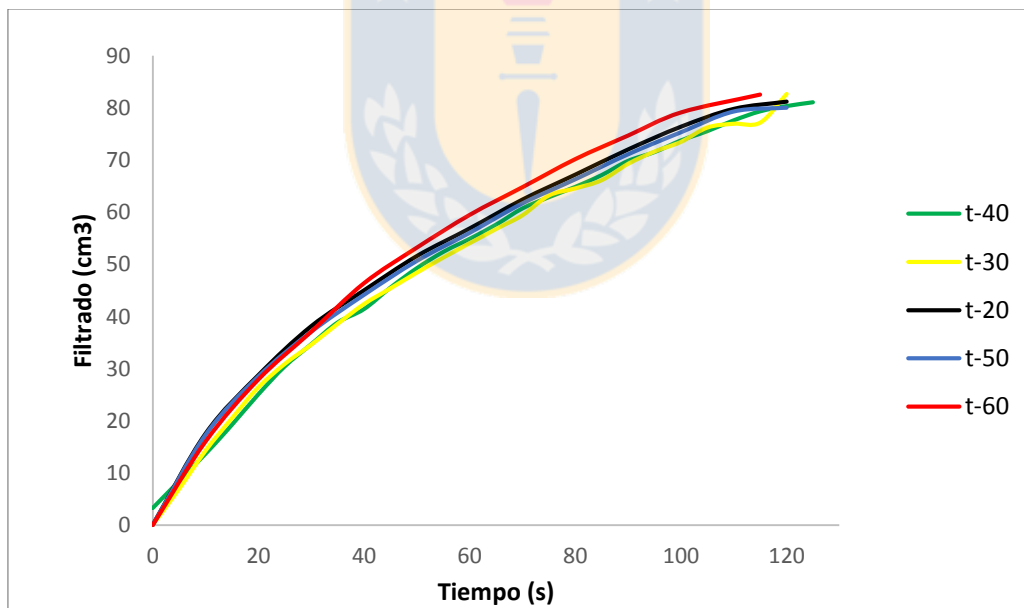


Figura 28: Tiempo etapa de formación, presión de formación 3 bar, masa de sólido 120g masa de agua 120 g.

Tabla 7: Resultados promedio pruebas de formación

Prueba	K _m promedio (cm ²)	R _m promedio (cm ⁻¹)	Tiempo promedio (s)
P-20 °C	3.13E-04	2594	113
P-30 °C	3.39E-04	3107	122
P-40 °C	3.16E-04	2768	122
P-50 °C	3.05E-04	2688	112
P-60 °C	3.21E-04	2544	118

4.2.2. Pruebas de soplado

Para realizar un análisis acabado se recurrió a dos tipos de análisis: el análisis experimental el cual corresponde al estudio de las gráficas saturación vs tiempo o humedad vs tiempo (ver figuras 29 a 32), pero como para esta etapa es interesante saber el tiempo en que se alcanza cierta saturación o humedad residual por esto no basta solo con analizar los curvas de saturación o humedad, ya que se puede observar las diferencias y analizar que temperatura es mejor en términos de tiempo, pero no se puede cuantificar dichas diferencias (análisis teórico ver tablas 12 a 15), por esta razón se debe simular o modelar la experiencia y determinar constantes las que se utilizan para determinar dicha saturación o humedad residual. Para ello se utilizó los siguientes modelos:

$$t(s) = \left(\frac{vp - s * vp}{b} \right)^{\frac{1}{c}}$$

$$t(H) = \left(\left(\frac{H * \frac{vp}{100} + H * \frac{ms}{100} - vp}{H * \frac{b}{100} - b} \right) \right)^{\frac{1}{c}}$$

Donde vp corresponde al volumen de poros del queque, s: saturación residual, en fracción. H: humedad residual en porcentaje, ms: masa de sólido b y c (ver anexo): corresponden a las constantes obtenidas en el modelo de volumen de filtración en la etapa de soplado

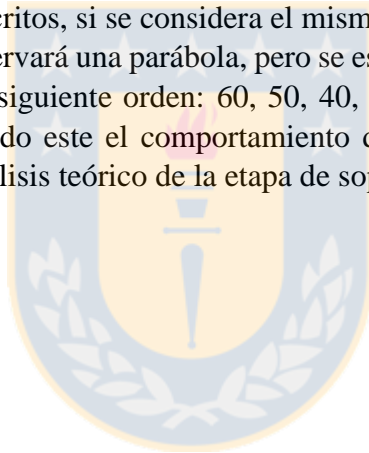
Donde ambos resultados se trabajaron en función de la saturación y humedad, ya que de esta forma es más eficiente analizar cuánto tiempo se necesita para alcanzar cierto punto deseado. De esta manera se utilizó valores de referencia 0,40,-0,45 y 0,5 para la saturación residual y valores entre 17 a 10 % para la humedad residual. Además, se obtuvieron valores entre 9 -11 % de humedad y saturación de 0.29-0.33.

Antes de comenzar con cada análisis se debe mencionar que los resultados en su mayoría corresponden a la condición 1 de la válvula de purga.

Análisis experimental

En las Figuras desde la 29 a la 32 se muestran las curvas de filtrado y humedad residual para la etapa de soplado para las diferentes presiones, masa de sólido y líquido, y temperatura de soplado. Al analizar las curvas se obtiene que las gráficas correspondientes al filtrado no poseen un patrón de comportamiento, esto se debe principalmente a errores en la manipulación y medición de cada prueba. Para las gráficas de humedad residual para todos los casos se cumple que al inicio ocurre una abrupta disminución de la humedad residual, luego se vuelve constante e invariante en el tiempo, esto se debe a que al inicio de la prueba los poros se encuentran saturados de agua y es más fácil extraerla, pero a medida que transcurre el tiempo se vuelve más difícil eliminarla. Para obtener un mejor estudio se debe analizar por separado cada presión, y se obtuvo el mismo comportamiento para 4 y 5 bar de presión de soplado, donde las curva de 30 °C es la mejor respuesta, ya que es la curva más rápida, seguida de las de 40 y 20 °C, además se obtienen los peores resultados para las pruebas de 50 y 60 °C. Y ahora para 6 bar la única diferencia que existe es que las curvas 40, 30 y 20 °C son similares (las curvas de 30 y 40 °C se superponen, ver Figura 29) y las de 50 y 60 °C cumplen con mismo comportamiento descrito anteriormente.

Ahora para los 3 casos ya descritos, si se considera el mismo punto de humedad para cada una de las diferentes temperaturas se observará una parábola, pero se esperaba un comportamiento lineal, por ejemplo, que la recta siguiera el siguiente orden: 60, 50, 40, 30 y 20 °C, donde 60 °C es la mejor respuesta y 20°C es la peor, siendo este el comportamiento de un gas ideales. El estudio de esos resultados será discutido en el análisis teórico de la etapa de soplado.



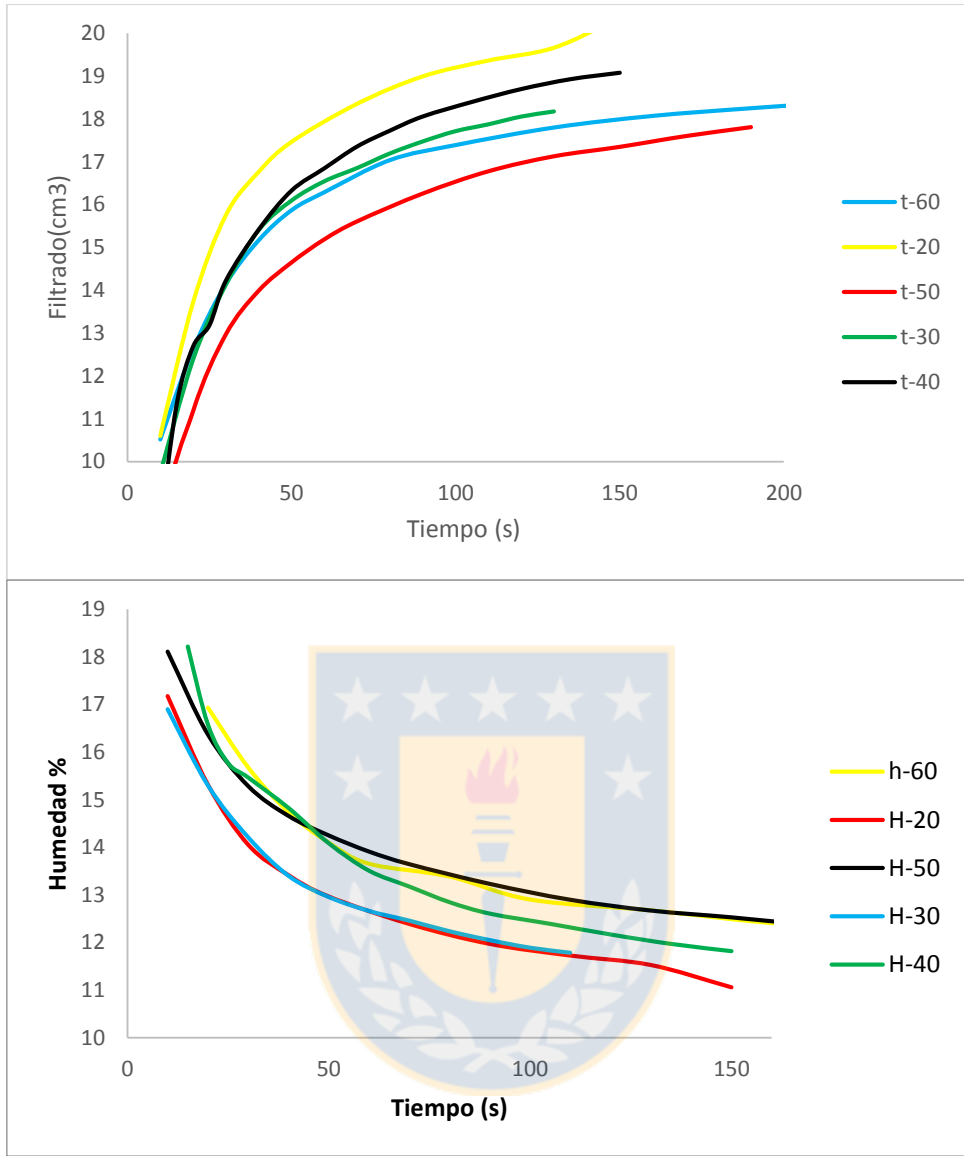


Figura 29: Filtrado etapa de soplado (superior) y humedad residual (inferior), presión de soplado 6 bar, masa sólido 120 g, masa líquido 120 g, válvula de purga en condición 1.

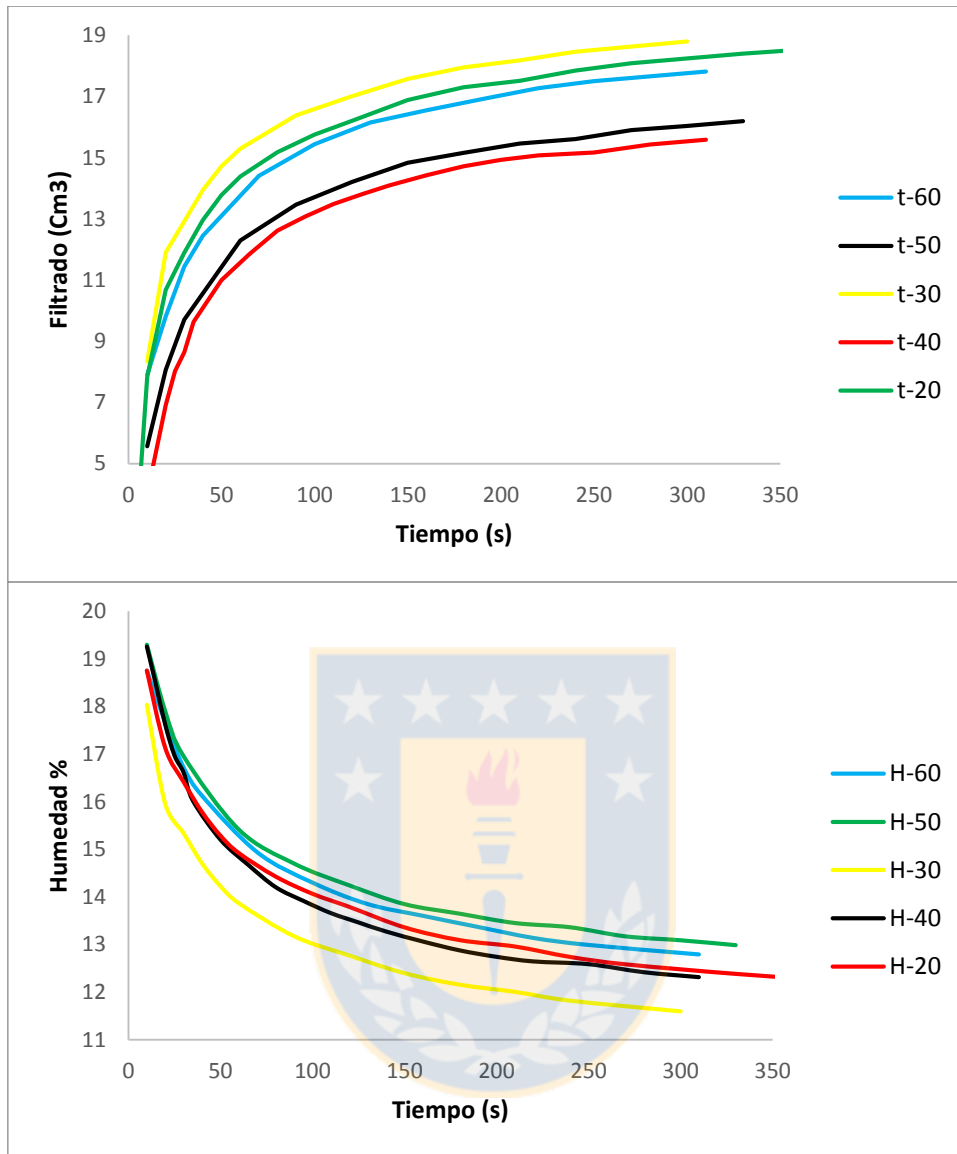


Figura 30: Filtrado etapa de soplado (superior) y humedad residual (inferior), presión de soplado 4 bar, masa sólido 120 g, masa líquido 120, válvula de purga en condición 1.

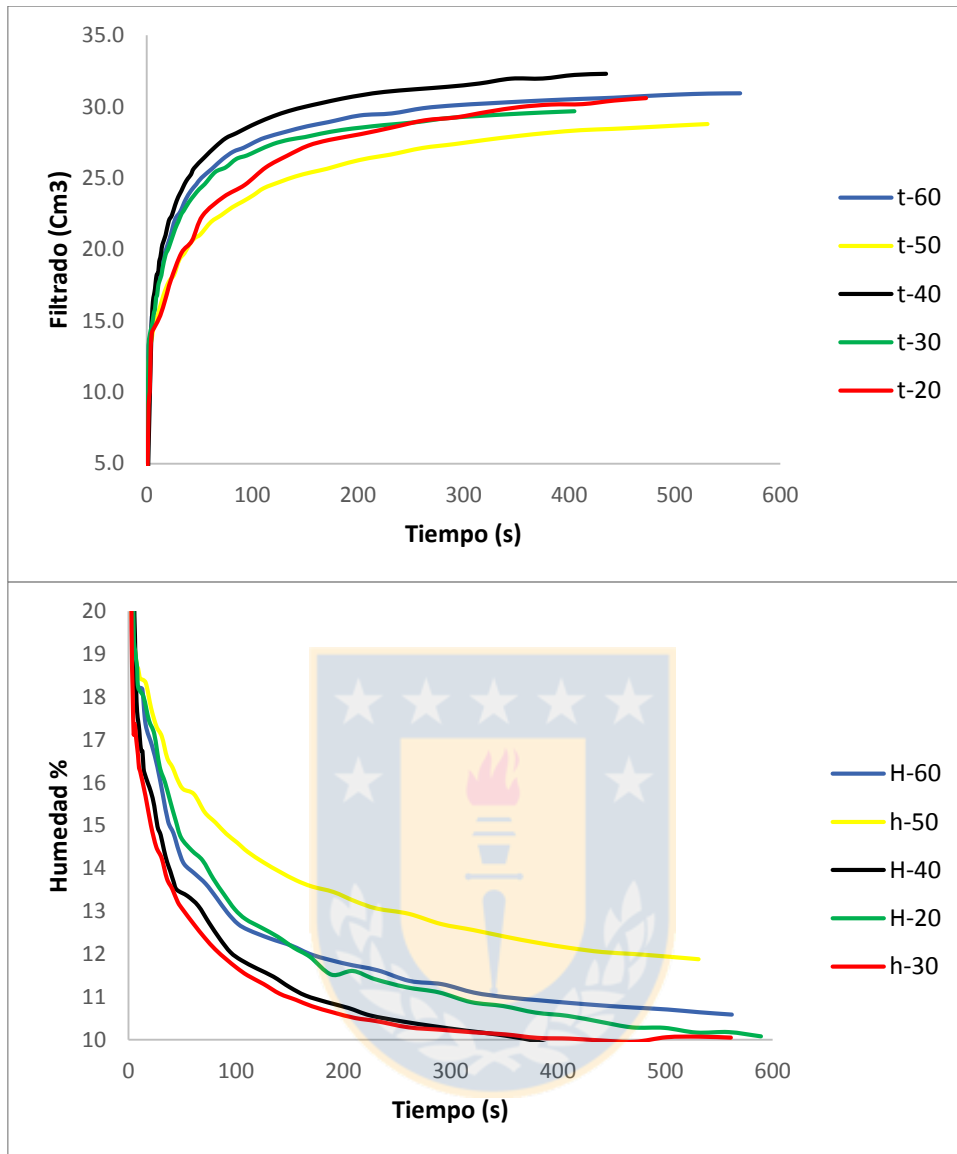


Figura 31: Filtrado etapa de soplado (superior) y humedad residual(inferior),presion de soplado 5 bar, masa solido 180 g, masa liquido 180g, válvula de purga en condición 1

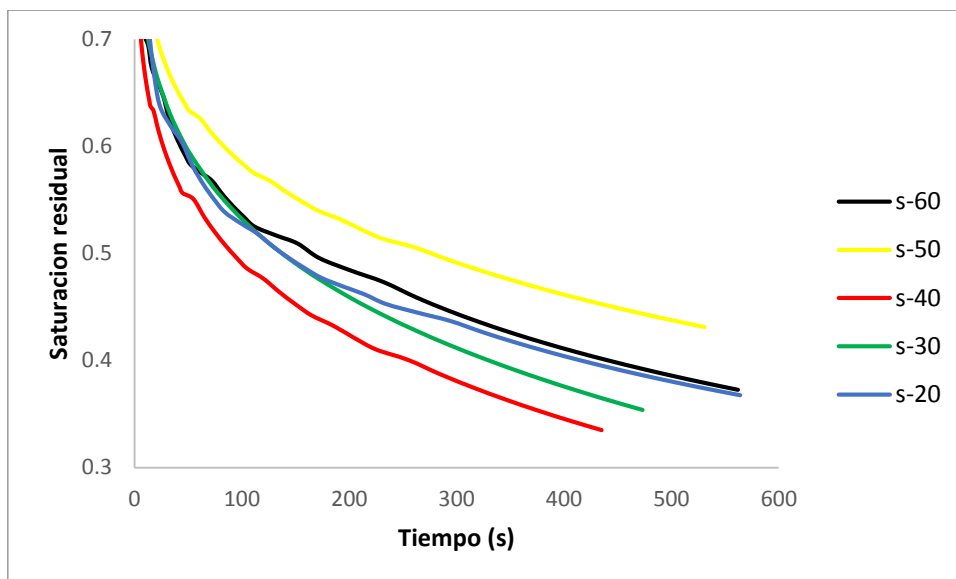


Figura 32: Saturación residual, presión de soplado 5 bar, masa sólido 180 g, masa líquido 180g, válvula de purga en condición 1

Análisis teórico

Para realizar un análisis acabado se debe solapar el análisis teórico y las curvas de flujo de aire las cuales corresponden a las Figuras 33, 34 y 35 y la tabla 12.

La tabla 8 corresponde al tiempo de soplado promedio para saturación residual de 0,4; 0,45 y 0,5 para 4, 5 y 6 bar de presión de soplado, 120 gramos de sólido y líquido aproximadamente, y el porcentaje promedio de variación para cada presión. Para 4 bar de presión de soplado se obtiene una variación de 50 % en la reducción en el tiempo de soplado, para 30 y 40 °C y para 50 y 60 °C se obtiene valores similares al tiempo de soplado de la prueba de 20 (°C), ya que la variación ronda el 1 y -7%. Para el caso de 5 bar de presión y 30 °C, se obtiene una variación del 50 %, pero para las pruebas de 40, 50 y 60 °C la variación en el tiempo de soplado comienza a desplomarse alcanzando -20%. Para el caso de 6 bar de presión, la variación presenta el mismo comportamiento que el caso anterior, pero la variación es de menor valor para 30 y 40 °C, ya que es de 10 y 15 % respectivamente, y para 50 y 60 °C toma valores superiores de -25%.

Tabla 8: Tiempo promedio de soplado para saturación definida, para 120 (g) de sólido y 120 (g) de líquido aproximadamente, válvula de purga en condición 1

Presión de soplado 4 bar				
Temperatura(°C)	T s=0,40	T s=0,45	T s=0,50	% Variación
20	385	297	197	
30	193	152	104	48.6
40	193	157	113	46.5
50	338	286	221	1.2
60	375	312	234	-7.1

Presión de soplado 5 bar				
Temperatura(°C)	T s=0,40	T s=0,45	T s=0,50	%Variación
20	221	116	57	
30	128	56	23	51.2
40	168	103	60	10.1
50	222	130	72	-13.0
60	186	133	92	-20.3
Presión de soplado 6 bar				
Temperatura(°C)	T s=0,40	T s=0,45	T s=0,50	%Variación
20	201	131	81	
30	182	117	72	10.6
40	157	110	75	15.3
50	298	197	125	-50.9
60	278	164	93	-25.9

Para las tablas 9 y 11 las cuales corresponden a la variación en el tiempo de la humedad residual del queque, se observa el mismo comportamiento descrito anteriormente para 4 y 5 bar, pero para el caso de 6 bar se observa que para 30 y 40 °C no existe variación, siendo similar a prueba de 20 °C. Ahora para la tabla 15 a la cual le corresponde el caso de 6 bar de presión ocurre algo especial, ya que para 30 y 40 °C la variación en el tiempo soplado es de -1 y -1,5 %, lo que indica que para 20, 30 y 40 °C el tiempo de soplado es similar o cercano, esto ocurre debido al efecto de la presión, ya que al soplar a una mayor presión se esperaría tener un mayor arrastre de agua en los poros del queque ósea menor masa de agua en este, sin embargo cuando sobrepasa los 40 °C el porcentaje de variación es superior a -20 % lo que significa que aumenta el tiempo de soplado, reportando el mismo fenómeno ocurrido para las pruebas de 4 y 5 bar, el cual se explicará en los siguientes párrafos.

Tabla 9: Tiempo promedio de soplado para humedad residual definida, para 120 (g) de sólido y 120 (g) de líquido aproximadamente, presión de soplado 4 bar, válvula de purga en condición 1

T (°C)	H=17	H=16	H=15	H=14	H=13	H=12	H=11	H=10	%Variación
20	15	25	44	78	145	284	590	1314	-
30	13	21	35	60	107	200	395	832	24.6
40	16	25	41	70	125	232	456	954	12.0
50	24	36	57	93	157	277	511	999	-15.2
60	19	32	53	94	171	328	666	1445	-19.0

Tabla 10: Tiempo promedio de soplado para humedad residual definida, para 120 (g) de sólido y 120 (g) de líquido aproximadamente, presión de soplado 6 bar, válvula de purga en condición 1

T(°C)	H=17	H=16	H=15	H=14	H=13	H=12	H=11	H=10	% Variación
20	7	11	18	30	54	101	199	418	
30	9	14	21	33	54	92	162	301	-1.1
40	13	19	28	43	67	109	185	330	-1.5
50	10	16	24	38	62	105	186	350	-14.6
60	7	11	20	36	68	136	287	653	-23.9

Tabla 11: Tiempo promedio de soplado para humedad residual definida, para 180 (g) de sólido y 180 (g) de líquido aproximadamente, presión de soplado 5 bar, válvula de purga en condición 1

T(°C)	H=17	H=16	H=15	H=14	H=13	H=12	H=11	H=10	% Variación
20	15	21	30	46	71	113	189	615	
30	11	16	25	39	63	107	189	707	10.7
40	12	18	26	40	64	105	181	628	9.6
50	12	19	29	47	77	133	240	941	-22.4
60	9	15	25	44	80	154	314	1628	-23.5

La Figura 33 (condición 1 de la válvula de purga) muestra el flujo de aire promedio que pasa por los poros del queque en la etapa de soplado, se observa que existe un máximo para 30 °C, además se aprecia que al aumentar la temperatura el flujo de aire de 30 °C a 60 °C, esta disminuye un 33%. La figura 34 muestra el flujo de aire en función de la temperatura sin filtrar, es decir sin la formación de queque, en esta gráfica se observa el comportamiento de un gas ideal. Esto es contradictorio, ya que se esperaría que el flujo de aire que pasa por los poros del queque tuviese el comportamiento de un gas ideal, pero esto no ocurre, esto se podría deber al efecto de la viscosidad del aire, puesto que esta aumenta con el aumento de la temperatura, lo que provocaría la disminución del flujo de aire, pero no es un argumento convincente. Ahora, para la figura 35, la cual muestra el flujo de aire promedio a través de los poros del queque para 3 condiciones de operación de la válvula de purga distintas, y en la tabla 16 las variaciones de cada condición respecto al valor base de 20 °C, donde no se lograron reproducir los resultados de la figura 43, sino que se obtuvieron resultados diferentes y contradictorios, ya que para 30 °C se obtuvieron variaciones de 3.7,-7.7 y -82.4 % (ver tabla 12). Esto puede deberse que al modificar la posición de la válvula de purga el flujo de aire evacuado desestabiliza el sistema, provocando perturbaciones que no pueden ser cuantificadas por el flujómetro. Además, cabe mencionar que la abertura de dicha válvula es mayor en la condición 3 > condición 2 > condición 1.

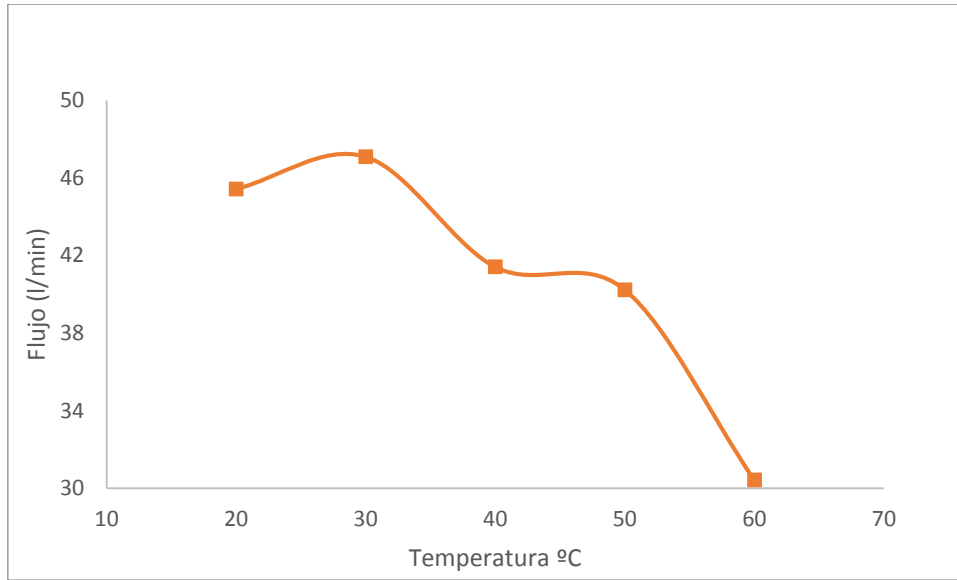


Figura 33: Caudal de aire promedio en función de la temperatura, $P=5$ bar, condición 1 válvula de purga

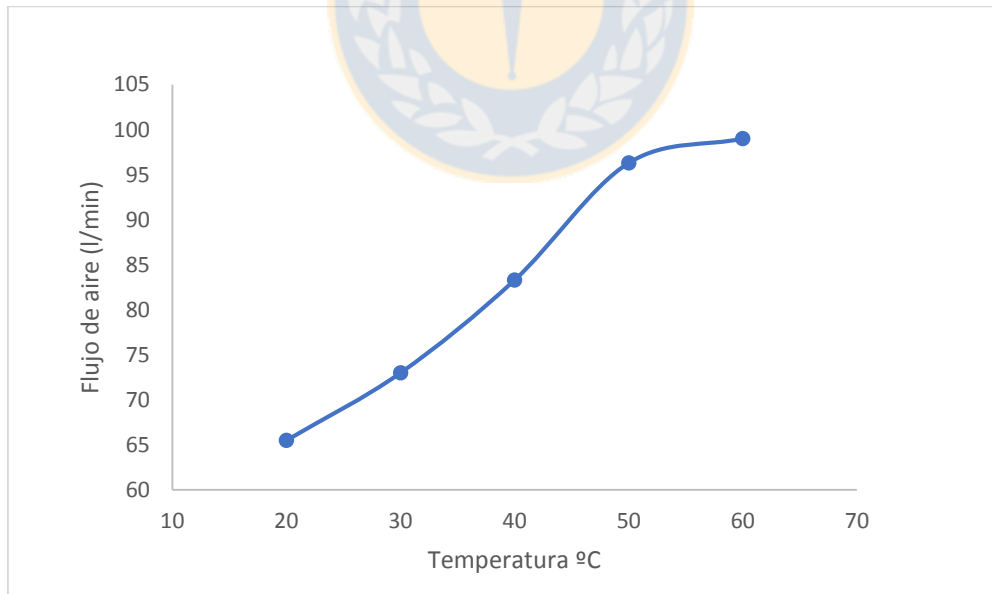


Figura 34: Caudal de aire

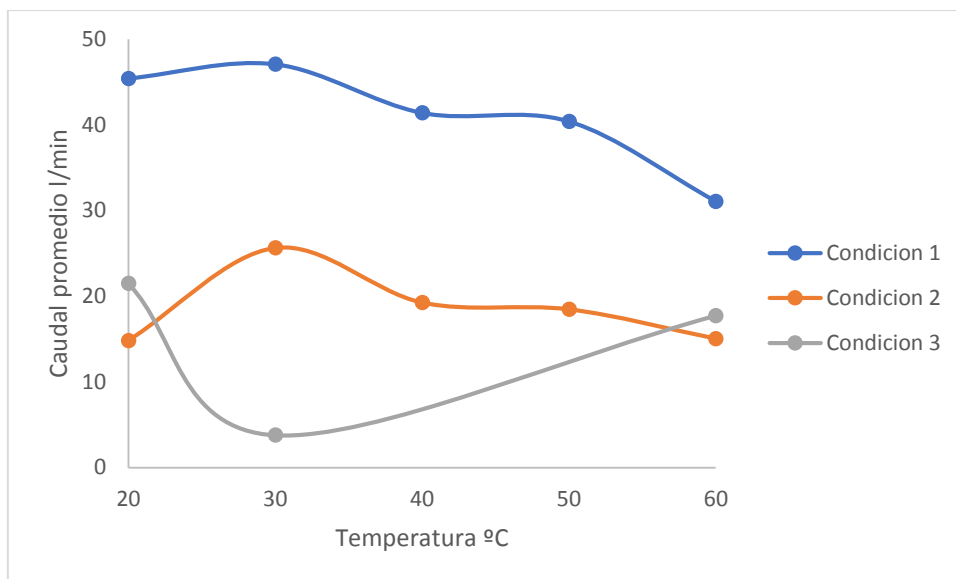


Figura 35: Caudal promedio etapa de soplado, para distintas condiciones de la válvulas de alivio, $P=5$ bar

Tabla 12: Variación porcentual del caudal promedio respecto a la prueba de 20 (°C) para diferentes posiciones de la válvula de purga.

Temperatura ° C	Condición 1	Condición 2	Condición 3
	% variación	% variación	% variación
30	3.7	-7.7	-82.4
40	-8.9	-0.1	-
50	-11.0	9.3	-
60	-31.6	-13.2	-17.4

Para explicar los resultados de las pruebas de 4 y 5 bar, las cuales poseen el mismo comportamiento, encontrando un mínimo en el tiempo de soplado entre 30 y 40 °C y empeorando para 50 y 60 °C, se puede recurrir a los resultados de las pruebas de capilaridad, donde la menor saturación residual se encontró en el primer rango de temperatura, este efecto también podría ser explicado por el efecto de la viscosidad de aire, que como se analizó anteriormente aumenta con el incremento de la temperatura lo que explicaría el aumento en el tiempo de soplado para 50 y 60 °C, ya que se obstaculizaría el paso de aire por el interior de los poros del queque, pero no explicaría el fenómeno visto para el rango de 30 y 40 °C. Por otro lado, se podría explicar este comportamiento con el efecto del caudal de aire de soplado en función de la temperatura, donde se observa un máximo del caudal en 30 y 40 °C (condición 1) y una disminución de 33% para 60 °C. Esto significa que atraviesa mayor cantidad de moles de aire o mayor masa de aire, que es el medio que permite la extracción del líquido en el interior de los poros del queque, sin embargo, cuando se cambiaron las condiciones operacionales del equipo Filtraset (aumento del flujo del aire de purga, condiciones de operación 2 y 3) las mediciones del caudal de aire de soplado no se lograron reproducir, obteniendo resultados distintos y

extraños, lo cuales refutan el argumento del aumento del caudal de aire para explicar los resultados reportados. Por otro lado, la fuerza capilaridad podría explicar este fenómeno ya que esta tiene relación con el diámetro del poro y como se trabajó con un mineral extremadamente fino esta fuerza es mayor pero como no se evaluó el efecto de la tensión superficial, ángulo de contacto y composición de mineral se podría estar bajo el resultado de una interacción desconocida entre estas variables, potenciado por el tamaño de poro. Por lo que esta aseveración no es fiable.

Para la comparación de tiempos de soplado para cada una de las diferentes presiones y para las mismas condiciones operacionales, se esperaría obtener menores tiempos de soplado para las pruebas de mayor presión de soplado, en orden sería $6 \text{ bar} < 5 \text{ bar} < 4 \text{ bar}$, lo cual ocurre debido a que a mayor presión de soplado aumenta la masa de aire que atraviesa los poros del queque, disminuyendo hasta 50 % el tiempo de soplado entre las pruebas de 5 y 6 bar en comparación con la de 4 bar.

Otro punto interesante de discutir, es que las pruebas que se realizaran a $50 \text{ }^\circ\text{C}$ arrojaron en su mayoría resultados que se escapaban de toda tendencia en comparación con los resultados de las otras temperaturas, esto se puede apreciar en las figuras anteriores donde el porcentaje de variación escapa a toda lógica.

4.2.4.1. Comparación permeabilidad relativa del aire y del líquido

Las figuras 36 compara las curvas de las permeabilidades relativas del aire y líquido para la condicione 1 de operación de la válvula de purga. De lo anterior, se observa que existe el mismo patrón discutido para el tiempo de soplado y flujo de aire ya que las curvas de la permeabilidad relativas de aire dependen del flujo de aire donde se obtiene un mejor resultado apara 30 y $40 \text{ }^\circ\text{C}$. Ahora, para la permeabilidad relativa del líquido, la cual es independiente de las mediciones del flujómetro, permanece constate entre pruebas y entre condiciones de operación, obteniendo fluctuaciones menores a 7 % con respecto a valor de $20 \text{ }^\circ\text{C}$, lo que indica que la permeabilidad del líquido independiente de la temperatura.

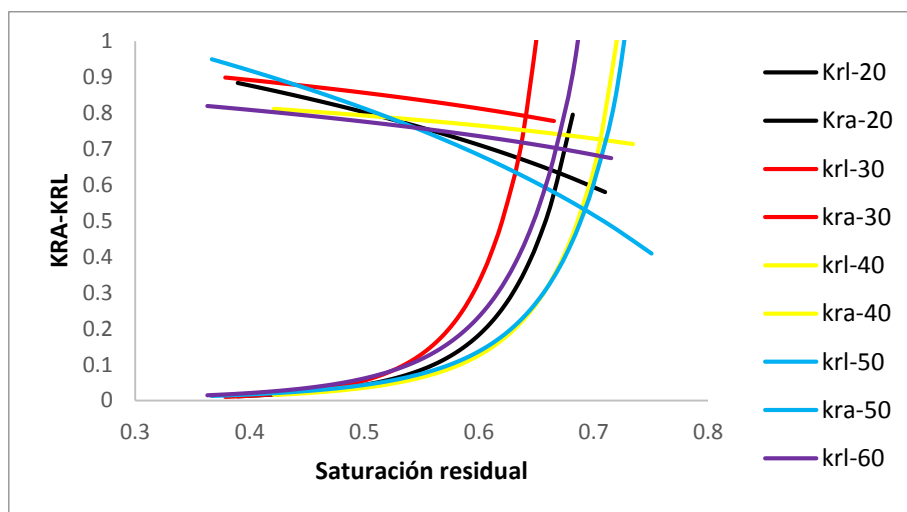


Figura 36: Comparación permeabilidad relativas a diferentes temperaturas, $P=5 \text{ bar}$, masa sólido 180 g masa líquido 180 g , condición operación 1

5. CONCLUSIONES

5.1. Conclusiones

En primer lugar, se concluye que el equipo Filtraset es un equipo exitoso, ya que permitió trabajar de buena forma y obtener los resultados de este estudio. Sin embargo, el descubrimiento de los efectos provocados por la abertura de la válvula purga en los resultados de las pruebas de filtración, específicamente en el caudal de aire y tiempo de soplado, arrojaron resultados inconsistentes y fuera de toda lógica.

Los resultados de las pruebas de capilaridad indican que entre el rango de 30 y 40 °C la saturación encuentra un mínimo a 35 °C, pero como la diferencia entre los valores obtenidos varía entre 7 y 11% se asume que se debe al error experimental y que no hay variación real.

Las pruebas de formación del queque indican que la permeabilidad del queque ($k(\epsilon_0)$), la resistencia del medio filtrante (R_m) y tiempo de formación, son independientes de la temperatura del aire

Los resultados indican que mientras mayor sea la presión de soplado el tiempo de soplado para alcanzar un valor determinado de saturación o humedad residual del queque para las mismas condiciones disminuye y se obtuvo que la temperatura óptima para soplar se encuentra en 30 y 40 °C.

El flujo de aire que pasa a través de los poros del queque posee un máximo entre 30 y 40 °C.

La permeabilidad del líquido no se ve afectada por la temperatura de soplado, ya que existen variaciones menores a 7 % entre pruebas y condiciones de operación. Sobre la permeabilidad del aire no se logró encontrar un comportamiento claro.

Un parámetro relevante en las pruebas es la posición de la válvula de purga ya que en diferentes posiciones se obtienen resultados diferentes además de desestabilizar al equipo y provocar las lecturas erradas del flujómetro.

5.2. Recomendaciones

Para un correcto uso del equipo se debe tener la precaución de no tocar la conexión entre la salida del calentador y la válvula 1, ya que puede conllevar una quemadura. Se sugiere cambiar el flujómetro, puesto que proporcionó ciertas ambigüedades en las mediciones del caudal de aire. No se debe sobrepasar los 60 °C de temperatura del aire de soplado, porque una temperatura mayor a esta quema la resistencia del calentador de aire y por ende el equipo se podría estropear.

Para un estudio más acabado y detallado se debe utilizar un sensor de humedad y temperatura a la salida del calentador y a la salida de la cámara de soplado, para realizar un balance de masa de agua en el sistema, con lo cual se sabría la influencia de la humedad del aire en el proceso de soplado.

Se recomienda analizar de forma más detallada el efecto de la temperatura en el rango de 40 y 60 °C, y de forma específica lo que ocurre a 50 °C.

Se recomienda analizar y cuantificar el efecto de la válvula de purga en el sistema con el cambio de un nuevo flujómetro.

Se recomienda realizar pruebas con minerales de cobre y otros, de diferentes granulometrías para evaluar y cuantificar el efecto del tamaño de partícula en la fuerza capilar.

Se recomienda realizar un estudio mineralógico para determinar la caracterización del mineral, y así evaluar los efectos termodinámicos de hidrofobicidad y ángulo de contacto en la etapa de soplado.

Se recomienda realizar pruebas de tensión superficial en el rango de temperatura considerado.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Fernando Concha, A. (2014). Solid-liquid separation in the mining industry. Springer International Publishing.
- Castellan, G. W. (1998). Fisicoquímica. Pearson Educación.
- Haynes, WM (2014). Manual CRC de química y física. Prensa CRC.
- Tarleton, S., & Wakeman, R. (2011). Solid/liquid separation: scale-up of industrial equipment. Elsevier.
- Erick Zapata. (2017). Estudio preliminar del uso de reactivos en los filtros Larox de minera escondida limitada, Memoria de Título, Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Universidad de Concepción.
- Melo, F. (2001), Efecto de reactivos surfactantes en la filtración de concentrados de cobre. Memoria de Título, Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Universidad de Concepción.
- Bustos, S. (2012), Aumento de la capacidad de filtros PF's de Minera Escondida Limitada para alto contenido de insolubles, Memoria de título, Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Universidad de Concepción

7. ANEXOS

7.1. Datos pruebas de filtración

Tabla 13: Datos pruebas de filtración, derecha 50 °C, Izquierda 60 °C, presión de soplado 5 bar, masa sólido 120 g, masa líquido 120 g posición 1 válvula de Purga.

Tiempo (s)	Formación (g)	Tiempo (s)	Soplado (g)	Q (l/min)	Tiempo (s)	Formación (g)	Tiempo (s)	Soplado (g)	Q (l/min)
130	79	375	103	28	110	81	310	102	57
117	76	179	103	29	108	75	283	102	51
116	76	178	103	29	100	72	203	101	48
110	73	167	103	31	95	69	169	101	20
103	70	166	103	28	90	67	129	101	-8
99	69	165	103	31	85	65	114	100	45
95	67	164	102	33	80	62	104	100	48
90	64	94	102	27	75	59	91	100	50
85	62	75	101	33	70	57	71	99	47
80	60	63	101	30	65	54	56	98	45
75	57	62	100	33	60	51	47	97	48
70	55	48	100	31	55	48	36	95	41
65	52	45	99	29	50	44	32	94	39
60	49	37	99	32	45	41	27	91	37
55	46	32	98	31	40	37	26	90	40
50	43	21	97	32	35	33	21	90	-33
45	40	15	96	31	30	29	16	90	-10
40	36	11	95	27	25	24	15	90	-1
35	32	7	94	28	20	18	14	90	0
30	28	6	93	33	15	11	9	90	1
25	23	5	93	28	10	4	5	90	0
20	17	4	92	28	5	0	4	90	3
15	10	3	92	31	4	0	3	90	4
10	4	2	91	31	2	0	2	89	36
5.2	0.1	1.0	90.1	27.4	0	0	1	87	-39
0.0	0.0	0.0	89.0	33.2	0	0	0	84	-42

Tabla 14: Datos pruebas de filtración, derecha 40 °C, Izquierda 30 °C, presión de soplado 5 bar, masa sólido 120 g, masa líquido 120 g posición 1 válvula de Purga.

Tiempo (s)	Formación (g)	Tiempo (s)	Soplado (g)	Q (l/min)	Tiempo (s)	Formación (g)	Tiempo (s)	Soplado (g)	Q (l/min)
119	81	128	102	42	125	80	99	100	46
112	80	117	102	42	120	73	80	100	50
108	75	77	101	43	115	71	57	99	47
104	73	63	100	45	110	69	42	98	46
100	72	58	100	44	105	67	33	97	41
96	70	46	99	42	100	65	27	96	42
91	67	36	98	45	95	63	26	95	44
86	65	35	98	43	90	61	21	94	42
81	62	34	98	43	85	58	17	93	43
75	59	33	98	44	80	56	16	93	45
70	57	32	98	44	75	53	15	92	39
65	54	31	98	43	70	51	12	91	46
60	51	30	97	45	64	48	11	91	43
53	46	29	97	44	58	44	10	90	45
48	43	24	97	48	53	41	9	89	42
41	38	23	96	45	47	37	8	89	44
34	32	17	95	47	42	33	7	89	43
28	26	11	92	44	36	29	6	89	48
22	20	10	92	44	25	18	5	89	11
16	13	9	88	43	19	11	4	89	5
10	4	5	88	107	15	5	3	89	3
5	0	4	88	3	7	0	2	89	4
2	0	3	88	3	6	0	1	89	1
0	0	2	88	0.9	5	0	0	88	0

Tabla 15: Datos pruebas de filtración, 20 °C, presión de soplado 5 bar, masa sólido 120 g, masa líquido 120 g posición 1 válvula de Purga.

Tiempo (s)	Formación (g)	Tiempo (s)	Soplado (g)	Q (l/min)
110	76	192	101	47
105	73	180	101	46
100	71	108	100	47
95	69	71	99	44
90	66	65	98	42
85	64	47	98	41
80	62	32	96	43
75	59	26	96	39
70	56	21	95	38
65	54	13	93	40
60	51	12	93	32
55	48	11	93	39
50	45	10	92	38
45	41	9	92	36
40	38	8	92	36
35	34	7	91	36
30	30	6	91	40
25	25	5	90	39
20	20	4	90	39
15	14	3	90	40
10	6	2	89	42
5	0	1	88	40
0	0	0	86	37

Tabla 16: Datos pruebas de filtración, derecha 60 °C, Izquierda 50 °C, presión de soplado 4 bar, masa sólido 120 g, masa líquido 120 g posición 1 válvula de Purga

Tiempo (s)	Formación (g)	Tiempo (s)	Soplado (g)	Tiempo (s)	Formación (g)	Tiempo (s)	Soplado (g)
0	0	0	82.9	0	0	0	80.52
10	16.01	10	90.9	10	17.29	10	90.63
20	27.9	20	94.06	20	28.5	20	93.13
30	37.07	30	96.06	30	37.06	30	94.77
40	46.37	40	97.32	40	44.15	60	97.36
50	53.19	50	98.03	50	50.66	90	98.53
60	59.47	80	99.44	60	56.05	120	99.27
70	64.79	110	100.33	70	61.7	150	99.9
80	70.17	140	100.97	80	66.32	180	100.22
90	74.69	170	101.4	90	71.12	210	100.53
100	79.12	200	101.77	100	75.34	240	100.67
115	82.55	230	102.05	110	79.32	270	100.97
		260	102.27	120	80.05	300	101.1
		290	102.47			330	101.26

Tabla 17: Datos pruebas de filtración, derecha 40 °C, Central 30 °C Izquierda 20 °C, presión de soplado 4 bar, masa sólido 120 g, masa líquido 120 g posición 1 válvula de Purga

Tiempo (s)	Formación (g)	Soplado (g)	Tiempo (s)	Formación (g)	Tiempo (s)	Soplado (g)	Tiempo (s)	Formación (g)	Tiempo (s)	Soplado (g)
0	2	92	0	0	0	83	0	0	0	82
10	19	96	10	14	10	90	10	18	10	91
20	27	97	20	26	20	94	20	29	20	93
30	36	99	30	35	30	97	30	38	30	95
40	43	99	40	42	60	99	40	45	40	96
50	49	100	50	48	75	100	50	52	50	97
60	55	101	70	59	90	100	60	57	60	97
70	60	101	80	65	120	101	70	62	100	99
80	65	101	90	69	150	101	80	67	120	99
90	69	102	100	74	180	101	90	72	150	100
100	72	102	110	77	210	101	100	76	180	100
110	76	102	120	83	240	101	110	80	240	101
120	79	102			270	101	120	81	270	101
140		103			300	102			330	101

Tabla 18: Datos pruebas de filtración, derecha 60 °C, Izquierda 50 °C, presión de soplado 6 bar, masa sólido 120 g, masa líquido 120 g posición 1 válvula de Purga

Tiempo (s)	Formación (g)	Tiempo (s)	Soplado (g)	Tiempo (s)	Formación (g)	Tiempo (s)	Soplado (g)
0	0	0	83	0	0	0	81
10	12	10	95	10	17	10	93
20	29	20	98	20	29	20	96
30	38	30	99	30	38	30	98
40	45	40	100	40	45	40	99
50	53	50	101	50	52	50	100
60	60	70	102	60	58	60	100
70	66	90	103	70	64	70	100
80	72	100	103	80	69	90	101
90	77	110	103	90	74	110	102
100	81	120	103	100	78	130	102
		130	103	110	81	150	102
		140	103			170	102
		150	104			190	103

Tabla 19: Datos pruebas de filtración, derecha 40 °C, central 30 °C Izquierda 20 °C, presión de soplado 6 bar, masa sólido 120 g, masa líquido 120 g posición 1 válvula de Purga

Tiempo (s)	Formación (g)	Tiempo (s)	Soplado (g)	Tiempo (s)	Formación (g)	Tiempo (s)	Soplado (g)	Tiempo (s)	Formación (g)	Soplado (g)
0	0	0	82	0	0	0	81	0	1	79
10	17	10	93	10	17	10	93	10	16	92
20	29	20	97	20	28	20	96	20	27	95
30	37	30	99	30	38	30	98	30	35	97
40	44	50	101	40	45	50	99	40	42	97
50	51	70	102	50	52	70	100	50	48	98
60	56	90	103	60	58	90	101	60	53	98
65	59	105	103	70	63	110	102	70	58	99
70	62	120	103	80	68	140	102	80	63	99
80	66	135	104	90	72	170	102	90	67	100
90	70	150	104	100	77	200	103	100	72	100
100	75			110	80	230	103	110	76	100
110	79			120	81			120	78	100
120	81							130		100

Tabla 20: Datos pruebas de filtración, derecha 20 °C, central 30 °C Izquierda 60 °C, presión de soplado 5 bar, masa sólido 180 g, masa líquido 180 g posición 1 válvula de Purga

Tiempo (s)	Soplado (g)	Q (l/min)	Tiempo (s)	Soplado (g)	Q (l/min)	Tiempo (s)	Soplado (g)	Q (l/min)
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	10	24	1	6	1	1	9	31
6	16	25	7	15	31	7	15	23
11	19	25	11	17	27	19	18	17
16	20	26	16	18	27	24	20	15
21	22	26	21	19	27	34	22	17
26	22	26	26	20	27	44	23	18
31	24	26	31	21	27	69	25	20
36	25	26	36	22	27	89	27	21
46	26	26	46	23	22	109	27	23
56	27	26	61	24	20	139	28	22
71	28	27	81	25	22	154	29	21
86	28	27	101	26	23	169	30	19
101	29	27	126	26	24	189	29	16
116	29	27	156	27	25	209	30	14
136	30	27	171	27	26	229	30	12
156	30	27	211	28	26	259	30	9
176	31	27	261	28	27	319	31	7
206	31	27	291	28	27	349	31	12
236	31	27	351	29	28	379	31	12
266	32	28	441	29	28	409	32	15
296	32	28	471	29	28	439	32	17
326	32	28	501	30	29	469	32	20
356	32	28	531	30	28	499	32	19
386	32	28	561	30	30	529	32	20
416	32	28	591	30	30	559	32	24
446	33	28	621	39	31	589	32	24

7.2. Resultados pruebas de filtración.

7.2.1 Resultados humedad residual.

Tabla 21: Humedad residual, presión sopaldo 5 bar, masa sólido 120 g, masa líquido 120 g aprox.

t (s)	H- 60			H-50	H-40	H-30	H-20	
	A	B	C	A	A	A	A	B
1	22.82	24.85	23.21	23	24.56	20.8	21.5	21.16
10	16.53	17.31	17.28	16.78	17.11	15.74	16.35	15.76
20	15	15.53	15.81	15.26	15.35	14.47	15.05	14.42
30	14.18	14.57	15.02	14.43	14.4	13.78	14.34	13.69
50	13.2	13.45	14.06	13.46	13.29	12.95	13.5	12.82
60	12.87	13.07	13.74	13.12	12.92	12.67	13.21	12.53
70	12.59	12.76	13.47	12.85	12.61	12.44	12.97	12.28
90	12.16	12.26	13.05	12.41	12.12	12.06	12.59	11.89
100	11.98	12.06	12.87	12.24	11.92	11.91	12.43	11.74
110	11.82	11.88	12.71	12.08	11.74	11.77	12.29	11.59
120	11.68	11.72	12.57	11.94	11.58	11.65	12.16	11.46
140	11.43	11.44	12.33	11.69	11.31	11.44	11.94	11.24
150	11.32	11.32	12.22	11.58	11.19	11.34	11.84	11.14
160	11.21	11.2	12.12	11.47	11.07	11.25	11.75	11.05
170	11.12	11.1	12.03	11.38	10.97	11.17	11.67	10.96
180	11.03	11	11.94	11.29	10.87	11.09	11.59	10.88
190	10.95	10.9	11.86	11.21	10.78	11.02	11.52	10.81
200	10.87	10.82	11.78	11.13	10.69	10.95	11.45	10.74
210	10.8	10.73	11.7	11.05	10.61	10.89	11.38	10.67
220	10.73	10.66	11.64	10.98	10.53	10.83	11.32	10.61
250	10.54	10.44	11.45	10.79	10.32	10.66	11.15	10.44
260	10.48	10.38	11.39	10.74	10.26	10.61	11.09	10.38
280	10.37	10.26	11.28	10.63	10.14	10.52	11	10.29
290	10.32	10.2	11.23	10.58	10.09	10.47	10.95	10.24
310	10.22	10.1	11.14	10.48	9.98	10.39	10.86	10.15
320	10.18	10.05	11.09	10.43	9.93	10.35	10.82	10.11
330	10.13	10	11.05	10.39	9.88	10.31	10.78	10.07
340	10.09	9.95	11	10.35	9.84	10.27	10.74	10.03
360	10.01	9.86	10.92	10.27	9.75	10.2	10.67	9.96
370	9.97	9.82	10.89	10.23	9.71	10.17	10.64	9.93
380	9.94	9.78	10.85	10.19	9.67	10.13	10.6	9.89
390	9.9	9.74	10.81	10.16	9.63	10.1	10.57	9.86
400	9.86	9.7	10.78	10.12	9.59	10.07	10.54	9.83
410	9.83	9.66	10.74	10.09	9.55	10.04	10.51	9.8

Tabla 22: Humedad residual, presión sopado 5 bar, masa sólido 180 g, masa líquido 180 g aprox.

t (s)	H-60					H-50	H-40	H-30			H-20	
	A	B	C	D	E	A	A	A	B	C	A	B
10	16.75	18.26	19.38	17.81	16.53	17.88	16.60	17.15	17.19	17.17	17.68	18.22
20	15.39	16.16	17.39	16.15	15.00	16.24	14.47	15.30	15.50	15.57	15.40	16.42
30	14.65	15.04	16.33	15.25	14.18	15.35	13.35	14.31	14.59	14.70	14.20	15.45
40	14.15	14.29	15.61	14.65	13.62	14.75	12.61	13.65	13.98	14.12	13.41	14.80
50	13.77	13.74	15.08	14.19	13.20	14.30	12.07	13.15	13.52	13.68	12.83	14.31
60	13.46	13.30	14.65	13.83	12.86	13.94	11.64	12.76	13.16	13.34	12.37	13.93
70	13.21	12.94	14.31	13.54	12.59	13.64	11.29	12.44	12.86	13.05	12.00	13.61
100	12.65	12.15	13.53	12.87	11.98	12.98	10.52	11.73	12.20	12.41	11.18	12.90
110	12.50	11.95	13.33	12.70	11.82	12.81	10.32	11.55	12.02	12.24	10.97	12.71
120	12.37	11.76	13.15	12.55	11.67	12.66	10.15	11.38	11.87	12.09	10.78	12.55
130	12.25	11.60	12.99	12.41	11.54	12.52	9.99	11.23	11.73	11.96	10.61	12.40
140	12.14	11.45	12.84	12.28	11.43	12.39	9.84	11.10	11.60	11.83	10.45	12.26
150	12.04	11.31	12.70	12.16	11.32	12.27	9.71	10.97	11.48	11.72	10.31	12.14
160	11.94	11.18	12.58	12.05	11.21	12.16	9.59	10.86	11.37	11.61	10.18	12.02
170	11.86	11.06	12.46	11.94	11.12	12.06	9.47	10.75	11.27	11.51	10.06	11.91
180	11.77	10.95	12.35	11.85	11.03	11.96	9.36	10.65	11.17	11.42	9.94	11.81
200	11.62	10.75	12.15	11.67	10.87	11.79	9.17	10.46	11.00	11.25	9.74	11.62
210	11.55	10.66	12.05	11.59	10.80	11.71	9.08	10.38	10.92	11.18	9.64	11.54
220	11.49	10.57	11.97	11.52	10.72	11.63	9.00	10.30	10.84	11.10	9.55	11.46
230	11.43	10.48	11.88	11.45	10.66	11.56	8.92	10.22	10.77	11.03	9.47	11.38
240	11.37	10.41	11.80	11.38	10.60	11.50	8.85	10.15	10.70	10.97	9.39	11.31
250	11.31	10.33	11.73	11.31	10.53	11.43	8.77	10.08	10.64	10.90	9.31	11.24
260	11.26	10.26	11.66	11.25	10.48	11.37	8.71	10.02	10.58	10.84	9.24	11.18
270	11.21	10.19	11.59	11.19	10.42	11.31	8.64	9.96	10.52	10.79	9.17	11.11
280	11.16	10.13	11.52	11.13	10.37	11.25	8.58	9.90	10.46	10.73	9.11	11.05
290	11.11	10.06	11.46	11.08	10.32	11.20	8.52	9.84	10.41	10.68	9.04	10.99
300	11.06	10.00	11.40	11.03	10.27	11.14	8.46	9.79	10.35	10.63	8.98	10.94
310	11.02	9.95	11.34	10.97	10.22	11.09	8.41	9.73	10.30	10.58	8.92	10.88
320	10.98	9.89	11.29	10.93	10.18	11.04	8.36	9.68	10.26	10.53	8.87	10.83
340	10.90	9.78	11.18	10.83	10.09	10.95	8.26	9.59	10.16	10.44	8.76	10.74
350	10.86	9.73	11.13	10.79	10.05	10.91	8.21	9.54	10.12	10.40	8.71	10.69
380	10.75	9.59	10.99	10.66	9.93	10.78	8.08	9.41	10.00	10.28	8.57	10.56
390	10.71	9.55	10.94	10.63	9.90	10.74	8.04	9.37	9.96	10.24	8.53	10.52
400	10.68	9.51	10.90	10.59	9.86	10.71	7.99	9.33	9.92	10.21	8.48	10.48
410	10.65	9.47	10.86	10.55	9.83	10.67	7.96	9.29	9.88	10.17	8.44	10.44
420	10.62	9.42	10.82	10.51	9.80	10.63	7.92	9.26	9.85	10.14	8.40	10.40

Tabla 23: Humedad residual, presión sopado 6 bar, masa sólido 120 g, masa líquido 120 g aprox.

t (s)	H-60			H-50			H-40		H-30			H-20		
	A	B	C	A	B	C	A	B	A	B	C	A	B	C
10	16.74	16.95	15.59	16.81	17.39	17.79	18.27	17.37	16.84	19.84	20.83	15.34	16.13	16.77
15	16.74	16.17	14.85	15.73	16.43	16.86	16.97	16.36	15.83	18.60	19.48	14.38	15.31	15.74
20	16.74	15.65	14.35	15.01	15.78	16.23	16.11	15.68	15.14	17.77	18.57	13.73	14.76	15.05
25	16.74	15.25	13.98	14.48	15.29	15.75	15.47	15.17	14.64	17.15	17.89	13.25	14.34	14.53
30	16.74	14.93	13.68	14.05	14.91	15.37	14.97	14.77	14.23	16.66	17.36	12.87	14.01	14.12
35	16.74	14.67	13.43	13.70	14.59	15.06	14.56	14.43	13.90	16.26	16.92	12.55	13.74	13.78
40	16.74	14.45	13.22	13.41	14.32	14.80	14.21	14.15	13.62	15.92	16.55	12.29	13.50	13.49
45	16.74	14.25	13.03	13.15	14.09	14.57	13.91	13.91	13.38	15.62	16.23	12.06	13.30	13.25
50	16.74	14.08	12.87	12.93	13.88	14.36	13.65	13.69	13.16	15.36	15.95	11.86	13.12	13.03
60	16.74	13.79	12.59	12.55	13.53	14.02	13.21	13.33	12.80	14.92	15.47	11.52	12.82	12.66
65	16.74	13.66	12.47	12.39	13.38	13.87	13.02	13.17	12.65	14.74	15.27	11.37	12.69	12.50
70	16.74	13.55	12.36	12.24	13.24	13.73	12.84	13.03	12.50	14.56	15.08	11.23	12.57	12.36
75	16.74	13.44	12.26	12.10	13.11	13.61	12.68	12.89	12.37	14.40	14.91	11.11	12.46	12.23
80	16.74	13.34	12.17	11.98	13.00	13.49	12.54	12.77	12.25	14.26	14.75	11.00	12.36	12.10
85	16.74	13.25	12.08	11.86	12.89	13.38	12.40	12.66	12.14	14.12	14.60	10.89	12.26	11.99
90	16.74	13.16	12.00	11.75	12.78	13.28	12.27	12.55	12.03	13.99	14.47	10.79	12.17	11.88
95	16.74	13.08	11.92	11.64	12.69	13.19	12.15	12.45	11.93	13.87	14.34	10.70	12.09	11.78
100	16.74	13.00	11.85	11.55	12.60	13.10	12.04	12.36	11.84	13.76	14.22	10.61	12.01	11.69
105	16.74	12.93	11.78	11.46	12.51	13.01	11.93	12.27	11.75	13.65	14.10	10.53	11.94	11.60
110	16.74	12.86	11.72	11.37	12.43	12.93	11.83	12.18	11.67	13.55	13.99	10.45	11.86	11.51
115	16.74	12.80	11.66	11.29	12.35	12.86	11.74	12.10	11.59	13.46	13.89	10.38	11.80	11.43
120	16.74	12.73	11.60	11.21	12.28	12.78	11.65	12.03	11.51	13.37	13.79	10.31	11.73	11.36
125	16.74	12.67	11.54	11.14	12.21	12.72	11.56	11.95	11.44	13.28	13.70	10.24	11.67	11.28
130	16.74	12.62	11.49	11.06	12.14	12.65	11.48	11.89	11.37	13.20	13.61	10.18	11.61	11.21
135	16.74	12.56	11.44	11.00	12.08	12.59	11.40	11.82	11.31	13.12	13.52	10.11	11.56	11.15
140	16.74	12.51	11.39	10.93	12.02	12.53	11.33	11.76	11.25	13.04	13.44	10.06	11.50	11.08
150	16.74	12.41	11.29	10.81	11.90	12.41	11.19	11.64	11.13	12.90	13.29	9.95	11.40	10.97
155	16.74	12.36	11.25	10.75	11.85	12.36	11.12	11.58	11.07	12.83	13.22	9.89	11.36	10.91
160	16.74	12.32	11.21	10.70	11.79	12.30	11.06	11.53	11.02	12.77	13.15	9.84	11.31	10.85
165	16.74	12.28	11.17	10.64	11.74	12.25	11.00	11.47	10.97	12.71	13.08	9.79	11.26	10.80
170	16.74	12.23	11.13	10.59	11.69	12.21	10.94	11.42	10.92	12.65	13.02	9.75	11.22	10.75
180	16.74	12.15	11.05	10.49	11.60	12.11	10.83	11.33	10.82	12.53	12.89	9.66	11.14	10.66
185	16.74	12.12	11.01	10.45	11.56	12.07	10.77	11.28	10.78	12.48	12.84	9.62	11.10	10.61
190	16.74	12.08	10.98	10.40	11.51	12.03	10.72	11.24	10.73	12.42	12.78	9.58	11.06	10.57
200	16.74	12.01	10.91	10.31	11.43	11.94	10.62	11.15	10.65	12.32	12.67	9.50	10.99	10.48
210	16.74	11.94	10.85	10.23	11.35	11.87	10.53	11.07	10.57	12.23	12.57	9.42	10.92	10.40
215	16.74	11.91	10.82	10.19	11.32	11.83	10.48	11.03	10.53	12.18	12.52	9.39	10.89	10.36

Tabla 24: Humedad residual, presión sopado 4 bar, masa sólido 120 g, masa líquido 120 g aprox.

t(s)	H-60		H-50			H-40			H-30			H-20		
	A	B	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
1	24.78	24.47	31.86	23.50	25.06	26.15	24.79	21.82	23.65	27.88	22.88	24.26	23.50	24.42
10	18.93	18.44	20.52	17.87	19.18	19.17	17.80	17.09	17.61	18.98	16.85	17.78	17.87	18.57
20	17.45	16.93	17.98	16.46	17.70	17.45	16.11	15.88	16.12	16.90	15.36	16.19	16.45	17.10
30	16.64	16.11	16.64	15.68	16.89	16.52	15.19	15.21	15.30	15.80	14.56	15.33	15.68	16.29
40	16.09	15.55	15.75	15.15	16.33	15.89	14.58	14.76	14.75	15.06	14.01	14.75	15.15	15.74
50	15.68	15.12	15.09	14.76	15.92	15.42	14.11	14.41	14.33	14.51	13.60	14.31	14.75	15.33
60	15.35	14.79	14.57	14.44	15.58	15.05	13.75	14.14	14.00	14.07	13.27	13.96	14.44	15.00
70	15.07	14.51	14.15	14.18	15.31	14.74	13.45	13.91	13.73	13.71	13.01	13.67	14.18	14.73
80	14.84	14.27	13.79	13.95	15.07	14.47	13.19	13.71	13.50	13.41	12.78	13.43	13.95	14.50
90	14.64	14.07	13.49	13.76	14.87	14.25	12.97	13.54	13.29	13.15	12.58	13.22	13.76	14.30
100	14.46	13.89	13.22	13.59	14.69	14.04	12.77	13.39	13.12	12.92	12.40	13.03	13.59	14.12
110	14.30	13.73	12.98	13.43	14.53	13.87	12.60	13.26	12.96	12.72	12.25	12.86	13.43	13.96
120	14.15	13.58	12.77	13.30	14.38	13.70	12.44	13.14	12.81	12.53	12.11	12.71	13.29	13.81
130	14.02	13.45	12.57	13.17	14.25	13.56	12.30	13.02	12.68	12.37	11.98	12.58	13.17	13.68
140	13.90	13.33	12.40	13.05	14.13	13.42	12.17	12.92	12.56	12.21	11.86	12.45	13.05	13.56
150	13.79	13.21	12.23	12.95	14.01	13.30	12.05	12.83	12.45	12.07	11.75	12.34	12.95	13.45
160	13.68	13.11	12.08	12.85	13.91	13.18	11.94	12.74	12.35	11.94	11.65	12.23	12.85	13.35
170	13.59	13.01	11.94	12.76	13.81	13.07	11.83	12.66	12.25	11.82	11.56	12.13	12.76	13.25
180	13.50	12.92	11.82	12.67	13.72	12.97	11.74	12.58	12.17	11.71	11.47	12.04	12.67	13.16
190	13.41	12.83	11.69	12.59	13.63	12.88	11.65	12.51	12.08	11.61	11.39	11.95	12.59	13.08
200	13.33	12.75	11.58	12.51	13.55	12.79	11.56	12.44	12.00	11.51	11.31	11.87	12.51	13.00
210	13.25	12.68	11.47	12.44	13.48	12.71	11.48	12.38	11.93	11.41	11.24	11.79	12.44	12.92
220	13.18	12.60	11.37	12.37	13.40	12.63	11.40	12.32	11.86	11.33	11.17	11.71	12.37	12.85
230	13.11	12.54	11.27	12.31	13.33	12.55	11.33	12.26	11.79	11.24	11.10	11.64	12.30	12.79
240	13.05	12.47	11.18	12.24	13.27	12.48	11.26	12.20	11.73	11.16	11.04	11.58	12.24	12.72
250	12.99	12.41	11.10	12.18	13.21	12.41	11.20	12.15	11.66	11.09	10.98	11.51	12.18	12.66
260	12.93	12.35	11.01	12.13	13.15	12.35	11.13	12.10	11.61	11.01	10.92	11.45	12.13	12.60
270	12.87	12.29	10.93	12.07	13.09	12.28	11.07	12.05	11.55	10.95	10.87	11.39	12.07	12.54
280	12.82	12.24	10.86	12.02	13.03	12.22	11.01	12.01	11.50	10.88	10.82	11.34	12.02	12.49
290	12.76	12.18	10.79	11.97	12.98	12.16	10.96	11.96	11.44	10.82	10.76	11.29	11.97	12.44
300	12.71	12.13	10.72	11.92	12.93	12.11	10.90	11.92	11.40	10.75	10.72	11.23	11.92	12.39

7.2.2. Resultados saturación residual

Tabla 25: Saturación residual, presión sopaldo 5 bar, masa sólido 150 g, masa líquido 180 g
aprox

t (s)	S-60					S-50	S-40	S-30			S-20	
	A	B	C	D	E	A	A	A	B	C	A	B
10	0.69	0.67	0.66	0.72	0.64	0.69	0.63	0.67	0.78	0.75	0.66	0.70
20	0.60	0.58	0.59	0.64	0.58	0.64	0.57	0.59	0.75	0.72	0.61	0.67
30	0.55	0.54	0.55	0.59	0.55	0.61	0.54	0.55	0.73	0.69	0.58	0.67
40	0.52	0.51	0.52	0.56	0.52	0.59	0.51	0.53	0.72	0.68	0.56	0.66
50	0.50	0.49	0.50	0.54	0.50	0.58	0.50	0.51	0.70	0.66	0.54	0.66
60	0.48	0.47	0.49	0.52	0.49	0.57	0.48	0.49	0.69	0.65	0.52	0.64
70	0.46	0.46	0.47	0.51	0.48	0.56	0.47	0.48	0.69	0.64	0.51	0.64
80	0.45	0.45	0.46	0.49	0.47	0.55	0.46	0.47	0.68	0.64	0.50	0.62
90	0.44	0.44	0.45	0.48	0.46	0.54	0.45	0.46	0.67	0.63	0.48	0.60
100	0.43	0.43	0.45	0.47	0.45	0.54	0.45	0.45	0.67	0.63	0.47	0.59
120	0.41	0.41	0.43	0.46	0.44	0.53	0.43	0.44	0.64	0.61	0.46	0.56
130	0.41	0.41	0.43	0.45	0.44	0.52	0.43	0.43	0.62	0.60	0.45	0.55
140	0.40	0.40	0.42	0.45	0.43	0.52	0.42	0.42	0.60	0.59	0.44	0.55
150	0.40	0.40	0.42	0.44	0.43	0.51	0.42	0.42	0.59	0.57	0.43	0.54
160	0.39	0.39	0.41	0.43	0.42	0.51	0.41	0.41	0.58	0.57	0.43	0.53
170	0.39	0.39	0.41	0.43	0.42	0.51	0.41	0.41	0.57	0.56	0.42	0.52
190	0.38	0.38	0.40	0.42	0.41	0.50	0.40	0.40	0.55	0.55	0.41	0.50
200	0.37	0.38	0.40	0.42	0.41	0.50	0.40	0.40	0.54	0.54	0.40	0.49
210	0.37	0.37	0.39	0.41	0.41	0.50	0.40	0.40	0.53	0.53	0.40	0.48
230	0.36	0.37	0.39	0.41	0.40	0.49	0.39	0.39	0.50	0.51	0.39	0.46
240	0.36	0.36	0.38	0.40	0.40	0.49	0.39	0.39	0.50	0.50	0.38	0.45
250	0.36	0.36	0.38	0.40	0.40	0.49	0.39	0.38	0.49	0.49	0.38	0.44
260	0.35	0.36	0.38	0.40	0.39	0.48	0.38	0.38	0.48	0.48	0.37	0.43
270	0.35	0.36	0.38	0.39	0.39	0.48	0.38	0.38	0.47	0.47	0.37	0.42
280	0.35	0.35	0.38	0.39	0.39	0.48	0.38	0.38	0.46	0.46	0.37	0.41
290	0.35	0.35	0.37	0.39	0.39	0.48	0.38	0.37	0.45	0.45	0.36	0.40
300	0.34	0.35	0.37	0.39	0.38	0.48	0.38	0.37	0.44	0.44	0.36	0.38
310	0.34	0.35	0.37	0.39	0.38	0.48	0.37	0.37	0.43	0.43	0.35	0.37
320	0.34	0.34	0.37	0.38	0.38	0.47	0.37	0.37	0.42	0.42	0.35	0.36
330	0.34	0.34	0.36	0.38	0.38	0.47	0.37	0.37	0.40	0.41	0.35	0.35
340	0.33	0.34	0.36	0.38	0.38	0.47	0.37	0.36	0.39	0.40	0.35	0.34
350	0.33	0.34	0.36	0.38	0.38	0.47	0.37	0.36	0.38	0.39	0.35	0.33
360	0.33	0.34	0.36	0.37	0.37	0.47	0.37	0.36	0.37	0.38	0.35	0.33
390	0.33	0.33	0.35	0.37	0.37	0.46	0.36	0.36	0.35	0.35	0.35	0.33
400	0.32	0.33	0.35	0.37	0.37	0.46	0.36	0.35	0.34	0.34	0.35	0.33
410	0.32	0.33	0.35	0.37	0.37	0.46	0.36	0.35	0.33	0.34	0.35	0.33
420	0.32	0.33	0.35	0.36	0.37	0.46	0.36	0.35	0.32	0.34	0.35	0.33

Tabla 26: Saturacion residual, presion sopaldo 5 bar, masa solido 120 g, masa liquido 120 g
aprox

t (s)	S-60			S-50	S-40	S-30	S-20		
	A	B	C	A	A	A	A	B	C
180	0.405	0.394	0.367	0.407	0.394	0.377	0.416	0.398	0.384
170	0.414	0.399	0.369	0.412	0.400	0.381	0.421	0.404	0.391
160	0.423	0.403	0.371	0.417	0.406	0.385	0.426	0.410	0.398
150	0.433	0.408	0.374	0.422	0.413	0.389	0.431	0.416	0.405
140	0.443	0.414	0.376	0.428	0.420	0.394	0.436	0.422	0.413
130	0.454	0.419	0.378	0.433	0.428	0.398	0.442	0.429	0.422
120	0.465	0.425	0.381	0.439	0.436	0.403	0.448	0.436	0.431
110	0.477	0.431	0.384	0.446	0.445	0.409	0.454	0.444	0.441
100	0.490	0.438	0.387	0.453	0.454	0.415	0.461	0.452	0.451
90	0.503	0.445	0.390	0.460	0.465	0.421	0.469	0.461	0.462
80	0.518	0.453	0.393	0.468	0.476	0.428	0.477	0.471	0.475
70	0.535	0.462	0.396	0.476	0.488	0.436	0.486	0.483	0.488
60	0.553	0.472	0.399	0.486	0.503	0.445	0.497	0.496	0.503
50	0.574	0.482	0.403	0.496	0.519	0.456	0.509	0.510	0.520
40	0.598	0.494	0.407	0.507	0.538	0.468	0.524	0.528	0.540
30	0.626	0.509	0.411	0.520	0.562	0.484	0.542	0.551	0.565
20	0.664	0.526	0.415	0.535	0.595	0.505	0.566	0.582	0.596
10	0.718	0.548	0.419	0.553	0.647	0.538	0.605	0.636	0.642
1	0.846	0.632	0.429	0.604	0.647	0.538	0.605	0.636	0.642

Tabla 27: Tiempo -Saturacion residual, presion sopaldo 4 bar, masa solido 120 g, masa liquido 120 g aprox

S	S-60			S-50		s-40		S-30			S-20-		
	A - t (s)	B - t (s)	C - t (s)	A - t (s)	B - t (s)	A - t (s)	B - t (s)	A - t (s)	B - t (s)	C - t (s)	A - t (s)	B - t (s)	C - t (s)
1.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.70	29	14	16	38	9	6	7	1	11	9	9	3	6
0.69	34	17	19	44	11	8	8	1	13	11	11	4	7
0.68	38	20	23	50	13	9	9	2	15	13	14	5	9
0.67	43	24	27	57	15	11	11	2	17	15	17	6	10
0.66	49	28	31	64	17	13	13	3	20	18	20	8	13
0.65	55	33	36	72	20	15	16	3	23	21	24	10	16
0.64	61	39	42	81	23	18	18	4	26	25	29	13	19
0.63	68	45	49	91	27	21	21	5	30	28	34	16	22
0.62	76	52	56	102	31	24	25	7	33	33	40	20	27
0.61	84	60	64	113	35	28	28	8	38	38	47	24	32
0.60	93	69	73	126	40	32	33	10	42	43	55	30	38
0.59	103	79	83	139	46	37	38	13	48	49	64	36	44
0.58	113	91	94	153	52	42	43	15	53	56	75	44	52
0.57	125	103	107	169	58	48	49	19	59	63	86	53	61
0.56	137	118	120	186	66	55	56	23	66	71	99	63	71
0.55	149	133	135	204	74	62	63	28	73	80	114	76	82
0.54	163	150	152	223	83	71	71	33	81	90	131	90	95
0.53	178	169	170	244	93	80	80	40	89	101	149	107	110
0.52	193	190	190	266	103	90	90	48	98	113	170	127	127
0.51	210	213	211	289	115	101	101	57	108	126	193	150	145
0.50	228	239	235	315	128	113	114	68	119	141	219	176	166
0.49	247	266	261	341	142	126	127	80	130	156	247	206	189
0.48	267	296	288	370	157	141	141	95	142	173	278	241	216
0.47	288	329	319	400	173	157	157	111	155	192	313	281	245
0.46	310	365	351	432	190	174	174	131	169	212	351	326	277
0.45	334	404	387	466	209	193	193	153	184	233	393	377	313
0.44	359	447	425	502	230	214	214	178	200	257	440	436	353
0.43	385	493	466	540	252	236	236	207	217	282	490	502	397
0.42	413	543	511	580	276	261	260	240	235	309	546	577	446
0.41	442	597	559	622	302	287	286	277	254	339	606	661	499

Tabla 28: Tiempo-Saturacion residual, presion sopaldo 6 bar, masa solido 120 g, masa liquido 120 g aprox

S	S-60-6			S-50-6			s-40-6			S-30-6			S-20-6		
	A - t (s)	B - t (s)	C - t (s)	A - t (s)	B - t (s)	C - t (s)	A - t (s)	B - t (s)	C - t (s)	A - t (s)	B - t (s)	C - t (s)	A - t (s)	B - t (s)	C - t (s)
1.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.70	6	4	1	12	5	10	9	8	11	4	7	11	3	5	6
0.69	8	5	1	14	6	12	11	9	12	5	8	13	3	6	8
0.68	9	6	1	16	7	14	12	10	14	6	9	15	4	7	9
0.67	11	8	2	18	8	16	14	12	15	7	10	18	5	8	10
0.66	13	9	2	21	10	19	16	13	17	9	12	21	5	9	12
0.65	16	11	3	24	11	22	18	15	19	10	14	24	6	11	14
0.64	19	13	4	27	13	25	20	17	21	12	16	28	7	12	16
0.63	22	15	5	31	14	29	22	19	24	14	18	33	8	14	18
0.62	26	18	7	35	16	32	25	21	26	16	20	38	10	16	21
0.61	30	21	9	40	19	37	28	24	29	18	23	43	11	18	24
0.60	35	24	11	45	21	42	31	27	32	21	26	49	13	21	27
0.59	41	28	15	50	24	47	35	30	35	24	29	56	15	23	30
0.58	48	32	19	56	27	53	38	33	38	27	33	64	17	26	34
0.57	55	37	23	63	30	59	42	36	42	31	36	73	19	30	38
0.56	63	43	29	70	33	66	47	40	46	35	41	82	22	33	43
0.55	73	49	36	78	37	74	51	44	50	39	45	93	25	37	48
0.54	83	56	45	86	41	82	56	48	55	44	50	105	28	41	54
0.53	95	64	56	95	46	91	62	53	59	50	55	118	31	46	60
0.52	108	72	69	105	51	101	67	58	64	56	61	132	35	51	66
0.51	122	82	84	116	56	111	74	63	70	63	67	147	39	57	74
0.50	138	93	103	128	62	123	80	68	75	70	74	164	44	62	81
0.49	156	104	125	140	68	135	87	74	81	78	81	182	49	69	90
0.48	175	117	151	153	75	148	95	81	87	87	89	202	54	76	99
0.47	197	132	182	168	82	163	102	88	94	96	97	224	60	83	109
0.46	220	147	219	183	90	178	111	95	101	106	106	248	66	91	119
0.45	246	164	263	199	99	195	120	102	108	118	116	273	73	100	131
0.44	275	183	314	217	108	212	129	111	116	130	126	301	81	109	143
0.43	306	204	373	236	117	231	139	119	124	143	137	331	89	119	156
0.42	340	226	443	256	128	252	150	128	133	157	149	363	98	130	170
0.41	378	251	524	277	139	274	161	138	142	172	162	398	108	141	185

7.3. Ejemplos

Los ejemplos de cálculo fueron realizados con datos de pruebas reales

7.3.1. Ejemplo calculo N°1

Determinar curva de capilaridad de un mineral cuya densidad de sólido es 3,48 (g/cm³), temperatura de pulpa 13 (°C) masa sólida 117,09(g), masa líquido 113,7 g, masa de líquido extraída etapa de formación 81,63 (g), altura del queque 3,48 (cm).

- **Calcular masa de líquido extraída etapa soplado**

$$m_{\text{liquido-soplado}} = m_{\text{liquido}(p)} - m_{\text{liquido-formacion}} = m_{\text{liquido}(p)} - 81,63$$

- **Calcular volumen de líquido extraído etapa soplado**

$$V_{\text{liquido-soplado}(p)} = \frac{m_{\text{liquido-soplado}(p)}}{\text{densidad}_{\text{filtrado}}} = \frac{m_{\text{liquido-soplado}(p)}}{0,9995}$$

- **Calcular volumen de poros**

$$V_{\text{poros}} = \text{Vol agua en el queque} = \frac{m_{\text{liquido}} - m_{\text{liquido-formacion}}}{\text{densidad}_{\text{filtrado}}} = \frac{113,7 - 81,63}{0,995} = 34,5 \text{ cm}^3$$

- **Calcular saturación**

$$S = \frac{V_{\text{poros}} - V_{\text{liquido-soplado}(p)}}{V_{\text{poros}}} = \frac{34,5 - V_{\text{liquido-soplado}(p)}}{34,5}$$

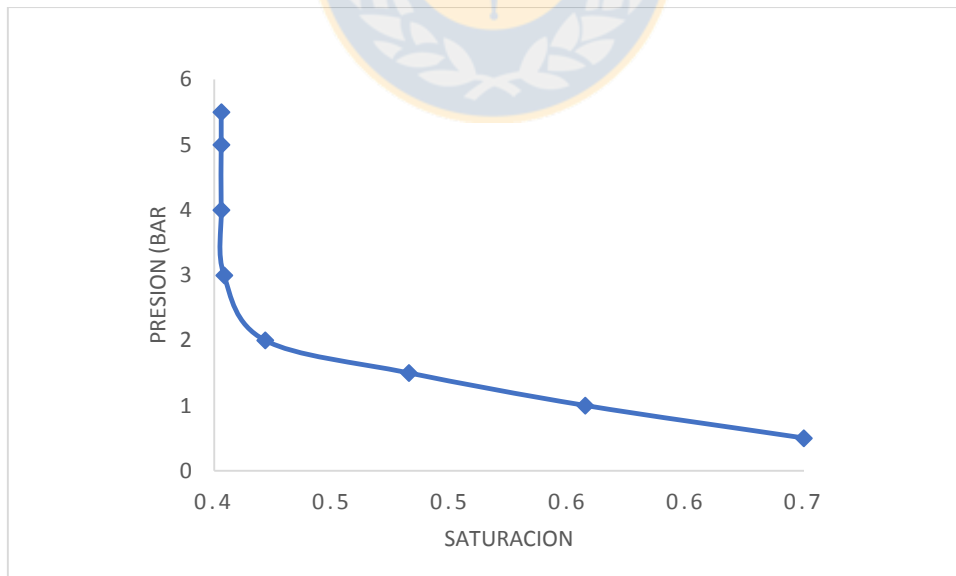


Figura 37: Curva Capilaridad

Tabla 29: Curva capilaridad

Presión Bar	Agua Extraída G	Agua Extraída g	Agua Extraída cm3	Saturación
0,5	91,30	12,1	12,1	0,650
1,0	94,50	15,3	15,3	0,557
1,5	97,08	17,9	17,9	0,482
2,0	99,18	20,0	20,0	0,422
3,0	99,78	20,6	20,6	0,404
4,0	99,82	20,6	20,6	0,403
5,0	99,82	20,6	20,6	0,403
5,5	99,82	20,6	20,6	0,403

7.3.2. Ejemplo de cálculo N°2

Determinar la resistencia específica del medio filtrante y la permeabilidad del queque que, se espera para la filtración de un mineral de relave en el equipo filtra test.

Tabla 30: Datos etapa formación de queque

Datos	
Densidad del sólido, g/cm ³	3,48
Densidad del filtrado, g/cm ³	0,997
Viscosidad del filtrado, g/cm-s	9,54E-03
Temperatura de la pulpa, °C	22,00
Presión de formación de queque, bar	3,00
Espesor del queque, cm	3,65
Área de filtrado, cm ²	19,59
Masa sólida, g	115,71
Masa líquida, g	116,4
Masa queque, g	131,02

Procedimiento:

- **Determinar el volumen de filtrado**

Con la tabla N°2 determinar el volumen de filtrado de cada tiempo , esto se obtiene dividiendo la masa de filtrado por la densidad del filtrado, ejemplo:

$$\text{Vol filtrado (t=91)} = 61,09 / 0,997 = 61,22 \text{ (cm}^3\text{)}$$

- **Determinar el cociente tiempo/volumen filtrado**

para el caso anterior t=91 segundos, Vf = 61,22 (cm³)

$$t/v_f = 91 / 61,22 = 1,49 \text{ (s/cm}^3\text{)}$$

- **Obtener graficar t/V_f versus V_f**

Tabla 31: Datos etapa formación

Tiempo	Formación	V_f	t/V_f
S	g	cm ³	s/cm ³
128	88,08	88,35	1,45
121	74,09	74,31	1,63
111	70,07	70,28	1,58
101	65,09	65,29	1,55
91	61,09	61,27	1,49
81	56,05	56,22	1,44
71	51,06	51,21	1,39
61	46,01	46,15	1,32
51	40,01	40,13	1,27
41	33,03	33,13	1,24
31	24,06	24,13	1,29
21	14,06	14,10	1,50
11	0,05	0,05	221,43
0	0,01	0,01	10,47

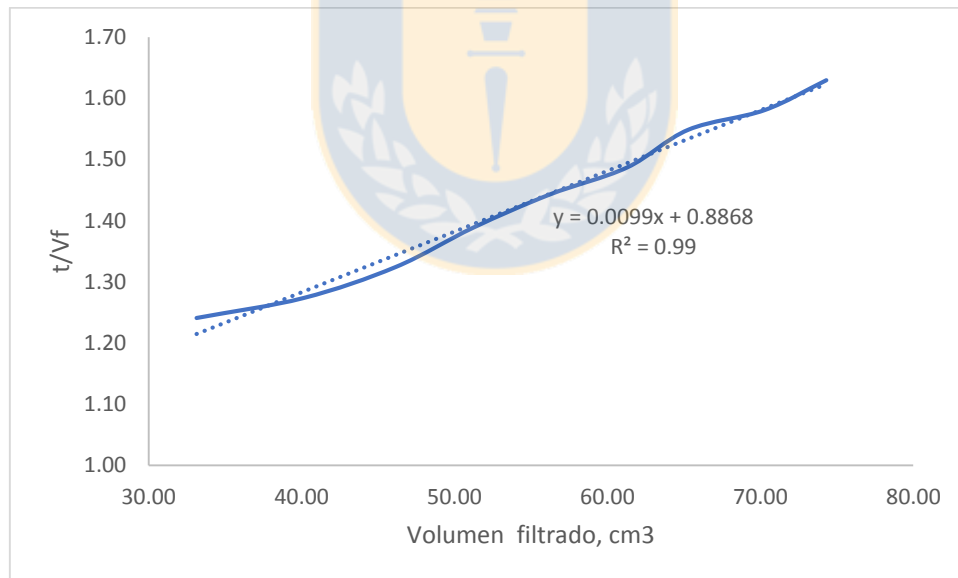


Figura 38 : t/V_f vs V_f

- **Obtener a y b**

De la gráfica de la figura 21 se debe extraer los siguientes datos, la pendiente y el coeficiente libre

Estos datos sera respectivamente “b” y “a”

En este caso $b=0,0099$ y $a=0,886$

- **Determinar porosidad (ϵ), fracción volumétrica de la pulpa(φ)**

$$\epsilon = \frac{\text{vol solido}}{\text{vol solido} + \text{vol agua en el queque}}$$

$$\text{Vol solido} = \frac{\text{masa solido}}{\text{densidad solido}}$$

$$\text{Vol agua en el queque} = \frac{\text{masa liquido} - \text{masa liquido extraido}}{\text{densidad fintrado}}$$

$$\varphi = \frac{\text{vol solido}}{\text{vol solido} + \text{vol agua en queque}}$$

Reemplazando datos:

$$\text{Vol solido} = \frac{115,71}{3,48} = 33,25 \text{ cm}^3$$

$$\text{Vol agua en el queque} = \text{vol de poros} = \frac{116,71 - 78,3}{0,997} = 38,17 \text{ cm}^3$$

$$\epsilon = \frac{33,25}{33,25 + 38,17} = 0,534$$

$$\varphi = \frac{33,25}{33,25 + 38,17} = 0,221$$

- **Calcular R_m y k**

$$R_m = a * \Delta p * \frac{s}{\mu} = 0,886 * 3 * \frac{19,59}{0,00954} = 5291,9 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$$

$$k(\epsilon_0) = \frac{1}{b} * \frac{\mu}{2 * S^2 * \Delta p e} * \frac{\varphi_0}{(1 - \varphi_0 - \epsilon_0)} = \frac{1}{0,0099} * \frac{0,00954}{2 * 19,54^2 * 3} * \frac{0,221}{1 - 0,221 - 0,534}$$

$$k(\epsilon_0) = 0,000361 \text{ (cm}^2\text{)}$$

7.3.3. Ejemplo de cálculo N°3 (utilizar datos ejemplo N.° 2)

Se desea determinar las permeabilidades relativas del líquido y el aire en un proceso de filtración. Para ello se realizó experiencias en el Filtraset, con una pulpa de alrededor de 50% de sólidos en peso. Las condiciones experimentales fueron: presión de soplado 5 bar, área del filtro $S = 4.995 \text{ cm}^2$, temperatura de soplado 30°C , temperatura de pulpa 22°C , viscosidad del líquido $0,0095447 \text{ (g/cm}^3\text{s)}$, viscosidad del aire $0.00018756 \text{ (g/cm}^3\text{s)}$, permeabilidad del queque $k = 0,000361 \text{ cm}^2$, densidad del mineral $3,48 \text{ (g/cm}^3\text{)}$. Después de terminada la filtración, el queque húmedo se dando $131,02 \text{ (g)}$ y se procedió a secarlo. El queque seco pesó $115,71 \text{ g}$. densidad filtrado $0,997 \text{ (g/cm}^3\text{)}$.

Para desarrollar este ejemplo se debe observar la tabla 5

- **Calcular volumen filtrado del líquido.**

$$\text{Volumen filtrado} = \frac{\text{masa filtrado}}{\text{densidad filtrado}} = \frac{22,764}{0,997} = 22,832 \text{ cm}^3$$

- **Simular el valor experimental del volumen filtrado y flujo de aire**

Para simular estos valores se debe seguir el siguiente modelo para volumen filtrado ($V_f(t)$) y flujo de aire ($Q(t)$)

$$V_f(t) = A + B * t^c$$

$$Q(t) = a + b * \ln(t)$$

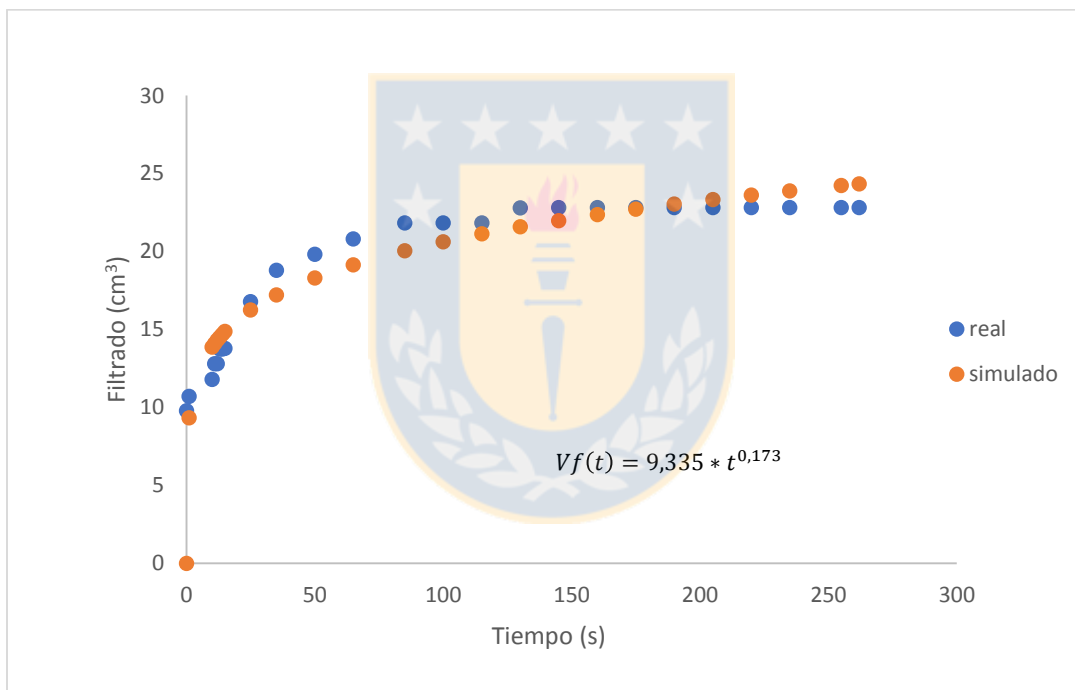


Figura 39: Simulación volmuen filtrado

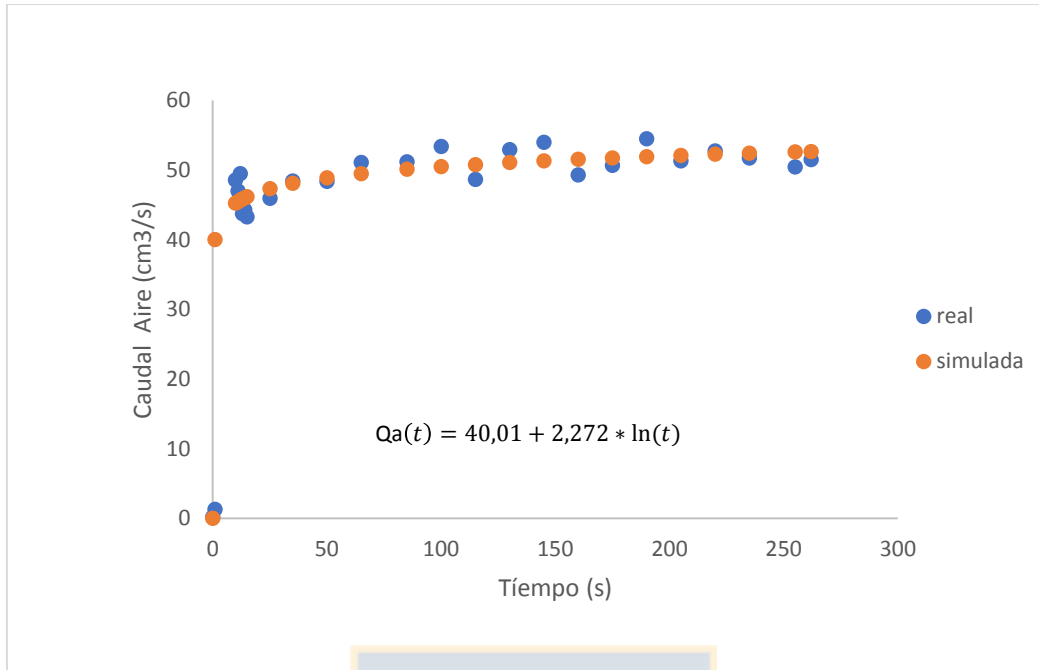


Figura 40: Simulación caudal de aire.

- **Obteniendo los siguientes modelos que son representado en las figuras anteriores**

$$Vf(t) = 0 + 9.335 * t^{0,173} (cm^3)$$

$$Q(t) = 40,01 + 2,272 * \ln(t) \left(\frac{cm^3}{s}\right)$$

- **Calcular caudal filtrado**

Con el modelo del volumen de filtrado se calcula el caudal de filtrado derivado la expresión anterior:

$$Qf(t) = b * c * t^{c-1}$$

$$Qf(t) = 1,615 * t^{-0,827} \left(\frac{cm^3}{s}\right)$$

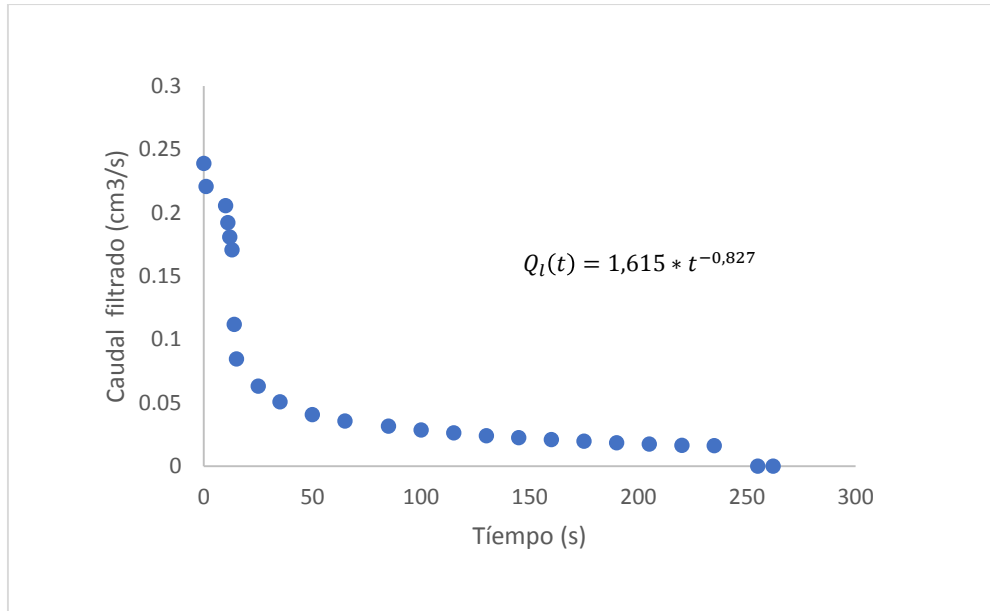


Figura 41: Caudal filtrado etapa soplado

- **Cálculo de la permeabilidad efectiva del aire y del líquido**

Utilizando las ecuaciones 24 y 25 se calculará el valor de cada permeabilidad

$$k_{l-efect}(t) = \left(\frac{l}{\Delta p}\right) * \left(\mu_l * \frac{Q_l(t)}{s}\right)$$

$$k_{a-efect}(t) = \left(\frac{l}{\Delta p}\right) * \left(\mu_a * \frac{Q_a(t)}{s}\right)$$

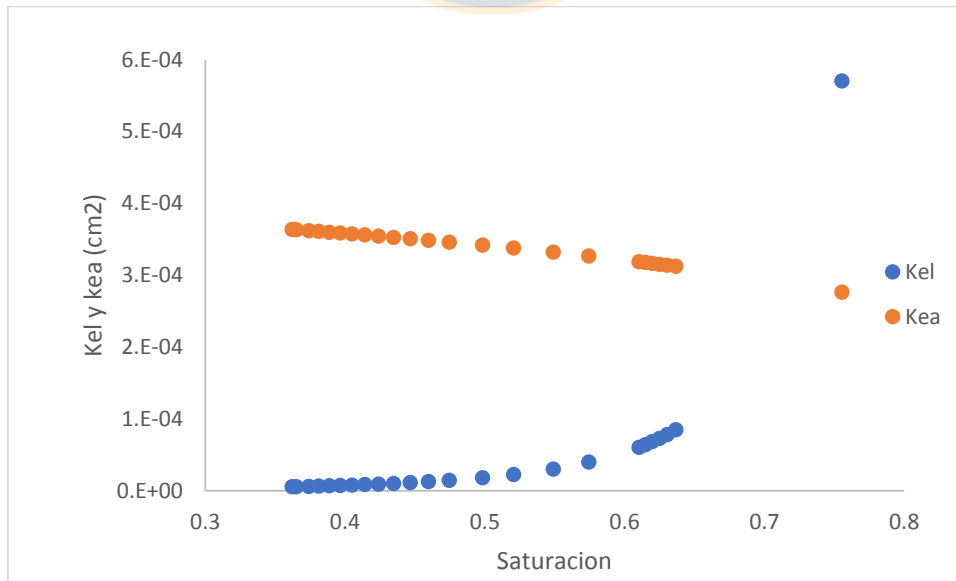


Figura 42: Permeabilidades efectivas del líquido y del aire

- **Calcular saturación**

$$s = \frac{V_{\text{liquido-queque-inicial}} - V_f(t)}{V_{\text{liquido-queque-inicial}}} = \frac{38,17 - V_f(t)}{V_{\text{liquido-queque-inicial}}}$$

Finalmente, se calculan las permeabilidades relativas del aire y del líquido

$$k_{rl} = \frac{k_{el}}{k(\varepsilon)} \quad \text{y} \quad k_{ra} = \frac{k_{ea}}{k(\varepsilon)}$$

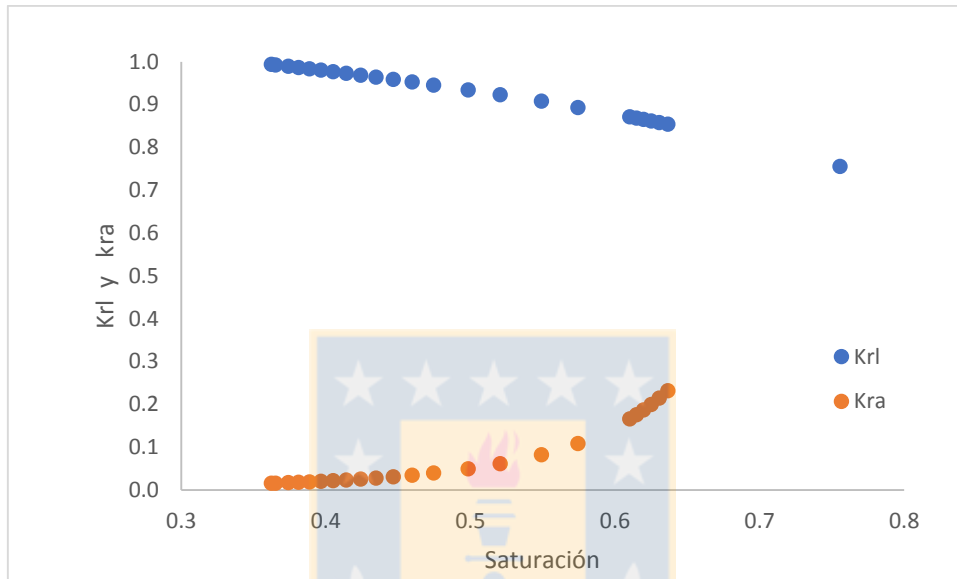


Figura 43: Permeabilidades relativas líquido y aire

- **Cálculo de humedad**

$$H = \frac{V_{poros} - V_f(t)}{V_{poros} - V_f(t) + V_{solido}} * 100$$

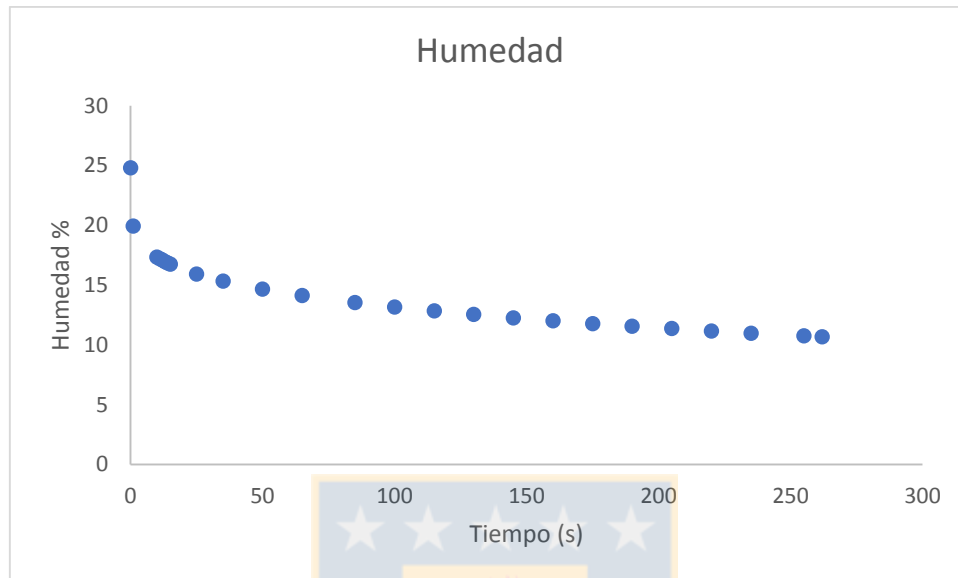


Figura 44: Porcentaje de humedad residual

Tabla 32: Etapa de soplado

Tiempo	Vf soplado	Vf soplado	Q de aire	vf simulado	Q simulado	Q filtrado	KeI	Kea	krl	kra	Saturación	Humedad
S	g	cm3	cm3/s	cm3	cm3/s	cm3/s	cm2	cm2			s	%
262	22,78	22,83	51,51	24,35	52,67	0,016	5,68E-06	3,64E-04	1,55E-02	0,99	0,36	10,7
255	22,78	22,83	50,45	24,24	52,61	0,016	5,81E-06	3,63E-04	1,59E-02	0,99	0,37	10,8
235	22,78	22,83	51,72	23,90	52,42	0,017	6,22E-06	3,62E-04	1,70E-02	0,99	0,37	11,0
220	22,78	22,83	52,76	23,63	52,27	0,018	6,57E-06	3,61E-04	1,79E-02	0,99	0,38	11,2
205	22,78	22,83	51,32	23,34	52,11	0,019	6,96E-06	3,60E-04	1,90E-02	0,98	0,39	11,4
190	22,78	22,83	54,49	23,04	51,94	0,020	7,41E-06	3,59E-04	2,03E-02	0,98	0,40	11,6
175	22,78	22,83	50,70	22,72	51,75	0,022	7,94E-06	3,57E-04	2,17E-02	0,98	0,40	11,8
160	22,78	22,83	49,30	22,37	51,55	0,024	8,55E-06	3,56E-04	2,33E-02	0,97	0,41	12,0
145	22,78	22,83	53,98	21,99	51,32	0,026	9,27E-06	3,55E-04	2,53E-02	0,97	0,42	12,3
130	22,76	22,81	52,92	21,58	51,07	0,028	1,02E-05	3,53E-04	2,77E-02	0,96	0,43	12,5
115	21,78	21,83	48,67	21,13	50,80	0,031	1,12E-05	3,51E-04	3,07E-02	0,96	0,45	12,8
100	21,78	21,83	53,41	20,63	50,48	0,035	1,26E-05	3,49E-04	3,45E-02	0,95	0,46	13,2
85	21,78	21,83	51,19	20,06	50,11	0,040	1,44E-05	3,46E-04	3,94E-02	0,95	0,47	13,5
65	20,77	20,82	51,09	19,16	49,50	0,050	1,80E-05	3,42E-04	4,92E-02	0,93	0,50	14,1
50	19,78	19,83	48,41	18,31	48,90	0,063	2,24E-05	3,38E-04	6,12E-02	0,92	0,52	14,7
35	18,76	18,80	48,41	17,22	48,09	0,084	3,01E-05	3,32E-04	8,22E-02	0,91	0,55	15,3
25	16,75	16,79	45,95	16,25	47,33	0,111	3,97E-05	3,27E-04	1,09E-01	0,89	0,57	15,9
15	13,76	13,79	43,30	14,88	46,17	0,170	6,07E-05	3,19E-04	1,66E-01	0,87	0,61	16,8
14	13,73	13,76	44,27	14,71	46,01	0,180	6,42E-05	3,18E-04	1,75E-01	0,87	0,61	16,9
13	13,73	13,76	43,73	14,52	45,84	0,192	6,83E-05	3,17E-04	1,87E-01	0,87	0,62	17,0
12	12,78	12,81	49,50	14,32	45,66	0,205	7,30E-05	3,15E-04	1,99E-01	0,86	0,62	17,1
11	12,78	12,81	46,99	14,11	45,46	0,220	7,84E-05	3,14E-04	2,14E-01	0,86	0,63	17,2
10	11,78	11,81	48,59	13,88	45,25	0,239	8,49E-05	3,13E-04	2,32E-01	0,85	0,64	17,4
1	10,69	10,72	1,30	9,34	40,02	1,607	5,71E-04	2,76E-04	1,56E+00	0,76	0,76	20,0
0	0,00	9,80	0,21	0,00	-	-	-	-	-	-	-	24,8
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

7.4. Análisis granulométrico

Tabla 33: Sympatec Helos Vectra - U. de Concepcion - Ing. Metalurgia

upper band limit	pct. under cumulative	pct. Over cumulative	Average for band	Distribut linear	Density Logarith	Pct. In band different.
x0/micrones	Q3/%	(1- Q3)/%	(xm/micrones)	q3/1/mm	q3lg	dQ3/%
1.80	15.76	94.05	1.15	45.80	13.94	15.76
2.20	19.93	91.85	2.00	54.79	20.88	4.17
2.60	23.68	89.45	2.40	60.07	22.50	3.75
3.00	27.06	86.90	2.80	63.70	23.64	3.38
3.60	31.54	82.94	3.30	65.98	24.67	4.48
4.40	36.62	77.60	4.00	66.80	25.37	5.08
5.20	40.83	72.34	4.80	65.73	25.27	4.21
6.20	45.14	66.07	5.70	62.71	24.56	4.31
7.40	49.25	59.14	6.80	57.75	23.30	4.11
8.60	52.54	52.89	8.00	52.07	21.94	3.29
10.00	55.73	46.35	9.30	46.72	21.22	3.19
12.00	59.62	38.08	11.00	41.37	21.40	3.89
15.00	64.53	27.54	13.50	35.11	22.07	4.91
18.00	68.55	19.11	16.50	28.12	22.10	4.02
21.00	71.71	12.68	19.50	21.42	20.55	3.16
25.00	74.65	6.65	23.00	15.09	16.93	2.94
30.00	78.75	2.09	27.50	9.11	12.13	4.10
36.00	80.95	0.00	33.00	3.48	10.43	2.20
42.00	84.22	0.00	39.00	0.00	14.30	3.27
50.00	87.61	0.00	46.00	0.00	18.77	3.39
60.00	90.45	0.00	55.00	0.00	18.67	2.84
72.00	93.02	0.00	66.00	0.00	15.64	2.57
86.00	95.67	0.00	79.00	0.00	14.49	2.65
102.00	98.37	0.00	94.00	0.00	15.57	2.70
122.00	100.00	0.00	112.00	0.00	15.08	1.63
146.00	100.00	0.00	134.00	0.00	9.13	0.00
174.00	100.00	0.00	160.00	0.00	0.00	0.00
206.00	100.00	0.00	190.00	0.00	0.00	0.00
246.00	100.00	0.00	226.00	0.00	0.00	0.00
294.00	100.00	0.00	270.00	0.00	0.00	0.00
350.00	100.00	0.00	322.00	0.00	0.00	0.00

	micrones		micrones		micrones
x10=	2.51	x50=	9.22	x90=	22.78
x5=	1.59	x63.2=	12.36	x80=	17.68