



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS**

**ANÁLISIS CRÍTICO DE LAS EFICIENCIAS DE PULPA Y ESPUMA
EN EXPERIMENTOS DE FLOTACIÓN A ESCALA DE
LABORATORIO**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
DE MINAS**

AARÓN KEMP CAÑÓN

PROFESOR GUÍA:

GONZALO MONTES ATENAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

ÁLVARO VALENCIA MUSALEM

ALDO CASALI BACELLI

SANTIAGO DE CHILE

2018

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE:** Ingeniero Civil de Minas
POR: Aarón Kemp Cañón
FECHA: 29/03/2018
PROFESOR GUÍA: Gonzalo Montes Atenas

ANÁLISIS CRÍTICO DE LAS EFICIENCIAS DE PULPA Y ESPUMA EN EXPERIMENTOS DE FLOTACIÓN A ESCALA DE LABORATORIO

El objetivo de esta memoria es estimar a escala de laboratorio las eficiencias de pulpa, espuma y su relación con el dropback de partículas en el tiempo. Para ello se realizaron una serie de experimentos bajo condiciones específicas de flotación (flujo de gas, composición mineral y distribución de tamaño de partícula). La evaluación de la eficiencia de espuma fue modelada en función de la fracción volumétrica de espuma removida. Lo anterior se realizó experimentalmente mediante el uso de 2 micas: (i) una para fijar el punto de inicio de la remoción de espuma y (ii) otra para realizar la remoción. El material valioso fue introducido en la celda de forma tal de reducir la contribución de recuperación por arrastre y exacerbar la recuperación por flotación verdadera mientras el material de ganga fue incorporado de forma tal de facilitar su recuperación vía mecanismos no selectivos de flotación.

Las recuperaciones globales de mineral valioso utilizando un 10%, 20%, 30%, 40% y 100% de fracción de espuma removida son 12%, 15%, 21%, 29% y 67% respectivamente. Al aumentar el tiempo de flotación en diez veces, la recuperación de mineral aumentó 2.5% y 4.9% al remover 20% y 40% de espuma respectivamente. La recuperación anterior está dada primordialmente por flotación verdadera la cual se asocia a dropback de partículas.

Estudios de modelamiento matemático indican que la recuperación de espuma disminuye con el tiempo de flotación mientras la recuperación de pulpa aumenta inicialmente de forma rápida hasta llegar a un máximo que se mantiene a través del tiempo.

La profundidad de espuma se midió en la sección de espuma removida y en la sección de espuma no removida. En la zona de remoción se aprecia un comportamiento sinusoidal de la profundidad de espuma en el tiempo exhibiendo una distribución normal de periodos centrada en 14 s, cercano a los 20 s. de paleteo. La profundidad de espuma en la zona no removida disminuye linealmente al aumentar la fracción volumétrica removida de espuma. Su deformación obedece a un coeficiente de Poisson de -0.48 ± 0.13 .

Estudios matemáticos y experimentales indican que la recuperación de espuma logra valores cercanos a cero a tiempos extendidos de flotación que corresponde a escenarios del tipo rougher scavenger y el dropback aumenta mientras menor fracción volumétrica de espuma sea removida.

**SUMMARY OF THE THESIS TO OBTAIN THE
TITLE OF:** Civil Mining Engineer
AUTHOR: Aarón Kemp Cañón
DATE: 03/29/2018
MAIN ADVISOR: Gonzalo Montes Atenas

CRITICAL ANALYSIS OF BOTH THE FROTH AND PULP RECOVERIES IN FLOTATION EXPERIMENTS AT LABORATORY SCALE

This study aims at estimating both the froth and pulp recoveries and their relationship with the particle dropback with time at laboratory scale. Several laboratory experiments were performed under specific flotation conditions (air flow, mineral composition and size distribution). The estimation of froth recovery was carried out considering the removed volumetric froth fraction. The latter was achieved experimentally using 2 plastic sheets: (i) one for setting the initial scrapping point and, (ii) another to conduct the froth scrapping. The valuable material was introduced in the cell so as to reduce the recovery by entrainment and to privilege the recovery by true flotation while the gangue was incorporated to facilitate the recovery by not selective froth flotation mechanisms.

Global recoveries of valuable material using 10%, 20%, 30%, 40% and 100% froth fraction removed are 12%, 15%, 21%, 29% y 67%, respectively. By increasing tenfold the flotation time, the ore recovery increases 2.5% and 4.9% when removing 20% and 40% of the froth volumetric fraction, respectively. Considering the particle size fraction of valuable material, such increase in recovery is mainly due to true flotation mechanism.

Mathematical modeling shows that the froth recovery decreases with flotation time while the pulp recovery increases quickly at the beginning of the experiment until reaching a maximum which stabilizes from then on.

Froth depth was monitored in the scrapping section and in the section not being removed. In the scrapping section a sinusoidal behavior is appreciated where the froth depth obeys a normal distribution with wave periods centered at 14 s, close to the 20 s. scrapping time. Froth depth outside the scrapping zone decreases lineally when increasing the removed froth fraction. Such deformation follows a Poisson law with a coefficient of -0.48 ± 0.13 .

Both mathematical and experimental studies indicate that the froth recovery achieves values close to zero when extending the flotation time which corresponds to Rougher-Scavenger froth flotation scenario. Simultaneously, the dropback increases when reducing the removed volumetric froth fraction.

Dedicado a mi querida hija Antonia...

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a mi pequeña familia. A mi madre por soportarme durante todos estos años y darme un apoyo incondicional en todo momento, a Cesar por sus consejos y a mi hija por ser la personita que me dio toda la energía para realizar esta memoria de la mejor forma. A mí querido primo Christopher, por estar conmigo en los últimos momentos de mi memoria y relajarme un poco en los momentos de tensión.

Los amo mucho.

Gracias a mi familia adoptiva, los TPN3, Diego, Eric, Pipe, Xevi, Xino, Willy, Luciano y Zombi. Han estado durante más de 15 años y estarán siempre ahí cuando los necesito.

Gracias a mi profesor guía, Gonzalo Montes, por toda la ayuda que me brindo en todo momento y ser un verdadero apoyo durante este trabajo, se le reconoce su vocación hacia los alumnos.

Gracias a mis practicantes Guiselle, Humberto y Eduardo, quienes me ayudaron durante las pruebas de laboratorio y siempre dieron una opinión crítica del trabajo.

Gracias a Annisa, por brindarme toda la ayuda necesaria en el laboratorio. Siempre con la mejor disposición y ayuda necesaria.

Y finalmente, agradecer a todos las personas con las que estuve durante estos maravillosos 7 años en la Universidad.

TABLA DE CONTENIDO

I INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivos	4
1.1.1. Objetivo General.....	4
1.1.2. Objetivos Específicos	4
1.1.3 Hipótesis	4
1.2. Alcances.....	5
1.3. Estructura del trabajo de memoria	5
II REVISIÓN CRÍTICA DE LITERATURA.....	6
2.1.- El proceso de flotación.....	6
2.1.1.-Principios de flotación de minerales	6
2.1.2 Flotación verdadera vs flotación por arrastre	8
2.2 Estudios de Flotación Batch en Laboratorio.....	16
2.3.- Eficiencia de la fase espuma (R_f).....	21
2.3.1- Definición.....	21
2.3.2 Movimiento de espuma en flotación.....	24
2.3.3.- Medición o estimación de eficiencia de espuma.....	25
2.4.- <i>Dropback</i>	31
2.4.1.- Definición.....	31
2.4.2.- Revisión crítica de la literatura sobre la evaluación de <i>dropback</i>	31
2.5.- Conclusión de la revisión bibliográfica	34

4.4.-CAPÍTULO 4: IMPACTO DE LA REMOCIÓN EN LA ALTURA DE ESPUMA	62
4.4.1 Impacto en la altura de espuma dentro de la zona de <i>scrapping</i>	62
4.4.2 Impacto en la altura de espuma fuera de la zona de <i>scrapping</i>	63
4.4.3 Análisis de Fourier para cinética de altura de espuma.	65
4.5 CAPÍTULO 5: ANÁLISIS ESPECÍFICO DE ARRASTRE	67
4.5.1 Campaña 1 de Experimentos	67
4.5.2 Campaña 2 de Experimentos	68
4.5.3 Campaña 3 de Experimentos	69
4.5.4 Campaña 4 de Experimentos	70
4.5.5 Comparativa de Resultados.....	71
4.6 Análisis y Modelo para calcular la Eficiencia de Espuma.....	72
4.6.1 Modelos	72
V DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	78
5.1 Discusión	78
5.2 Conclusiones.....	81
VI RECOMENDACIONES	83
VII BIBLIOGRAFÍA	84
ANEXO A: Protocolo de flotación	88
ANEXO B: Muestras.....	92
ANEXO C: Resultados Metalúrgicos	95
ANEXO D: Mediciones Altura de Espuma.....	105
ANEXO E: Derivadas, Resultados para las Estimaciones de R_f y R_c	133
ANEXO F: Número de Reynolds	141

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: SUB ETAPAS COLECCIÓN, MATERIAL DOCENTE 2013. UNIVERSIDAD DE CHILE	6
FIGURA 2: AGREGADO PARTÍCULA-BURBUJAS, LAS PARTÍCULAS SON DE GALENA. (SUTHERLAND AND WARK, 1955)	8
FIGURA 3: TIPOS DE ARRASTRE MECÁNICO; KONOPACKA (2005)	10
FIGURA 4: LAMINA Y BORDES DE ESPUMA, STEPHAN A. KOEHLER ET AL, A GENERALIZED VIEW OF FOAM DRAINAGE: EXPERIMENT AND THEORY, LANGMUIR 2000,	11
FIGURA 5: GRÁFICOS DE ARRASTRE, KONOPACKA & DRYZMALA, ET AL 2010	12
FIGURA 6: TIPO 1 DE ARRASTRE, CUARZO BAJO 5 MM. 27% SÓLIDOS EN PRESENCIA DEESPUMANTE PPG 400. KONOPACKA & DRYZMALA. 2010	12
FIGURA 7: TIPO 2 DE ARRASTRE. DIFERENTES TAMAÑOS DE CUARZO COMO FUNCIÓN DE RECUPERACIÓN DE AGUA. PRESENCIA DE ESPUMANTE DOWNFROTH 250. CELDA DE FLOTACIÓN DE 30dm ³ , ENGELBRECH Y WOODBURN, ET AL 1975.	13
FIGURA 8: TIPO 3 DE ARRASTRE. FLOTACIÓN BATCH CON CUARZO DE -40 MM, PRESENCIA DE ESPUMANTE PPG EN CELDA DE LABORATORIO DENVER. (KIRJAINEN, ET AL 1989, 1992, 1996)	13
FIGURA 9: TIPO 4 DE ARRASTRE. DIFERENTES CURVAS SEGÚN COEFICIENTE DE SEPARACIÓN Z (LYNCH 1974, BISSHOP & WHITE 1976).....	14
FIGURA 10: TIPO 5 DE ARRASTRE. BASADO EN SMITH ET AL 1989 Y WARREN 1985.	14
FIGURA 11: DIAGRAMA DE RECUPERACIÓN GLOBAL EN FUNCIÓN DE LA PULPA Y ESPUMA, VERA ET AL 2001.	23
FIGURA 12: MODELO TRANSPORTE ESPUMA, ZHENG X. (2004).....	24
FIGURA 13: TASA DE FLOTACIÓN VERSUS PROFUNDIDAD DE ESPUMA PARA ESTIMAR LA TASA DE FLOTACIÓN DE PULPA (RUNGE AND SEAMEN, 2007)	25
FIGURA 14: DISPOSITIVOS DE MEDICIÓN DE CARGA DE BURBUJAS: DIAGRAMA (A) SEAMAN, MANLAPIG AND FRANZIDIS (2006); (B) YIANATOS ET AL (2008); (C) FALUTSU Y DOBBY (1992)	27
FIGURA 15: ESQUEMA DISPOSITIVO FDB, FALUTSU & DOBBY, ET AL 1989.....	29
FIGURA 16: CELDA EDEMET	36
FIGURA 17: COMPARATIVA EXPERIMENTAL TEORÍA BATCH.....	40
FIGURA 18: GRÁFICA RECUPERACIÓN VS LEY. MINERAL + #150-#80, GANGA -#325, XANTATO 45 GR/TON; AEROFROTH70° 35 GR/TON; HIDRÓXIDO DE SODIO COMO MODIFICADO DE PH.....	42
FIGURA 19: GRÁFICOS DE IMAIZUMI.....	43
FIGURA 20: GRÁFICO RECUPERACIÓN VS RAZÓN ENRIQUECIMIENTO	44

FIGURA 21: RECUPERACIÓN SET B CAPÍTULO 3. MINERAL + #150-#80, GANGA - #325, XANTATO 45 GR/TON; AEROFROTH70° 35 GR/TON; HIDRÓXIDO DE SODIO COMO MODIFICADO DE PH.....	47
FIGURA 22: RECUPERACIÓN SET C CAPÍTULO 3. MINERAL + #150-#80, GANGA - #325, XANTATO 45 GR/TON; AEROFROTH70° 35 GR/TON; HIDRÓXIDO DE SODIO COMO MODIFICADO DE PH.....	48
FIGURA 23: PRIMERA DERIVADA SET D. MINERAL + #150-#80, GANGA - #325, XANTATO 45 GR/TON; AEROFROTH70° 35 GR/TON; HIDRÓXIDO DE SODIO COMO MODIFICADO DE PH.....	50
FIGURA 24: SEGUNDA DERIVADA, SET D. MINERAL + #150-#80, GANGA - #325, XANTATO 45 GR/TON; AEROFROTH70° 35 GR/TON; HIDRÓXIDO DE SODIO COMO MODIFICADO DE PH.....	51
FIGURA 25: RECUPERACIÓN MINERAL VS ÍNDICE DE ENRIQUECIMIENTO, SET C EXPERIMENTOS. MINERAL + #150-#80, GANGA - #325, XANTATO 45 GR/TON; AEROFROTH70° 35 GR/TON; HIDRÓXIDO DE SODIO COMO MODIFICADO DE PH.....	52
FIGURA 26: GRÁFICO RF VS RC PARA UN R FIJO, SET A DE EXPERIMENTOS. MINERAL + #150-#80, GANGA - #325, XANTATO 45 GR/TON; AEROFROTH70° 35 GR/TON; HIDRÓXIDO DE SODIO COMO MODIFICADO DE PH.....	53
FIGURA 27: ESTIMACIÓN RC.....	54
FIGURA 28: AJUSTE ECUACIÓN CINÉTICA.....	55
FIGURA 29: GRÁFICO RAZÓN MINERAL / GANGA. MINERAL + #150-#80, GANGA - #325, XANTATO 45 GR/TON; AEROFROTH70° 35 GR/TON; HIDRÓXIDO DE SODIO COMO MODIFICADO DE PH.....	59
FIGURA 30: ESTIMACIÓN DROPBACK.....	61
FIGURA 31: ALTURA DE ESPUMA EN ZONA DE SCRAPPING.....	63
FIGURA 32: ALTURA DE ESPUMA FUERA ZONA SCRAPPING.....	64
FIGURA 33: GRÁFICO ANÁLISIS DE FOURIER, 40% REMOCIÓN DE ESPUMA EN ZONA DE SCRAPPING.....	65
FIGURA 34: AJUSTE DE CURVA PARA TRANSFORMADA DE FOURIER, POR CURVEFIT, MATLAB.....	66
FIGURA 35: GRÁFICO DE ARRASTRE PARA SET A EXPERIMENTOS. MINERAL + #150-#80, GANGA - #325, XANTATO 45 GR/TON; AEROFROTH70° 35 GR/TON; HIDRÓXIDO DE SODIO COMO MODIFICADO DE PH.....	67
FIGURA 36: GRÁFICO ARRASTRE SET B EXPERIMENTOS: MINERAL + #150-#80, GANGA - #325, XANTATO 45 GR/TON; AEROFROTH70° 35 GR/TON; HIDRÓXIDO DE SODIO COMO MODIFICADO DE PH.....	68

FIGURA 37: GRÁFICO ARRASTRE SET C EXPERIMENTOS MINERAL + #150-#80, GANGA - #325, XANTATO 45 GR/TON; AEROFROTH70° 35 GR/TON; HIDRÓXIDO DE SODIO COMO MODIFICADO DE PH.	69
FIGURA 38: GRÁFICO ARRASTRE SET D EXPERIMENTOS MINERAL + #150-#80, GANGA - #325, XANTATO 45 GR/TON; AEROFROTH70° 35 GR/TON; HIDRÓXIDO DE SODIO COMO MODIFICADO DE PH.	70
FIGURA 39: GRÁFICO DE ARRASTRE PARA TODAS LAS MUESTRAS MINERAL + #150-#80, GANGA - #325, XANTATO 45 GR/TON; AEROFROTH70° 35 GR/TON; HIDRÓXIDO DE SODIO COMO MODIFICADO DE PH.	71
FIGURA 40: ESQUEMA CELDA PARA MODELO 1	73
FIGURA 41: GRÁFICO MODELO 1 EFICIENCIA DE ESPUMA MINERAL + #150-#80, GANGA - #325, XANTATO 45 GR/TON; AEROFROTH70° 35 GR/TON; HIDRÓXIDO DE SODIO COMO MODIFICADO DE PH.	74
FIGURA 42: GRÁFICO MODELO 2 EFICIENCIA ESPUMA VS DISTANCIA REMOCIÓN MINERAL + #150-#80, GANGA - #325, XANTATO 45 GR/TON; AEROFROTH70° 35 GR/TON; HIDRÓXIDO DE SODIO COMO MODIFICADO DE PH.	76
FIGURA 43: ESTIMACIÓN RC, SET C	135
FIGURA 44: ESTIMACIÓN RC, SET D	135

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: REACTIVOS UTILIZADOS EN LABORATORIO.....	35
TABLA 2: MUESTRAS, PROMEDIOS Y MÁRGENES DE ERROR.....	38
TABLA 3: ELECCIÓN FACTORES CINÉTICOS	40
TABLA 4: PARÁMETROS CINÉTICOS	41
TABLA 5: RECUPERACIONES FINALES CAPÍTULO 3.....	49
TABLA 6: MUESTRAS EXPERIMENTOS CAPÍTULO 2	58
TABLA 7: RECUPERACIONES CAPÍTULO 2	60

ÍNDICE DE ECUACIONES

ECUACIÓN 1: EFICIENCIA DE ESPUMA, SEGÚN SAVASSI ET AL 1998	21
ECUACIÓN 2: EFICIENCIA DE ESPUMA, SEGÚN VERA, FRANZIDIS Y MANLAPIG, ET AL 1999	22
ECUACIÓN 3: EFICIENCIA DE ESPUMA, SEGÚN RUNGE, CROSBIE, RIVETT Y MCMASTER, ET AL 2010.....	22
ECUACIÓN 4: EFICIENCIA DE ESPUMA, SEGÚN YIANATOS, MOYS, CONTRERAS Y VILLANUEVA, ET AL 2007	22
ECUACIÓN 5: RECUPERACIÓN GLOBAL DE CELDA DE FLOTACIÓN, FINCH & DOBBY, ET AL 1989.....	22
ECUACIÓN 6: CÁLCULO TASA DE RECUPERACIÓN DE FLOTACIÓN. FETERIS FREW AND JOWETT (1987)	26
ECUACIÓN 7: RECUPERACIÓN DE LA FASE ESPUMA. FETERIS FREW AND JOWETT (1987)	26
ECUACIÓN 8: MEDICIÓN R_f EN FDB, FALUTSU & DOBBY, ET AL 1989.....	30
ECUACIÓN 9: CÁLCULO DE ERROR PARA CONSTANTES CINÉTICAS	39
ECUACIÓN 10: RÁPIDO-LENTO EXPERIMENTAL	41
ECUACIÓN 11: CINÉTICA DEL PROCESO DE FLOTACIÓN.....	55
ECUACIÓN 12: RECUPERACIÓN DE ESPUMA, YIANATOS ET AL 2008	56
ECUACIÓN 13: EDO PARA RECUPERACIÓN DE ESPUMA	56
ECUACIÓN 14: AJUSTE CURVA ANÁLISIS DE FOURIER	66
ECUACIÓN 15: AJUSTE DE CURVA PARA TRANSFORMADA DE FOURIER, POR CURVEFIT, MATLAB.	66
ECUACIÓN 16: AJUSTE DE ARRASTRE PARA SET A DE EXPERIMENTOS.....	67
ECUACIÓN 17: AJUSTE ARRASTRE SET B EXPERIMENTOS MINERAL + #150-#80, GANGA - #325, XANTATO 45 GR/TON; AEROFROTH70° 35 GR/TON; HIDRÓXIDO DE SODIO COMO MODIFICADO DE PH.	68
ECUACIÓN 18: AJUSTE ARRASTRE SET C EXPERIMENTOS	69
ECUACIÓN 19: AJUSTE MUESTRA 3D, SET D EXPERIMENTOS.....	70
ECUACIÓN 20: ESTIMACIÓN DE RECUPERACIÓN DE ESPUMA	73
ECUACIÓN 21: AJUSTE VARIABLE EFICIENCIA DE ESPUMA	75
ECUACIÓN 22: AJUSTE EFICIENCIA DE PULPA	75
ECUACIÓN 23: ECUACIÓN AJUSTADA PARA EFICIENCIA DE ESPUMA 2.....	76

SIMBOLOGÍA

γ_{LG}	:	Ángulo de contacto entre líquido-gaseoso, agregado partícula-burbuja.	[°]
γ_{SL}	:	Ángulo de contacto entre sólido-líquido, agregado partícula-burbuja.	[°]
γ_{SG}	:	Ángulo de contacto entre sólido-gaseoso, agregado partícula-burbuja.	[°]
ε_S	:	Porcentaje de ganga reportada en el concentrado	[%]
ε_W	:	Porcentaje de agua recuperada en el concentrado	[%]
V_W	:	Volumen de agua recuperado en el concentrado	[m ³]
R_{Ff}	:	Recuperación de mineral producto de flotación verdadera	[%]
R_f	:	Recuperación de la fase espuma en flotación	[%]
R_p	:	Recuperación fase pulpa en flotación	[%]
R	:	Recuperación global en flotación	[%]
R_∞	:	Recuperación máxima en una flotación	[%]
k	:	Constante de flotación global	[1/min]
k_c	:	Constante de flotación en la pulpa	[1/min]
k_R	:	Constante de flotación rápida, ecuación cinética rápida-lenta	[1/min]
k_L	:	Constante de flotación lenta, ecuación cinética rápida	[1/min]
C	:	Flujo de sólidos en el concentrado	[gr/min]
D	:	Flujo de sólidos provenientes por <i>dropback</i>	[gr/min]
$m_c(t)$:	Flujo de minerales flotables recuperados por flotación verdadera	[tph]
J_g	:	Velocidad superficial de gas	[cm/s]
$B_1(t)$:	Carga de burbujas	[gr/lt]
A_t	:	Área transversal de la celda	[m ²]
τ	:	Tiempo de residencia promedio	[min]
θ_R	:	Parámetro de flotación rápida	
θ_L	:	Parámetro de flotación lenta	
A	:	Parámetros de zona activa de la espuma	
B	:	Parámetro de movimiento y distribución de pulpa hacia espuma	

I INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el proceso de flotación es uno de los principales métodos de concentración de minerales sulfurados de cobre. Dicho proceso se basa en diferencias de propiedades físico-químicas superficiales existentes entre las diferentes especies mineralógicas presentes en el sistema. El mineral finalmente dividido genera partículas mixtas en composición cuya proporción mineral superficial es variable. Aquellas partículas con alta exposición (o liberación) de material de interés económico se intentarán de hidrofobizar selectivamente. De esta forma, selectivamente partículas se unirán a una fase gaseosa, introducida en forma de burbujas, al interior de una fase denominada pulpa. Los agregados partícula-burbuja formados subirán principalmente debido a fuerzas de empuje formando en la superficie de la fase pulpa otra fase denominada “espuma mineralizada”.

Desde los años 60s los investigadores han realizado esfuerzos importantes para comprender cómo las dos fases, pulpa y espuma mineralizada interactúan entre sí. La estrategia utilizada por décadas ha consistido en desacoplar ambas fases realizando balances de masa en torno a ellas. De lo anterior se ha definido una eficiencia de colección en la fase pulpa y una eficiencia en la fase espuma. Al definir estas eficiencias, las fases se consideran “filtros” sucesivos de partículas. Esto es, del total de material valioso presente en la alimentación, una fracción es colectada y transferida a la fase espuma y, a su vez, de esta última solo una fracción pasa al estado “concentrado”.

La eficiencia de la fase espuma se define en términos de lo que se conoce como flotación verdadera. Esto es, la cantidad de material valioso que llega a la fase espuma mineralizada vía la formación de los agregados partícula-burbuja y no como resultado del efecto mecánico que un flujo de burbujas tiene sobre partículas suspendidas (flotación por arrastre). Siendo consistente con lo anterior, la eficiencia de la fase de colección también debería estar asociada a la flotación verdadera.

El análisis nodal indica que la recuperación global (libre de mecanismos de arrastre) entonces, queda determinada a partir de las dos eficiencias ya explicadas. Determinando una de las eficiencias (además de la eficiencia global obtenida por balances de masa) todas las eficiencias quedan establecidas.

De esta forma, para evaluar la eficiencia de la fase espuma es necesario determinar la fracción de partículas que es reportada en el concentrado con respecto a las que llegan a la fase espuma mineralizada. Sin embargo, dicha eficiencia no es constante a lo largo de toda el área transversal en la celda. En efecto, existen reportes que indican que en una operación de flotación la recuperación no es una función que opere de forma equivalente a lo largo de toda la superficie de la fase espuma. Existen zonas alejadas del labio de las celdas de flotación que no contribuyen a la formación de concentrado como aquellas que están en la cercanía de la misma. Aquellas zonas que no contribuyen de manera significativa a la formación de concentrado, se traducen en zonas de limitada movilidad donde las partículas son acumuladas y la capacidad de espuma es estresada hasta sus valores máximos debido a la generación de zonas muertas y envejecimiento que promueve la coalescencia y otros fenómenos asociados con la reducción de superficie por unidad de volumen.

Dicha capacidad de una espuma albergar material hidrofobizado, debido a limitaciones físicas se puede considerar finita pues el volumen de espuma es finito. En consecuencia existirá un flujo de entrada de material adherido vertical y hacia arriba y otro de salida de la fase espuma vertical y (hacia abajo) (*dropback* de material) hacia y desde la fase espuma mineralizada. Dicho *dropback* de partículas se ha asociado a escala industrial especialmente con partículas de granulometría más bien gruesa pero poca información existe respecto de la relevancia del área transversal.

Más allá de la determinación de la eficiencia de espuma, que ya es un desafío relevante de este estudio, se propone estudiar bajo condiciones controladas tales como aquellas que pueden ser impuesta a escala de laboratorio. Existe mucha reticencia a evaluar aspectos relacionados con el movimiento y transporte de la fase espuma a escala de laboratorio simplemente porque el habitual rebalse de la espuma mineralizada no se cumple así como tampoco se cumple la continuidad del proceso de alimentación y descarga de material. Considerando lo anterior, se propondrá un protocolo experimental específicamente diseñado para apoyar cálculos de eficiencias de cada una de las fases y la evaluación de transporte de mineral hacia el concentrado como su transferencia desde la fase espuma mineralizada a la fase pulpa.

Con lo anteriormente descrito, .este trabajo de memoria tiene como objetivo demostrar que mientras mayor sea el tiempo de flotación y menor sea el volumen de espuma la eficiencia de la fase espuma disminuye y aumenta el dropback de partículas. El estudio se realiza en condiciones controladas de aireación y condiciones químicas (pH, adición de reactivos).

1.1 Objetivos

1.1.1. Objetivo General

El objetivo de este trabajo es hacer un análisis crítico sobre la eficiencia de espuma y su relación con el *dropback* de partículas a través del tiempo para diferentes condiciones operacionales.

1.1.2. Objetivos Específicos

Los objetivos específicos de este trabajo de memoria son los siguientes:

- a.- Diseñar un set de experimentos que permita evaluar el efecto del área efectiva de transporte de partículas reportadas en el concentrado.
- b.- Estimar la eficiencia de la fase espuma para los casos de laboratorio estudiados
- c.- Analizar de forma específica el *dropback* de partículas y su efecto en la recuperación de la fase espuma.

1.1.3 Hipótesis

Mientras mayor sea el tiempo de flotación y menor sea el volumen de espuma removida, la eficiencia de la fase espuma disminuye y aumenta el *dropback* de partículas.

Esto ocurre debido a que durante un proceso de flotación batch diferentes condiciones de proceso son evaluadas en la secuencia *Cleaner* → *Rougher* → *R-Scavenger* haciendo que aumente el *dropback* de partículas debido al aumento gradual de partículas mixtas. Lo anterior se ve agravado por la reducción en el volumen de espuma removido pues reduce la capacidad de *pulling* de concentrado.

1.2. Alcances

Este trabajo de memoria considera estudios a escala de laboratorio utilizando una celda de flotación de 1.5 litros de capacidad útil.

No se consideran los efectos de la agitación de la celda para efectos de flotación.

Se considera la ruptura de burbujas en la parte alta de la espuma como un efecto uniforme que no tiene efecto en otras características de manera significativa.

1.3. Estructura del trabajo de memoria

El capítulo 1 se dará a conocer el propósito del estudio de memoria y sus principales características.

El capítulo 2 consiste en la recopilación de toda la literatura necesaria y resumida para entender todos los procesos que se observarán en esta memoria.

El capítulo 3 es la metodología del estudio. Se informara de los elementos y materiales utilizados en el estudio y a su vez del procedimiento de los experimentos.

El capítulo 4 consiste en los resultados, se expondrán los principales resultados de forma resumida, conjunto con su análisis inmediato.

En el capítulo 5 se entregarán las principales conclusiones del análisis realizado en la etapa anterior.

En el capítulo 6, se entregarán posibles recomendaciones en base de las conclusiones y análisis generados en este estudio de memoria.

Finalmente, el capítulo 7, se encontrará toda la información adicional utilizada en el estudio de memoria, como valores de cada muestra, resultados de cada experimento, etc.

II REVISIÓN CRÍTICA DE LITERATURA

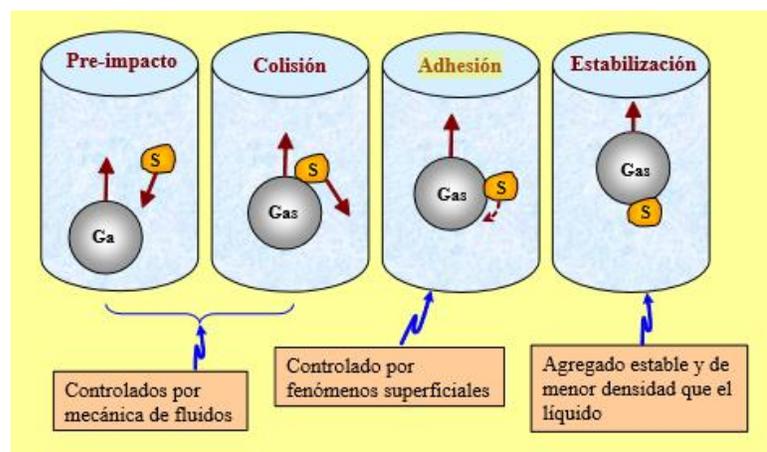
2.1.- El proceso de flotación

2.1.1.-Principios de flotación de minerales–

La separación de las especies minerales a través de flotación se produce gracias a diferencias existentes entre las propiedades fisicoquímicas de superficie de cada una de ellas. Esta surgió como una opción al proceso de separación utilizando medios densos, debido a la dificultad para la obtención de fluido con algunas densidades específicas lo que obligó a la utilización de modificadores de superficie, con la finalidad de mejorar la selectividad del proceso. Los modificadores permiten convertir selectivamente la superficie de la especie mineralógica de interés económico en hidrófoba. De esta forma, ante la presencia de un medio constituido por agua y aire (en forma de burbujas), la especie tenga repulsión al agua y se adhiera a las burbujas de aire que ascienden hacia a la superficie del líquido.

Este proceso es llamado trifásico, ya que existe interacción de 3 fases, las cuales son: sólido (partículas de mineral finamente divididas), líquido (agua de proceso y reactivos) en la que están inmersas las partículas, y gas (generalmente aire) que se introduce dentro de la pulpa formando pequeñas burbujas en el interior de la celda o columna de flotación.

La flotación puede separarse en dos etapas esenciales: (i) una etapa de colección y (ii) otra de separación. La primera de ellas consiste en la adhesión de la burbuja y la partícula, fenómeno denominado como mineralización de la burbuja. Éste posee tres



sub-etapas, llamadas colisión, adhesión y estabilización.

La colisión se refiere fundamentalmente el instante en el cual la partícula entra en contacto físico directo con una burbuja. En ello influyen ciertos factores, principalmente el tamaño de la partícula, ya que debe ser lo suficientemente grande para no ser afectada por el desarrollo de líneas de flujo generadas por el movimiento de la burbuja vertical hacia arriba dentro de la celda, aumentando así la posibilidad de colisión. Otro factor determinante es la cantidad de burbujas y su distribución. Por un lado, mientras más burbujas activas existan será más probable la colisión. Por otro lado, mientras exista una cantidad similar de burbujas en cada sector de la celda, las probabilidades de colisión aumentan entre estas con las partículas suspendidas.

La adhesión es el proceso en el cual, la partícula debe ser capaz de traspasar la capa de líquido en la interfase gas-líquido para que pueda ocurrir la adsorción. Es muy importante el tiempo de contacto de ambas superficies, ya que una vez ocurrida la colisión, la partícula tiende a deslizarse a lo largo del film de la burbuja. Por otro lado, existe un tiempo necesario para que la adhesión se haga efectiva y es llamada "tiempo de inducción", el cual debe ser menor al tiempo de contacto, sino en consecuencia el sólido se desprenderá de la superficie de la burbuja.

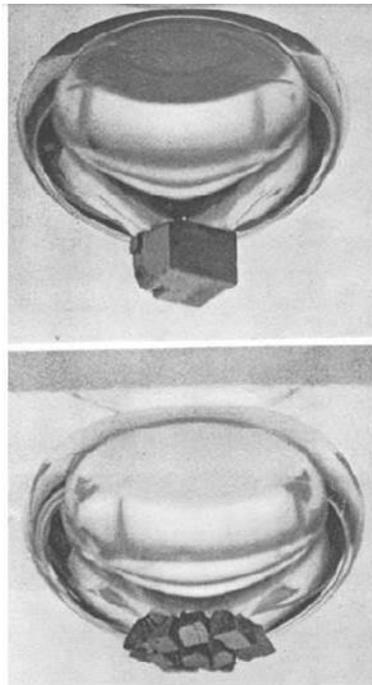
Luego de la adhesión, viene la etapa de la estabilización, donde la partícula se debe mantener adherida a la superficie de la burbuja el tiempo suficiente hasta alcanzar la fase espuma. Para que esto sea posible, el conjunto formado por la partícula debe ser lo suficientemente fuerte para no separarse a medida que sube y la burbuja debe tener la capacidad de poder levantar la partícula hasta llegar a la espuma, para ello la fuerza de empuje del conjunto debe ser mayor al peso de este mismo, esto sucede cuando la densidad de este es menor a la del agua o pulpa.

2.1.2 Flotación verdadera vs flotación por arrastre

En esta clase de operaciones se pueden diferenciar dos mecanismos principales de flotación, que son la flotación verdadera y la flotación por arrastre.

Flotación Verdadera

La flotación verdadera ocurre cuando las partículas logran pasar las etapas de colección, uniéndose a burbujas en una pulpa agitada, formando burbujas mineralizadas ascendiendo hasta alcanzar la interfase pulpa-espuma.



*Figura 2: Agregado partícula-burbujas,
las partículas son de Galena.
(Sutherland and Wark, 1955)*

Las burbujas continúan subiendo y aumentando de tamaño hasta llegar a la cima de la fase espuma y llevar la carga de partículas a destino. Este mecanismo es selectivo ya que está asociado a las condiciones hidrófobas naturales de los minerales o inducidas, generadas por la adición de reactivos a la celda.

Flotación por arrastre

La flotación por arrastre puede llevar cualquier tipo de partícula tanto hidrofílicas como hidrofóbicas a ser reportadas en el concentrado. En consecuencia, se trata, de un proceso no selectivo. Las partículas son arrastradas mecánicamente hasta la fase espuma y luego al concentrado. En el caso de que se trate de partículas de ganga, el efecto de este mecanismo tendrá como consecuencia la disminución de la ley de concentrado en el o los componentes de interés económico.

El arrastre puede presentarse de dos formas; mecánica o hidráulica. La primera ocurre debido a distintos sucesos asociados principalmente a la interfase pulpa-espuma, siendo factor condicionante la turbulencia para la distinción entre fases. Según Konopacka (2005) se pueden caracterizar en

- ***Plateau Regions*** :Este mecanismo ocurre cuando un conjunto de agregado burbuja-partículas suben y arrastran mineral adyacente
- ***Entrapment*** :Las burbujas se unen en conjunto y encierran partículas, no dejándolas moverse libremente y son arrastradas como un todo hacia la zona espuma
- ***Supporting*** :Un grupo de burbujas al ascender chocan con partículas y las empujan hacia la zona de espuma
- ***Slime coating*** :Ocurre cuando partículas con un tamaño muy pequeño, llamado "lamas" se adhieren al mineral a flotar, subiendo como un conjunto hacia la fase espuma
- ***Waking*** :Este proceso ocurre cuando el agregado partícula-burbuja asciende y la corriente que deja en su trayectoria es lo suficientemente fuerte para hacer que partículas puedan subir a través de ella

- **Contactless Flotation** : Proceso en donde una partícula cargada eléctricamente se une debido a fuerzas dispersivas y polares a la superficie de la burbuja.

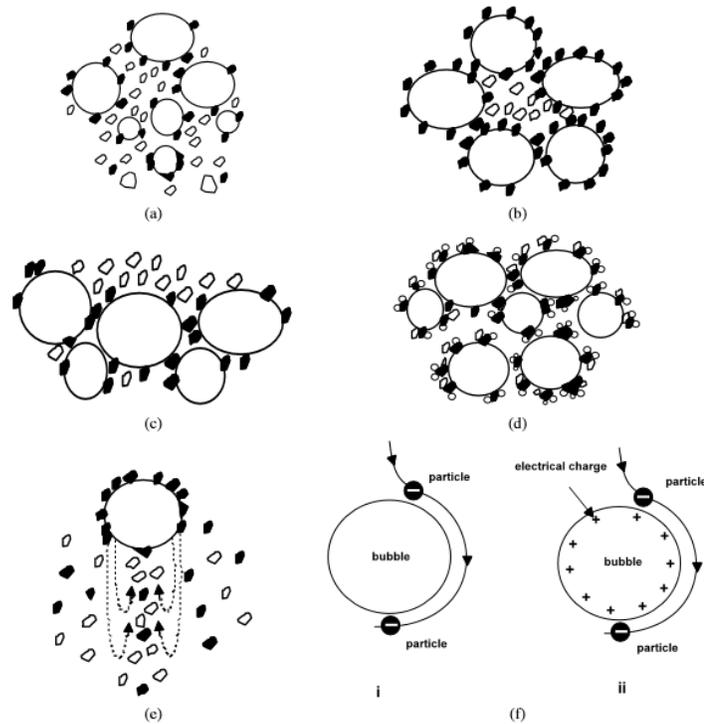


Figura 3: Tipos de Arrastre mecánico; Konopacka (2005)

a) Plateau regions; b) entrapment; c) supporting; d) slime coating, e) wakening, f) contactless flotation (i) debido a dispersión & (ii) dispersión y polarización

El arrastre hidráulico es generado gracias al transporte de agua que se realiza hacia la espuma y luego al concentrado. Este transporte proviene desde dos fuentes de líquido: (i) la capa film de agua que rodea a la burbuja y (ii) el agua transportada por el ascenso de burbujas de aire. Cada burbuja empuja agua y partículas (*waking*) a la espuma, no obstante, el agua puede volver a la pulpa debido a mecanismos de drenaje a través de las distintas estructuras de la espuma (Figura 4)

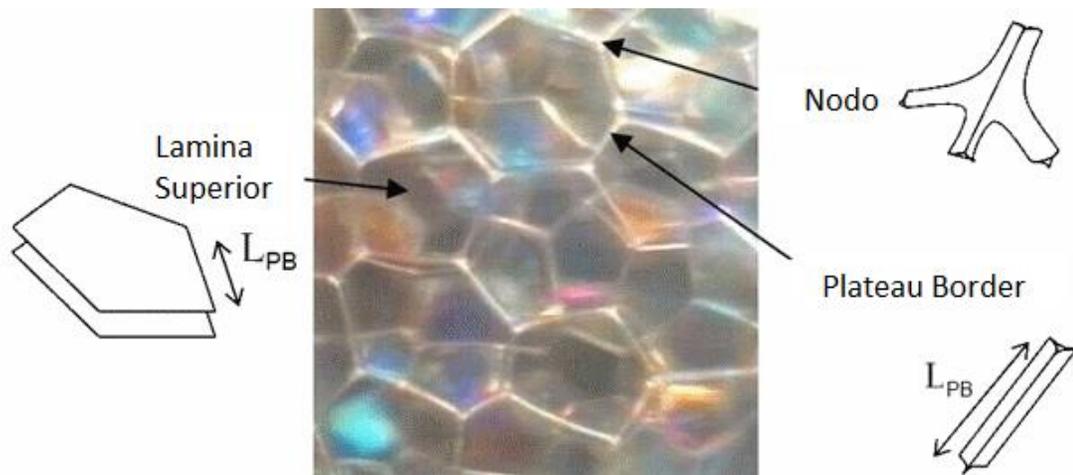


Figura 4: Lamina y Bordes de espuma, Stephan A. Koehler et al, A Generalized View of Foam Drainage: Experiment and Theory, Langmuir 2000,

Según Konopacka y Dryzmala (2010), existen cinco tipos de curvas de recuperación de agua versus recuperación por arrastre. Estas curvas se diferencian en el tipo flotación (batch o continua), propiedades en el flujo de aire, tiempo de colección de espuma y dosis de espumante. Estas cinco curvas son identificadas por su forma, lineal (tipo 1), lineal desplazada hacia abajo (tipo 2), creciente con meseta (tipo 3), creciente (tipo 4), lineal desplazada hacia arriba (tipo 5), las cuales se pueden ver en la Figura 5.

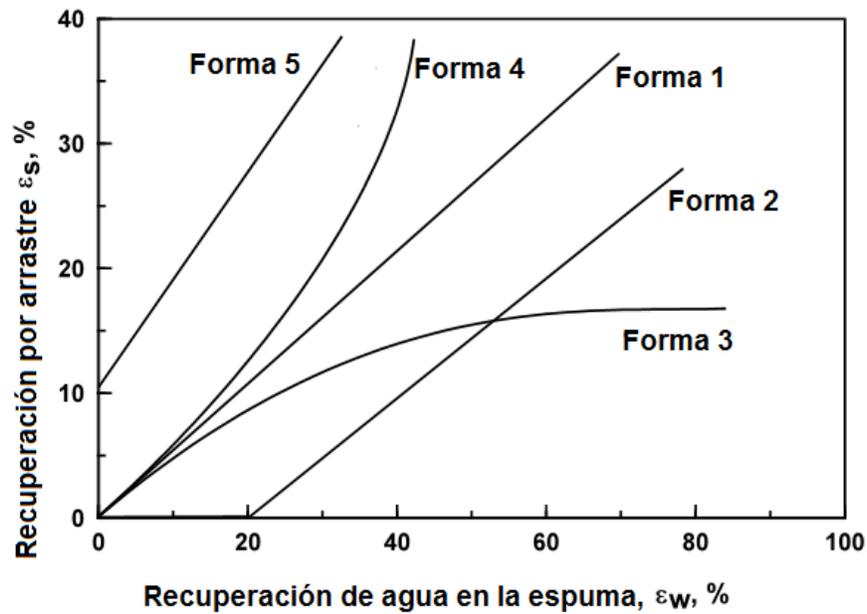


Figura 5: Gráficos de arrastre, Konopacka & Dryzmala, et al 2010

- Tipo 1

Se caracteriza por la forma lineal que posee, según Warren (1985), el arrastre de finos es directamente proporcional a la recuperación de agua. Dada esta forma, es posible plasmar diferentes valores asociados a la recuperación de ciertas partículas,

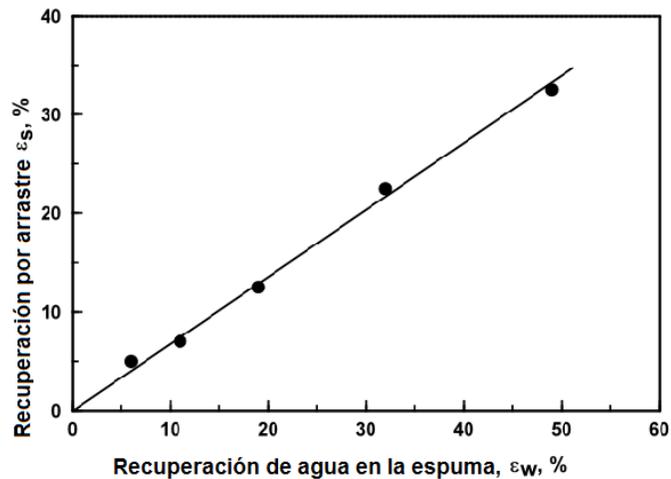


Figura 6: Tipo 1 de Arrastre, Cuarzo bajo $5 \mu\text{m}$. 27% sólidos en presencia deespumante PPG 400. Konopacka & Dryzmala. 2010

llamado coeficiente de arrastre ϵ .

- Tipo 2

A veces la curva de arrastre de partículas (ϵ_s) versus recuperación de agua (ϵ_w) posee un desplazamiento respecto de su origen, usualmente esto sucede cuando la alimentación contiene partículas gruesas y la altura de la espuma es baja, logrando

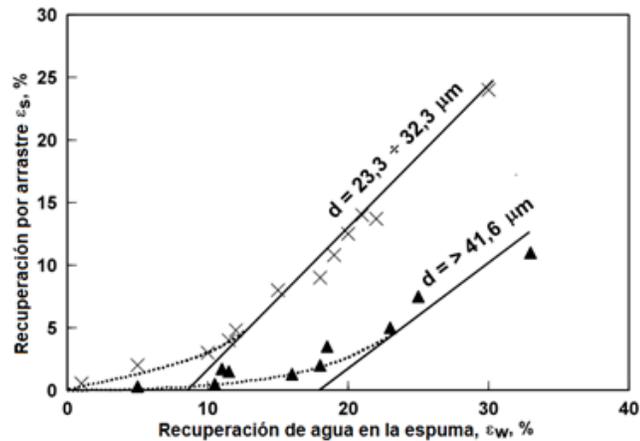


Figura 7: Tipo 2 de Arrastre. Diferentes tamaños de cuarzo como función de recuperación de agua. Presencia de espumante Downfroth 250. Celda de flotación de 30dm³, Engelbrech y Woodburn, et al 1975.

así la separación de las partículas de la espuma. (Warren 1989).

- Tipo 3

Otro tipo de relación entre el arrastre y el agua durante la flotación es una curva creciente que llega a una meseta. Esta curva se presenta cuando la concentración de espumante es baja y la alimentación contiene partículas gruesas. También ocurre

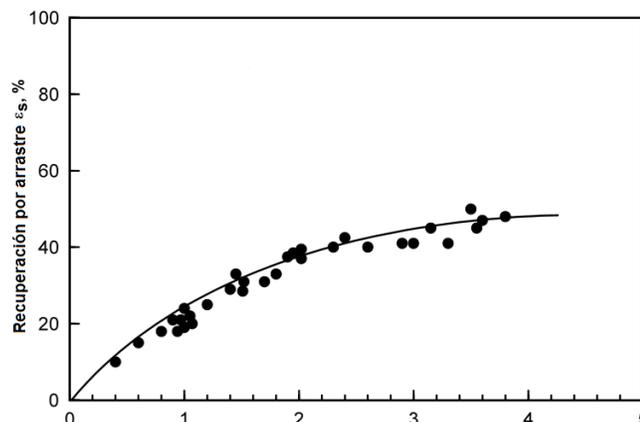


Figura 8: Tipo 3 de arrastre. Flotación Batch con cuarzo de $-40 \mu\text{m}$, presencia de espumante PPG en celda de laboratorio Denver. (Kirjainen, et al 1989, 1992, 1996)

en flotación batch con recirculación o adición de agua. (Kirjainen, et al 1989, 1992, 1996)

- Tipo 4

Este tipo de curva de forma parabólica, fue observada por Lynch (1974) como también Bisshop y White (1976). Los experimentos asociados a estas curvas fueron mediante un control sobre la altura de espuma y el flujo de aire.

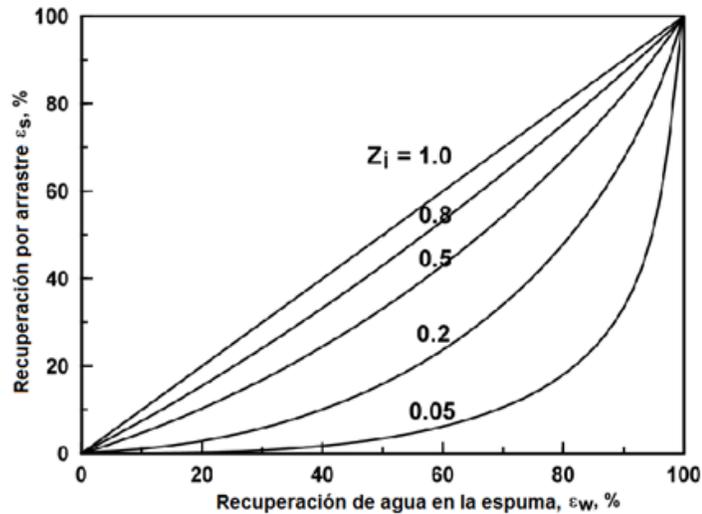


Figura 9: Tipo 4 de arrastre. Diferentes curvas según coeficiente de separación Z (Lynch 1974, Bisshop & White 1976)

- Tipo 5

Esta curva demuestra de acuerdo a diversos autores (Warren, 1985; Smith, 1989) que existe un desplazamiento hacia arriba de la curva de arrastre de partículas versus recuperación de agua. La diferencia entre el origen y la intercepción con el

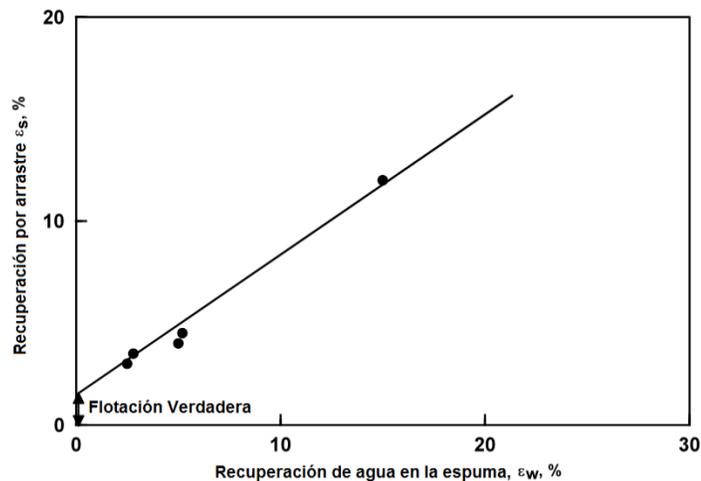


Figura 10: Tipo 5 de Arrastre. Basado en Smith et al 1989 y Warren 1985.

eje de las abscisas corresponde a la flotación verdadera.

2.2 Estudios de Flotación Batch en Laboratorio

Describiremos los estudios anteriores asociados a la flotación batch y las contribuciones realizadas en los últimos años.

¿Qué es una flotación batch de laboratorio?

Primero describiremos las bases sobre lo que se entiende por una flotación batch de laboratorio.

Estas son sus principales características:

- **Tamaño:** Una característica principal es su tamaño. En flotación batch utilizan celdas entre los 1-10 litros de volumen útil. En la industria las celdas pueden ser de varios metros cúbicos.
- **Alimentación inicial:** La cantidad de sólidos, tanto de mineral como de ganga, son adicionados a la celda solo una vez al principio, generando una alimentación inicial la cual se mantendrá durante todo el proceso de flotación.
- **Remoción de espuma:** La remoción de espuma en batch, ocurre principalmente por paleteo mecánico, el cual puede ser automatizado o manual. Esto se diferencia de la flotación industrial donde su principal forma de remoción es producto del rebalse de la espuma en las celdas.
- **Agitación de la pulpa:** En procesos de laboratorio, la velocidad de agitación del impeler es cercano o mayor a las 1000 rpm (revoluciones por minuto), con lo cual uno puede asumir que existe una mezcla perfecta a tal velocidad.

La flotación batch producto de estas características y evitar los cálculos tan complejos, es asumido como un *CSTR* (Tanque de reacción agitado continuamente).

El *CSTR* asume las siguientes características:

- Densidad constante
- Temperatura constante
- Estado estable
- Reacciones irreversibles
- Reacción de primer orden

Esto permite poder utilizar las ecuaciones que naturalmente conocemos de reacciones ideales, atribuyendo al sistema partícula-burbuja como parte de este. Sin embargo, debemos criticar alguna de las características asumidas.

Primero, la densidad no es constante, ya que la flotación consiste en un tanque de reacción de diferentes fases, no solo de una.

El estado estable no es una realidad en la flotación, ya que continuamente van ocurriendo cambios entre la pulpa y la espuma.

Las reacciones son reversibles, provocando los efectos de *dropback* o de drenaje de agua hacia la pulpa.

Es así como podemos decir que a pesar de que tienen ciertas similitudes la flotación con un *CSTR*, también debemos entender las diferencias que poseen y en lo que puede afectar en nuestros análisis posteriores.

Autores sobre flotación batch de laboratorio

Gran cantidad de autores han estudiado la flotación batch, cada uno de ellos enfocados en diferentes áreas correspondientes al fenómeno de la flotación.

Estudios generales sobre la flotación batch, como Ferreira *et al* 2000, comenta que lo importante de la flotación batch es que se pueden obtener diferentes parámetros para la comparación con flotación continua. Wiese *et al* 2011 habla sobre las limitaciones de la

flotación batch, concluyendo que la estabilidad de la espuma y la recuperación de agua son factores afectados por los reactivos (Depresantes, modificadores, colectores), añadiendo que la recuperación de agua como una buena medición entre dos flotaciones a una misma altura de espuma.

Runge *et al* 2010 explica la importancia de la caracterización del mineral y la flotación mediante los experimentos batch. La forma de verificar selectividad y otros factores en las curvas de resultados. También habla de las técnicas de estimación de datos. Concluye que finalmente la flotación batch siempre replica en cierto grado lo que sucede en la industria, siempre y cuando sea ayudado por técnicas de análisis de datos de manera anexa.

En 2012, los consultores mineros de Eurus, entregaron un completo informe de los protocolos de cada una de las variables a tener en cuenta antes y durante la realización de procedimientos batch. Inclusive entrega señales de como debiese estar tu mesa de trabajo antes y durante ocurre la flotación para tener todos los elementos necesarios para que el error experimental asociado al operador sea mínimo.

Sobre la eficiencia de la fase espuma han sido pocos los autores que han hecho énfasis en el cálculo de la recuperación en laboratorio, Ferreira *et al* 2000 comenta que la recuperación de espuma es función del flujo de flotación constante (k), pero que no es constante para todos los minerales.

Vera *et al* 2002, propone diferentes métodos para el cálculo de recuperación de espuma, experimentando con uno de ellos, el cual es el cambio de altura de espuma. Aquí comenta la incidencia predominante que tiene el flujo de aire en la celda, también menciona que el porcentaje de sólidos, velocidad de agitación y dosis de colectores son otros factores que ocurren en la zona de pulpa que afectan indirectamente la estabilidad de la zona de espuma, esto no ocurre de manera inversa, los efectos en la zona de espuma no tienen incidencia en la zona de colección. Al observar sus resultados, los cuales eran flotaciones de dos minerales diferentes, concluye que la recuperación de la fase espuma no es selectiva, al obtener valores similares y que la cantidad de partículas que se desprenden (*dropback*), son equivalentes para ambos minerales. En vista de esto último, propone un ajuste para las partículas que se desprenden de las burbujas.

Laplante *et al* 1989, intentó medir la recuperación de espuma mediante el método de cambio de altura de espuma. En una celda especial agregó una zona de lavado en la interfase pulpa-espuma. Concluyó que la recuperación aumenta a medida que las alturas de espuma disminuyen, pero no logra llegar a la teoría, la cual dice que a la altura de espuma mínima la recuperación sería del 100%.

Ross *et al* 1990, propuso un método diferente. Al no ser selectivo el arrastre, creó dos variables de flujo, la cantidad de mineral o ganga que era reportada, en comparación a la cantidad de agua recuperada. Al ser la flotación verdadera selectiva, al comparar ambos flujos habrá un mayor valor proporcional en la recuperación de mineral, esa diferencia la asocia como el ratio de flotación verdadera.

Lo relevante de su estudio es que considera que la primera fase de flotación, la cual es flotación verdadera, ocurre en los primeros ocho minutos de flotación, llegando a su *plateau*.

El arrastre en la flotación batch ha sido un tema más recurrente entre los autores en comparación a otros temas.

Tanto Warren *et al* 1985, como Smith *et al* 1989, experimentaron de forma similar el arrastre comparando gráficos de recuperación mineral versus recuperación de agua. Ambos concluyeron al observar que existía una componente de recuperación de mineral la cual no comenzaba en el origen y por tanto no tenía un comportamiento lineal. A ese valor inicial se le consideró como flotación verdadera y a la componente lineal, como arrastre.

Kaya *et al* 1986, concluye que usar lavado de espuma disminuye considerablemente el arrastre, cerca de un 60% menos. También agrega que estos valores aumentan si se realiza en la interfase pulpa- espuma.

Sutherland *et al* 1989, estudio el arrastre para diferentes tamaños y concluyó que sobre los 50 μ m, el arrastre deja de ser un factor. También agrega que el tamaño de partículas tiene mayor influencia en la flotación, que el grado de liberación de mineral.

Otras características menos relevantes para este estudio de memoria han sido evaluadas en el pasado.

Sobre el aire y las burbujas en la flotación batch, Kaya *et al* 1986, Tucker *et al* 1994, Grau *et al* 2005 y Rojas *et al* 2014 han estudiados estos efectos.

Kaya observa que el grado de flotación en función del flujo de aire es parabólico. Al principio aumenta producto de la cantidad de burbujas existentes en la celda hasta alcanzar un máximo, luego baja producto que a grandes flujos de aire, la flotación disminuye producto de la turbulencia provocada en la zona de colección. Concluye que mejorar la flotación recae principalmente en saber controlar los parámetros de altura de espuma y flujo de aire.

Grau y Tucker observan que a mayor cantidad de sólidos en la pulpa, las burbujas aumentarán su tamaño. La velocidad de agitación provocada por el impeler es inversamente proporcional al tamaño promedio de burbuja.

Rojas, utilizó una celda de dos dimensiones para ver la distribución y velocidad de la espuma en función de la distancia del labio. Se experimentaron con dos flujos y dos alturas de espuma. A mayor flujo de aire existe mayor recuperación de agua y mayor cantidad de espuma movilizada. La ruptura de burbujas se generaba en zonas más alta mientras más distancia existía con respecto al labio de la celda.

Finalmente Koh *et al* 2007, utilizó un CFD (Modelo fluido dinámico computacional), para observar las repercusiones de las velocidad de impeler sobre el flujo de aire.

Se genera una fuerte acción por parte de la gravedad sobre las partículas, ocasionando una disminución de velocidad de ascensión de la burbuja, bajando así el ratio de flotación (k).

También observa que el desprendimiento de burbuja es mayor en zonas cercanas al impeler, sobretodo en partículas gruesas.

Concluye que los gruesos y los finos deben ser tratados en celdas diferentes, para así maximizar la cantidad de partículas adheridas a las burbujas.

2.3.- Eficiencia de la fase espuma (R_f)

2.3.1- Definición

Para comprender la contribución de cada una de las fases (pulpa y espuma) en la recuperación global, se han realizado estudios que desacoplan ambas fases generando dos zonas continuas del mismo nombre.

Una fracción del material colectado en la zona de pulpa no es reportada en el concentrado final, debido a que regresa desde la zona de espuma a la zona de pulpa. Esto ocurre debido a múltiples fenómenos relacionados con ruptura de burbujas, coalescencia de las mismas, etc.

Durante diversos estudios se han propuestos diversas definiciones de la eficiencia o recuperación de espuma. Estas definiciones tienen pequeñas diferencias entre sí, pero sus implicancias teóricas y prácticas son de gran importancia para comprender su significado.

Savassi *et al* 1998, propone como la eficiencia de espuma como el cociente entre partículas reportadas en el concentrado por flotación verdadera y el flujo de partículas adheridas a burbujas en la interfase pulpa-espuma.

$$R_f = \frac{\text{flujo de partículas reportadas al concentrado por flotación verdadera}}{\text{flujo de partículas adheridas en la interfase pulpa – espuma}}$$

Ecuación 1: Eficiencia de espuma, según Savassi et al 1998

Más adelante en 1999 Vera, Franzidis y Manlapig y años más tarde Runge, Crosbie, Rivett y Mc Master *et al* 2010, proponen una diferente definición de eficiencia de espuma que la propuesta anteriormente.

En 1999, se define como el cociente entre el flujo de masa desde la pulpa al concentrado dividido por el flujo de masa de la pulpa a la espuma.

$$R_f = \frac{\text{flujo de masa de la pulpa al concentrado}}{\text{flujo de masa de la pulpa a la espuma}}$$

Ecuación 2: Eficiencia de espuma, según Vera, Franzidis y Manlapig, et al 1999

En cambio en 2010, la ecuación omite que la transferencia sea inicialmente desde la pulpa y solo se entiende como el flujo másico del concentrado y de la espuma.

$$R_f = \frac{\text{flujo de masa del concentrado}}{\text{flujo de masa dentro de la espuma}}$$

Ecuación 3: Eficiencia de espuma, según Runge, Crosbie, Rivett y McMaster, et al 2010

Yianatos, Moys, Contreras y Villanueva *et al* 2007 proponen una recuperación de espuma de minerales flotables, la cual es el cociente entre el flujo de masa minerales flotables reportados por flotación verdadera sobre el flujo de minerales como agregado partícula burbuja que entran a la espuma a través de la interfase pulpa-espuma.

$$R_{Ff} = \frac{\text{flujo de masa de minerales flotables al concentrado por } F.V}{\text{flujo de masa de minerales entrando en la espuma como agregado partícula - burbuja, a través de la interfase pulpa - espuma}}$$

Ecuación 4: Eficiencia de espuma, según Yianatos, Moys, Contreras y Villanueva, et al 2007

La Ecuación 5 expresa la recuperación global en términos de la recuperación de pulpa (R_p) y la recuperación de la espuma (R_f). La Figura 11 muestra la sensibilidad de la recuperación global en función de las eficiencias de las fases nombradas.

$$R = \frac{R_f R_p}{R_f R_p + 1 - R_p}$$

Ecuación 5: Recuperación global de celda de flotación, Finch & Dobby, et al 1989.

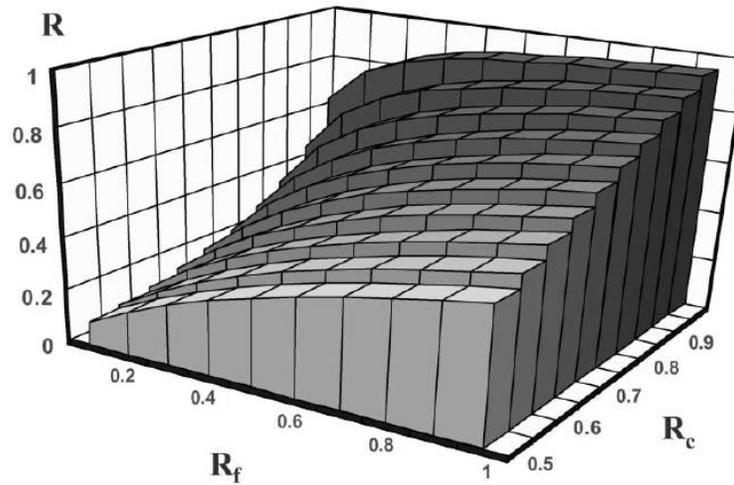


Figura 11: Diagrama de Recuperación global en función de la pulpa y espuma, vera et al 2001.

Por esta razón es de gran importancia especificar que definición utilizaremos, ya que podría entregarnos distintos resultados y cambiar la eficiencia global de una flotación simplemente por definir esta variable de forma diferente. Estas definiciones serán en principio, las cuales se basarán las estimaciones de los experimentos.

2.3.2 Movimiento de espuma en flotación

Para contextualizar los experimentos, una de los conceptos importantes es el movimiento que tiene la espuma en flotación.

Zheng en 2004 estudió esto en particular, a escala industrial, donde describe que existen dos vectores de movimiento en la espuma, uno vertical producto de la ascensión de partículas adheridas a la burbuja y otro horizontal al lograr cierta estabilidad en la altura de espuma, existe un movimiento hacia el labio de la celda el cual permite que la espuma pueda ser retirar de manera espontánea, en forma de rebalse.

Además observó que ese movimiento horizontal solo se realiza en una porción menor de la parte superior de la espuma, por ende, existe espuma dentro de la celda de flotación en estado estático. De esta manera diseño un modelo (Figura 12) de movimiento de espuma en una celda, donde existe una parte activa de espuma, donde predomina principalmente el movimiento vertical de espuma y en menor medida uno

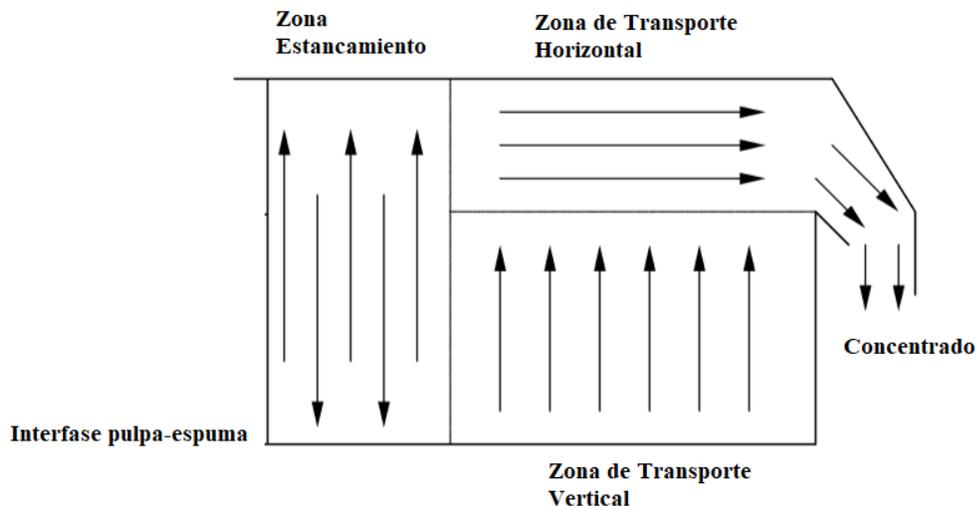


Figura 12: Modelo transporte espuma, Zheng X. (2004).

horizontal.

En la memoria variaremos la zona de estancamiento, al insertar una pared dentro de la celda, provocando que el transporte vertical sea predominante en los estudios, ya que al disminuir el volumen de espuma removida, el transporte horizontal disminuye considerablemente.

2.3.3.- Medición o estimación de eficiencia de espuma

La estimación de eficiencias de espuma es un desafío, particularmente a escala de laboratorio, donde la espuma no fluye de manera espontánea y existe una disminución constante de la alimentación al proceso.

Escala de laboratorio

A escala de laboratorio no existe una gran cantidad de autores que hayan propuestos métodos específicos para la obtención de la recuperación de fase espuma en laboratorio, solamente se conoce un método que solamente es teórico y es un acercamiento.

- Cambio de altura de espuma

Esta técnica fue propuesta por Feteris, Frew and Jowett (1987), para mediciones a escala de laboratorio, donde se estudia la relación entre la tasa de flotación y la altura de espuma:

Se propone que la relación directa que existe entre la tasa de flotación y la altura de espuma se puede extrapolar para predecir la tasa de flotación sin espuma. Sin fase de espuma, no existiría pérdida producto de que la zona cero significaría a su vez el punto final de la fase de pulpa, siendo ambos el mismo, la tasa de recuperación a zona cero

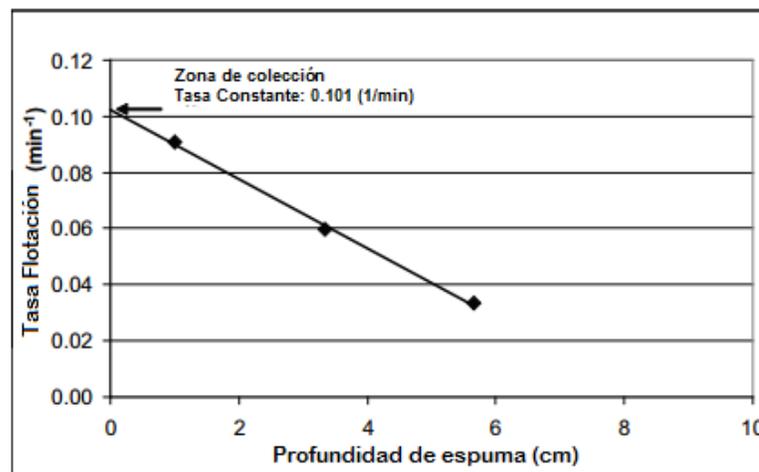


Figura 13: Tasa de flotación versus profundidad de espuma para estimar la tasa de flotación de pulpa (Runge and Seamen, 2007)

sería la misma que la tasa de recuperación de pulpa o zona de colección.

La tasa de flotación en un medio perfectamente mezclado es función del tiempo de residencia y la recuperación global medida en el proceso.

$$k = \frac{R}{\tau(1 - R)}$$

Ecuación 6: Cálculo tasa de recuperación de flotación. Feteris Frew and Jowett (1987)

Luego de obtener ambas tasas, la recuperación de espuma puede ser calculada como el cociente entre la tasa de recuperación global y la tasa de recuperación de la pulpa.

$$R_f = \frac{k}{k_c}$$

Ecuación 7: Recuperación de la fase espuma. Feteris Frew and Jowett (1987)

Luego al repetir el proceso para diferentes alturas de espuma y medir la recuperación, la tasa de flotación a zona cero debe ser determinada para cada altura de espuma, la tasa de recuperación de la pulpa puede ser determinada por extrapolación y así calcular la eficiencia de la fase espuma para cada profundidad de espuma.

Esta técnica no es muy utilizada en planta. El tiempo necesario para realizar las pruebas para las diferentes profundidades de espuma puede tardar horas, además que para ese procedimiento se debe lograr estabilidad cada vez que se cambia la altura de espuma. Esta técnica es exitosa si las condiciones de alimentación permanecen estables durante el tiempo que se realiza la prueba, lo cual es complejo en la industria.

Da un primer indicio que la recuperación de la fase espuma aumenta a medida que se disminuye la altura de esta. Enfocado en la memoria entrega información de los métodos de recuperación de espuma en escala de laboratorio, quienes visiblemente tienen deficiencias según el propósito, ya que aquí utilizaremos una altura de espuma constante para todos los experimentos, que va en sentido opuesto del procedimiento de esta medición.

Escala Industrial

A escala industrial si existen varios estudios para intentar determinar la recuperación de espuma. Solo incluiremos los más relevantes y utilizados, de manera reducida.

- Medición directa de la carga de burbujas

La eficiencia de la espuma se puede caracterizar como la fracción de partículas las cuales están en la zona de espuma adheridas a burbujas que luego son recuperadas como concentrado. Es posible medir este flujo de partículas en el concentrado habitualmente, es por ello que la eficiencia de la espuma puede ser calculada si uno puede determinar el flujo de partículas que van desde la pulpa hacia la espuma.

Se han desarrollado varios dispositivos (Falutsu & Dobby, 1992; Seaman, Manlapig and Franzidis, 2006; Yianatos, 2008). La Figura 12 muestra los esquemas de tres diferentes dispositivos.

La medición directa de burbujas tiene la ventaja de ser un procedimiento sencillo y no requiere de mucho tiempo, además de contar con la posibilidad de poder tomar una muestra desde el mismo dispositivo y hacer un análisis para obtener información de otras características importantes (tamaño, grado de liberación, análisis de superficie, etc).

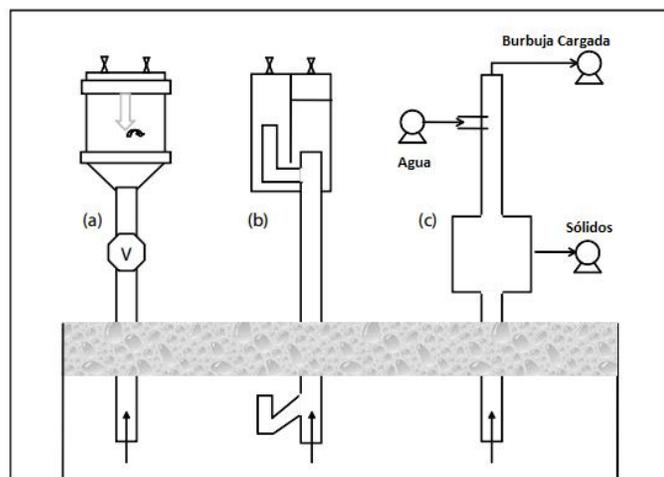


Figura 14: Dispositivos de medición de carga de burbujas: Diagrama (a) Seaman, Manlapig and Franzidis (2006); (b) Yianatos et al (2008); (c) Falutsu y Dobby (1992)

- Balance de masa sobre la carga de burbujas

El primero en proponer esta metodología fue Savassi (1998). Su técnica consistía en bombear muestras a través de un embudo directamente desde la pulpa utilizando una bomba de vacío. Las muestras serían bombeadas a través de un cilindro tapado para capturar y medir la cantidad de aire. El embudo está orientado en dos diferentes direcciones; verticalmente para coleccionar las burbujas que están ascendiendo a través de la espuma y ser recolectadas por el embudo, y horizontalmente para coleccionar las muestras que pasan por el embudo y aun así no logran ser recolectadas. Además se desarrolló un dispositivo (Savassi, *et al* 1998) para capturar una muestra desde la pulpa sin contener burbujas.

Usando la masa de los sólidos, agua y aire contenido en las tres diferentes muestras, el balance de masa puede determinar la masa de sólidos adherida por litro de aire (o carga de burbujas).

El balance de masas es resuelto de mejor manera con la minimización de errores cuadráticos y así obtener la mejor estimación de la carga de burbujas.

Savassi comenta que esta técnica no puede ser usada para medir la recuperación en la fase espuma en celdas de flotación las cuales exista una diferencia entre las partículas adheridas a las burbujas en las pruebas y las partículas suspendidas en la fase de pulpa.

En el 2003, Alexander, Franzidis y Manlapig propusieron una adaptación a la técnica de Savassi con una metodología que simplifica el muestreo y el problema del balance de masa. Esta técnica incluye obtener una muestra para obtener el holdup de aire y dos muestras más que son usadas para inferir las pruebas de pulpa suspendida y las partículas unidas a las burbujas.

Las técnicas de balances de masas tienen la ventaja de poder realizarse relativamente fácil, sin la necesidad de requerir alguna condición especial en la celda. Sin embargo, no puede ser desarrollado universalmente en cualquier celda de flotación ya que se requiere una significativa diferencia entre las partículas unidas a las burbujas y las suspendidas en la pulpa.

- Columnas modificadas

El primer acercamiento de las columnas modificadas es introducido por Falutsu y Dobby (*et al* 1989), donde se desacopla la interacción de ambas fases, separando así la espuma de la pulpa. A su vez, se realiza la medición indirecta de la recuperación de la fase espuma, colectando las partículas que decantan desde la espuma, también llamadas partículas de “*dropback*”.

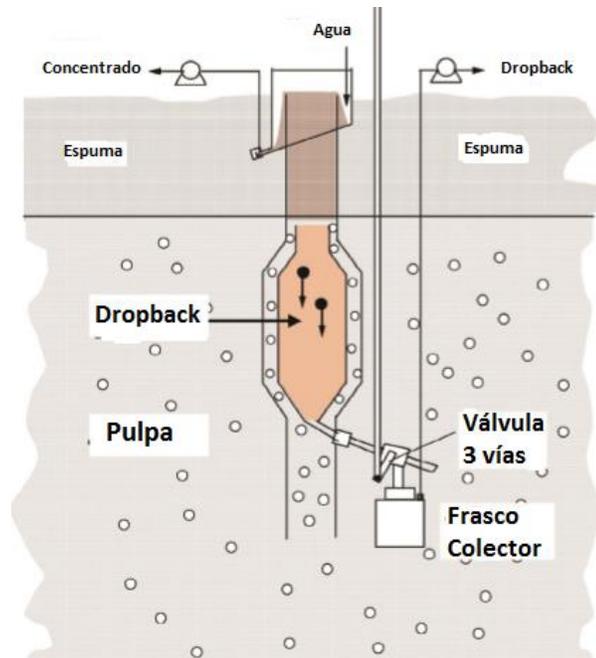


Figura 15: Esquema dispositivo FDB, Falutsu & Dobby, *et al* 1989

El FDB fue diseñado para que durante los experimentos pueda ser sumergido para pruebas y mediciones en cualquier posición de la celda. Durante la pruebas, las burbujas cargadas con mineral entran al dispositivo, suben por el espacio existente entre los dos tubos concéntricos llegando hasta el tope de la columna, donde se formará la capa de espuma. Las partículas que dejen la espuma primero, caerán dentro del cilindro interno (colector de partículas de *dropback*), y se dirigirán a la válvula que desviaré las partículas despegadas de la burbuja dentro del frasco contenedor durante las pruebas.

La recuperación de la fase espuma es medida por la siguiente ecuación.

$$R_f = \frac{C}{(C + D)} * 100$$

Ecuación 8: Medición R_f en FDB, Falutsu & Dobby, et al 1989

Donde C corresponde al flujo de sólidos en el concentrado, que pueden corresponder a la adhesión o arrastre de partículas. D es el flujo de sólidos proveniente de *dropback*. La recuperación de espuma, R_f tiende a ser subestimado producto del arrastre de partículas.

En principio estos métodos son un acercamiento a las mediciones, no muestran datos completamente acertados. El primero está asociado a un balance de masa, el segundo es un experimento más ejecutable, no obstante esta propenso a ser ensuciado por otros motivos, como el arrastre principalmente. Además poder utilizar estos métodos en nuestra memoria no es posible, debido al tamaño que tiene el dispositivo, sin embargo tomaremos en cuenta la forma de calcular la eficiencia de la espuma, será similar a la forma que intentaremos estimarla.

2.4.- *Dropback*

2.4.1.- Definición

Se define como *dropback*, al fenómeno en donde las partículas han logrado el proceso de colección y han ascendido junto con burbujas hacia la fase espuma, las cuales vuelven a la pulpa desde la fase espuma debido a condiciones inestables de la burbuja, tanto como ruptura de ellas como de coalescencia o bien por el propio peso de la partícula que sobrepaso la capacidad de adhesión que poseía la burbuja.

También el *dropback* se asocia y se define como el complemento del material reportado al concentrado, ya que al juntar estas dos partes se obtendría en teoría, la totalidad del material que ingresó a la espuma durante la flotación.

2.4.2.- Revisión crítica de la literatura sobre la evaluación de *dropback*

Esta revisión apunta a la observación de distintos autores sobre el *dropback* y sus efectos en la flotación o sus características.

En 2015 un conjunto de autores (Ata, Rahman, Jameson *et al* 2015), con el propósito de estudiar el comportamiento de la espuma dentro de la flotación, lograron observar que muchas de las variables existentes en flotación, afectan al *dropback*. Para observar estas partículas utilizaron el ya mencionado FDB (*Froth dropback device*), pudiendo extraer las partículas que decantan y luego analizarlas. Dentro de estos análisis se lograron las siguientes observaciones:

En el análisis, las primeras pruebas relacionaron el efecto del flujo del aire (J_g) sobre la flotación. Se observó que el aumento del flujo de aire contribuía en una mayor recuperación en cualquiera de las dos fases, tanto de pulpa como de espuma, generando así una mayor recuperación global, esto gracias a que un mayor flujo de aire conlleva a un tamaño de burbuja más pequeño, previniendo el fenómeno de coalescencia, consiguiendo así una disminución del *dropback*. Sobre el tamaño que se

encontró en las partículas de *dropout*, la mayoría correspondía a partículas gruesas que iban en aumento a medida que el flujo de aire se acercaba al régimen turbulento, ya que las burbujas tienden a deformarse y desprenderse de la partícula que tenían adheridas. Lo último que se observó fue la ley de cobre en las partículas de *dropout* para cada uno de los flujos de aire. La ley fue disminuyendo, mucho más bajo que la del concentrado pero mayor que el de las colas de la flotación, esto se debe a que la mayoría de las partículas en el *dropout* tienen un grado de liberación menor y de mayor tamaño en comparación a las del concentrado que a medida que aumenta el flujo de aire recolecta un mayor porcentaje de finos, teniendo así una ley mucho mayor.

Otras pruebas fueron para visualizar los efectos de la profundidad de espuma en la flotación. En primera instancia la recuperación global fue afectada negativamente a medida que la altura de espuma iba siendo aumentada, se observó en las pruebas que un aumento de 600mm a 900mm la altura de la espuma, se observó diferencias de hasta un 23% de la recuperación, con un gran incremento de estas partículas contenidas en el contenedor de partículas de *dropout*. Al observar la granulometría en estas muestras, se apreció que mientras aumentaba la profundidad de la espuma, aumentaba las partículas de *dropout* en todos los tamaños, en consecuencia que a mayor espuma, la probabilidad que las partículas se despeguen de su burbuja aumentan. Sobre las leyes de las muestras, el concentrado final sigue teniendo mayor ley que las partículas de *dropout*, pero con una diferencia menor a la observada con el estudio del J_g , además del aumento de la ley de cobre en el *dropout* a mayores profundidades de espuma.

Los últimos estudios realizados por Ata, Rahman y Jameson fueron enfocados a los efectos de colectores y espumantes. El efecto en la recuperación global de estos reactivos es opuesto, mientras se aumenta el colector en la celda, los efectos provocados en la espuma no son importantes, mientras que en la pulpa genera un gran cambio, ascendiendo una gran cantidad de partículas, inclusive las que cuentan con baja ley y muy poca hidrofobicidad. Esto provoca como consecuencia una inestabilidad en la espuma, producto de que alcanza la capacidad límite de la espuma, a raíz de esto, una gran cantidad de partículas se desprendan de la espuma, sin selectividad alguna, aumentando así el *dropout*. La ley disminuye a medida que aumenta la

concentración de colector, debido a que las partículas que descienden de la espuma no poseen selectividad, existiendo de esta forma partículas con bajísima ley las cuales solo ascendieron gracias a la gran cantidad de colector que fue añadida y que bajan la ley de las partículas de *dropback*. Estas partículas son en su mayoría gruesas, ya que en efecto son las que mayor tendencia tienen a decantar de la espuma por su masa.

Los efectos provocados por el espumante en la recuperación global son positivos, ya que la recuperación en la espuma aumenta de manera considerable a la adición de espumante, ya que las condiciones de coalescencia y tamaño de burbuja disminuyen, así como también las partículas de *dropback* debido a la gran estabilidad que existe en la espuma. Sobre la granulometría encontrada en el colector de *dropback*, la cantidad de partículas finas se reduce significativamente a mayor cantidad de espumante, ya que la mayoría de estas llegaban al concentrado. Por este motivo, la ley de cobre de las partículas de *dropback* disminuía, ya que solo partículas con baja hidrofobicidad y de mayor tamaño eran las que se filtraban de la zona de espuma estable.

2.5.- Conclusión de la revisión bibliográfica

Dentro de la información recopilada, podemos concluir que:

Existen distintas definiciones de autores para una misma variable, la recuperación en la fase espuma, las cuales no son análogas entre ellas y por tanto podrían obtener diferentes valores para un mismo experimento. Además una de las principales fórmulas para calcular la eficiencia global de flotación en una columna (Ecuación 5), posee algo bastante interesante, cuando la eficiencia en la pulpa se acerca a 100%, la recuperación global de flotación inmediatamente se hace 100%, sin considerar una variable fundamental como la recuperación de la fase espuma, perdiendo sentido si observamos en la práctica. Esto será analizado posteriormente en esta memoria.

Se recalca la importancia de separar los fenómenos que ocurren dentro de la flotación. Conocer la recuperación originada por arrastre y la recuperación por flotación verdadera, para tener un visión más acertada de lo que sucede realmente. Se considera de Sutherland (1989) que el arrastre para el mineral tendrá un efecto disminuido, debido a que el tamaño de partículas para el mineral valioso será sobre el tamaño indicado por él.

Existe una gran cantidad de formas de medir experimentalmente la recuperación en la fase espuma, muchas de estas con varias dificultades prácticas. Ninguno de los métodos evaluados será replicado, no obstante, utilizar el concentrado final y el dropback para inferir la eficiencia de espuma será considerado, al igual que lo utilizado por Falutsu & Dobby (1989).

El transporte del mineral en la espuma explicado por Zheng (2004), muestra que existe una zona de estancamiento en la celda, una parte importante para la memoria, ya que será una de las variables utilizadas.

No se tiene mayor información específica sobre el *dropback*, solo acercamientos que intentan ver como esto es afectado por distintos aspectos. Sobre los experimentos que se realizaron en este estudio de memoria, el único enfoque similar es de Ata (2015), que estudio la recuperación global y el dropback en comparación a la altura de espuma.

III TRABAJO EXPERIMENTAL

3.1.- Materiales

3.1.1 Mineral y Ganga

Ambos materiales fueron otorgados por el Laboratorio de Procesos Mineralúrgicos. El mineral es un concentrado de cobre proveniente de la Mina Doña Inés de Collahuasi.

La ganga utilizada para los experimentos fue Cuarzo.

3.1.2 Reactivos

Para obtener una celda con condiciones similar a la industria, se utilizaron diferentes reactivos, los cuales están en la Tabla 1.

Reactivo	Nombre	Dosificación [gr/ton]
Colector	Xantato	45
Espumante	AeroFroth 70°	35
Modificador de PH	Hidróxido de Sodio	

Tabla 1: Reactivos utilizados en Laboratorio

3.1.3 Máquina de Flotación

Se utiliza la celda de flotación EDEMET Modelo CFLE- 3.3. Corresponde a una máquina de flotación “batch” de laboratorio, la que se muestra en la Figura 14, la cual cuenta con una celda de acrílico, de paredes y fondo plano. A su vez cuenta con difusores radiales en su base para proporcionar un mejor mezclamiento. La máquina cuenta con un rotámetro para la lectura del flujo de aire el cual tiene ajuste electrónico para un flujo constante, que ella misma incorpora a través del impeler metálico. Para medir la velocidad de agitación cuenta con un variador de frecuencia, para el control preciso y estable. Las velocidades pueden ser entre 600 y 1600 RPM.

Todas estas variables son controladas mediante una pantalla digital, en la cual se pueden ingresar todos los parámetros indicados anteriormente.

La celda utilizada tiene una capacidad útil de 1.5 litros.



Figura 16: Celda EDEMET

3.2 Procedimiento Experimental

3.2.1 Preparación de Muestras

Una vez recibida la muestra, se tamizan (Tamizador automatizado *Ro-Tap*) ambos materiales, mineral y ganga, para obtener el material según granulometría.

El cuarzo utilizado debe ser bajo tamaño de la malla #325 ($44\mu m$). Todo el material que estuviese sobre tamaño debía ir a un pulverizador a reducir su tamaño y volver a hacer el procedimiento hasta obtener el tamaño deseado.

El mineral utilizado debe estar sobre la malla #140 ($105\mu m$) y bajo la malla #80 ($177\mu m$), tamaño ideal para la flotación y con la diferencia suficiente respecto del cuarzo para poder ser separadas, ya que en este estudio no existe un posterior análisis químico.

Al obtener ambos materiales en el tamaño indicado, se cortan en el cortador rotatorio para las posteriores pruebas, las cuales fueron masadas para obtener análisis en condiciones iguales y bajo el error estándar.

Se utilizaron las dos primeras pruebas para obtener la cantidad adecuada de agua con tal que el nivel de espuma quedase al mismo nivel del labio, ya que de esta forma toda la recuperación de espuma fuese mediante el paleteo.

3.2.2 Protocolo de flotación

Antes de comenzar cada prueba, debemos calibrar los equipos y tener pesadas y rotuladas las bandejas donde se vaciará el concentrado.

Colocar la lámina de acrílico como tope, a cierta distancia del labio según corresponda en cada caso. Encender la celda flotación y al asegurar que los parámetros iniciales estén correctamente, incorporar los sólidos.

Al iniciar la flotación, durante el proceso de pre acondicionamiento, agregar los reactivos para que se produzca la mezcla de ellos, masados anteriormente con la Balanza de precisión (SARTORIUS) y con el medidor de pH (OHAUS). Al terminar la fase de pre acondicionamiento empezar a realizar la remoción de espuma manualmente por parte del operario, según el tiempo que este predeterminado según el experimento.

Cada bandeja va siendo retirada y pesada según corresponda, dejándola en un horno para que los líquidos se evaporen. Este proceso dura un día.

Al día siguiente, las bandejas con el material seco, se vuelven a pesar y luego se deposita el sólido a un tamiz el cual separará el mineral de la ganga, ya que ambos tienen diferentes tamaños.

Finalmente se puede masar el mineral y el cuarzo por separado.

3.3 Muestras

Para los posteriores análisis, es relevante tipificar las muestras las cuales se utilizarán, con sus respectivos pesos.

Por ello, se expone en la Tabla 2, todas las muestras utilizadas en los experimentos futuros, y en qué campaña se utilizarán.

Campaña N°1	Campaña N°2	Cuarzo
50.01 ± 0.137	64.81 ± 0.89	297.68 ± 1.058

Tabla 2: Muestras, promedios y márgenes de error.

IV RESULTADOS

4.1.-CAPITULO 1: ANÁLISIS DE FLOTABILIDAD

Al comenzar a realizar un análisis de flotación, es importante conocer los parámetros teóricos en los cuales sentar nuestras bases. Por ello tomamos como referencia el primer set de experimentos para el cálculo de estos parámetros. Como primera parte, se expondrán los cálculos de los parámetros de cinética de flotación. Posteriormente, se observará la recuperación versus ley y la cantidad de componentes existentes dentro del proceso de flotación.

4.1.1 Ajuste a los parámetros de flotación clásica.

Para el cálculo de la constante cinética de flotación k y la recuperación a tiempo infinito R_{∞} , se utilizan las ecuaciones cinéticas para flotación batch de García-Zúñiga, Klimpel o Rápido-Lento.

La metodología aplicada para obtener los parámetros cinéticos de las pruebas de flotación es minimizar la suma de errores al cuadrado, utilizando la herramienta SOLVER de EXCEL.

$$error_i = (R_{exp,i} - R_{mod,i})^2$$

Ecuación 9: Cálculo de error para constantes cinéticas

Donde:

$error_i$: Error cuadrático ponderado

$R_{exp,i}$: Recuperación experimental para el tiempo de flotación

$R_{mod,i}$: Recuperación modelada en función de k y R_{∞} para el tiempo de flotación

Y los resultados de la suma de errores están expuestos en la Tabla 3:

Ecuación Batch	Suma de Errores
García-Zúñiga	218.4
Klimpel	155.3
Rápido-Lento	46.7

Tabla 3: Elección factores cinéticos

Como se observa en la Tabla 3, la menor suma de errores y el R^2 más cercano corresponde a la ecuación de rápido lento, ya que esta consiste de dos variables más.

Según literatura la recuperación rápida está asociada a flotación verdadera y la recuperación lenta está asociada al arrastre.

En el gráfico se observa que a pesar de que la suma de errores arroja una diferencia notoria hacia una de las teorías, gráficamente se aprecia que en principio ninguna de las posibles alternativas parece estar distante con respecto al experimental.

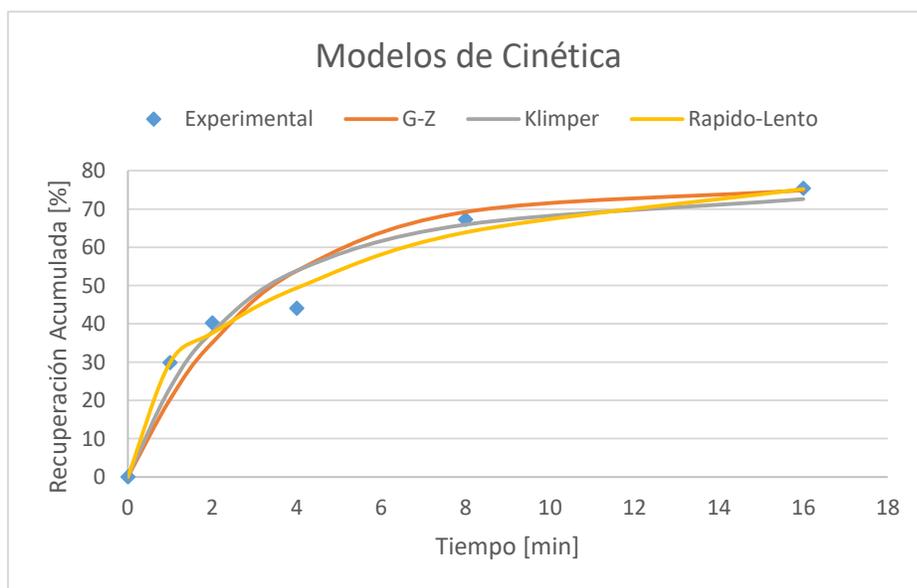


Figura 17: Comparativa Experimental Teoría Batch

Ya escogida la ecuación cinética para las próximas pruebas, los parámetros asociados de todos los modelos son los siguientes, expuestos en la Tabla 4:

Parámetro	θ_R	θ_L	$\theta_R + \theta_L = R_\infty$	k_R	k_L
Valor	0.582	0.211	0.793	0.166	4.750

Parámetro/Modelo	G-Z	Klimpel
R∞	75.4	79.3014022
K	0.31261558	0.73826297

Tabla 4: Parámetros Cinéticos

Quedando la ecuación de la siguiente forma

$$R(t) = 0.58(1 - e^{-0.166t}) + 0.211(1 - e^{-4.75t})$$

Ecuación 10: Rápido-Lento experimental

4.1.2 Curva de Recuperación y Ley

El análisis clásico realizado habitualmente en flotación, contiene como parte inicial la observación de la recuperación en comparación a la ley de la especie que se desea recolectar. Esto facilita determinar valores de los diferentes circuitos de operación (*Rougher, Cleaner, Scavenger*), sea maximizando la recuperación o la ley, según sea correspondiente.

El análisis realizado en esta memoria, difiere con lo que usualmente se hace, ya que nuestro alcance de la memoria no contiene análisis químicos donde poder determinar la ley exacta de mineral, por lo que se clasifica en ganga o mineral. Es por ello que en la Figura 16 se identifica como ley de mineral, a la cantidad de mineral que sale por sobre el total de sólidos reportados en el concentrado.

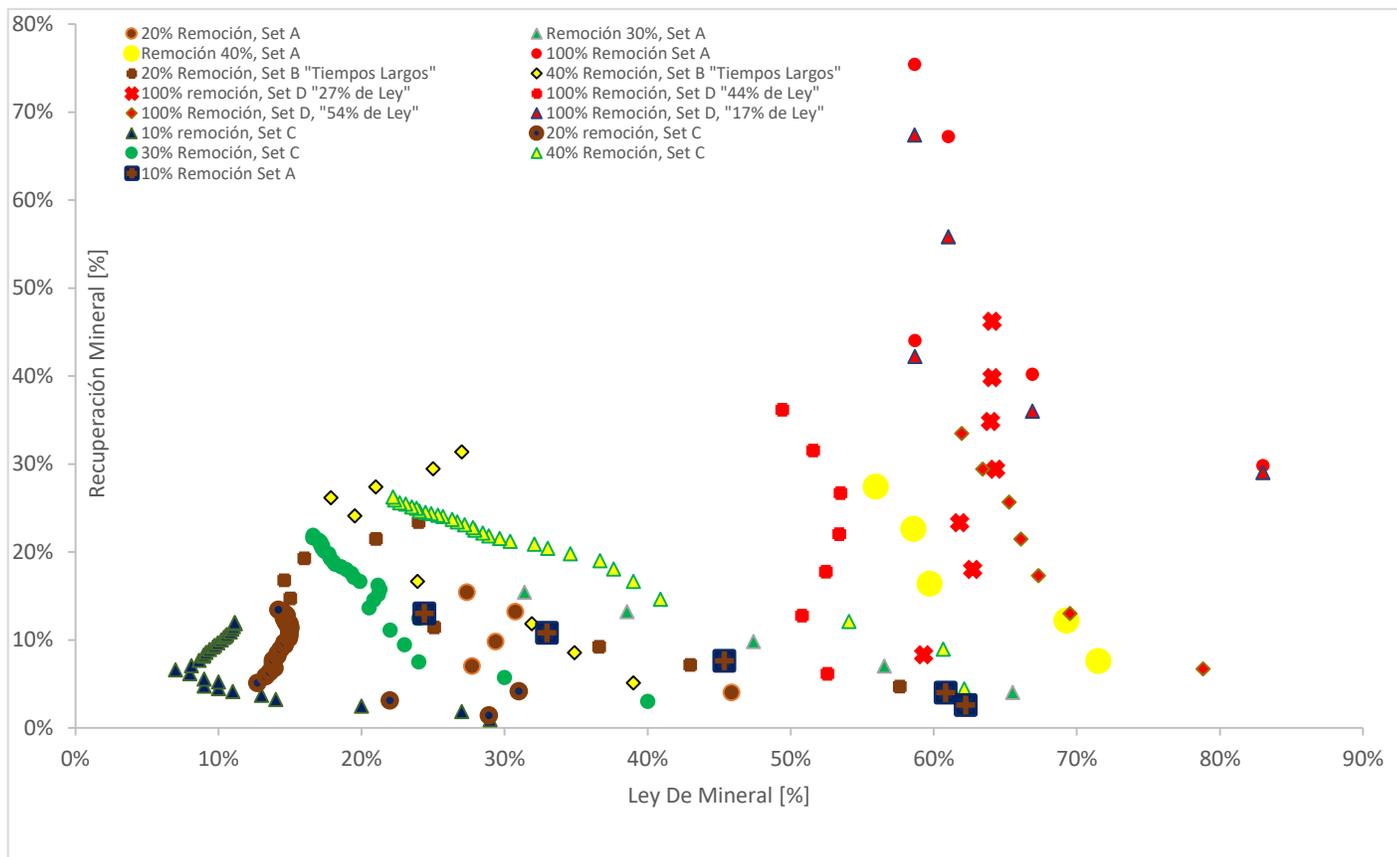


Figura 18: Gráfica Recuperación vs Ley. Mineral +#150-#80, Ganga -#325, Xantato 45 gr/ton; Aerofroth70° 35 gr/ton; Hidróxido de Sodio como Modificado de pH.

Se puede apreciar en la Figura 17, tal como se explica en un comienzo, que a medida que disminuye la recuperación de mineral, su ley va aumentando. En la mayoría de los experimentos en este estudio de memoria, se extrae una porción de espuma, por lo cual se puede apreciar una mayor cantidad de datos en la zona baja del gráfico, donde se presenta los datos con menor recuperación.

Aun así, puede concluirse que los resultados van de la mano con la teoría, para futuros análisis, considerar los datos presentados.

4.1.3 Análisis de componentes presentes en la flotación

Conociendo las componentes del proceso de flotación, entenderemos los agentes que están involucrados en el fenómeno. Las componentes habituales al ser observadas son la flotación verdadera y el arrastre, el cual puede descomponerse de varias formas o predominar solo una de ellas.

Para ello se utiliza el método Imaizumi (*et al 1963*), con el fin de cuantificar la razón de material el cual está siendo extraído producto de las diferentes componentes que sean observadas. Este método es gráfico, y es principalmente ingresar los datos de la flotación e ir desacoplándolos por las ecuaciones de recuperación ya conocidas y los diferentes métodos de arrastre existentes, consiguiendo así las diferentes composiciones de los datos.

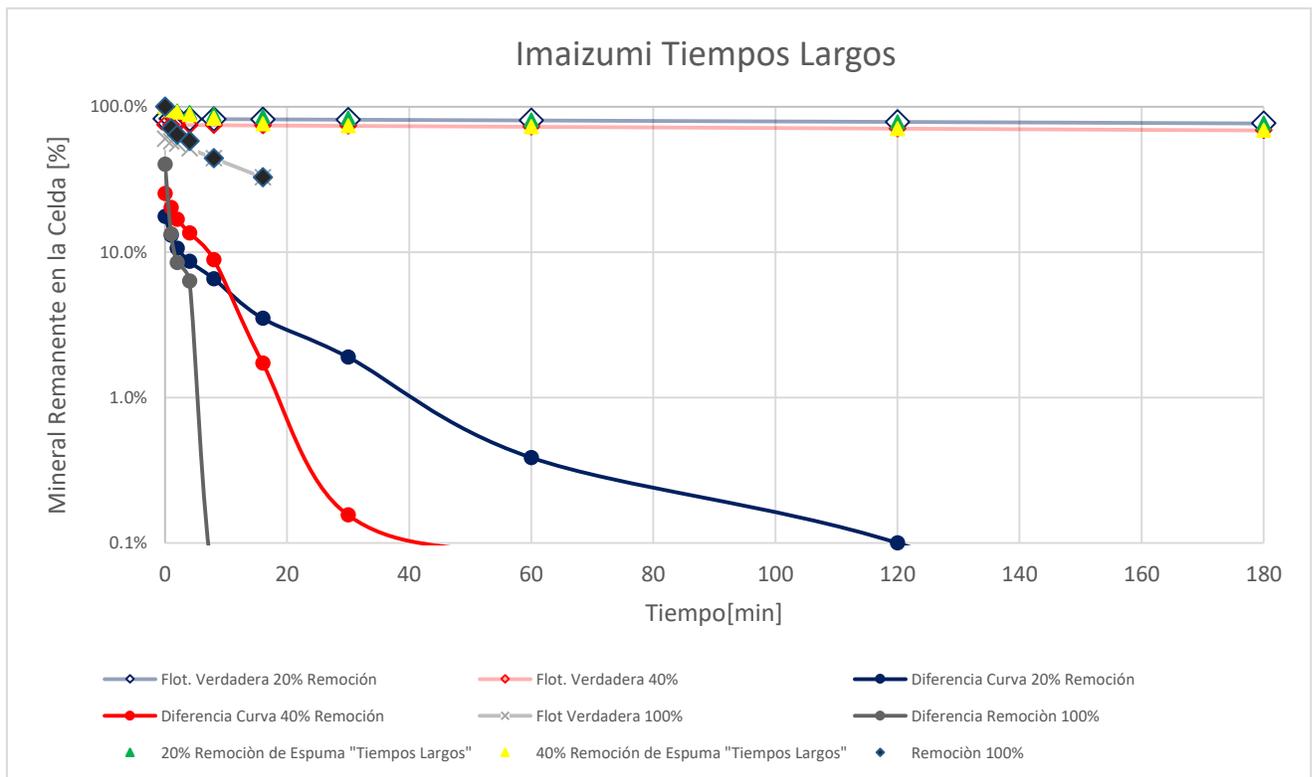


Figura 19: Gráficos de Imaizumi

En la Figura 19 que se muestra a continuación, se observa el gráfico de Imaizumi:

La curva principal (original) muestra la razón del mineral remanente dentro de la celda a través del tiempo, la cual se divide en dos, cuya suma generaría nuevamente la curva original. La primera que coincide tangencialmente con la original está asociada a la flotación verdadera, la que ocurre íntegramente por los procesos fisicoquímicos en la superficie de la burbuja y la curva generada por la resta de esta y la original se compone por los diversos tipos de arrastres que pueden existir dentro de la celda. En este caso, es posible observar que la diferencia entre la curva original y la siguiente, es cercana de un 40%, por consiguiente se infiere que la mayor parte de la recuperación del mineral proviene del arrastre, concluyendo así que al menos tenemos 2 componentes presentes en el proceso de flotación.

4.1.4 Grado de Separabilidad

Este análisis muestra factores muy importantes a la hora de observar una flotación, y como se relacionan entre ellos. Son la Recuperación y el índice de enriquecimiento (IR). Este índice es el cociente entre la ley de mineral que se reporta en el concentrado, versus la ley de mineral en alimentación. Estas variables son antagónicas entre sí,

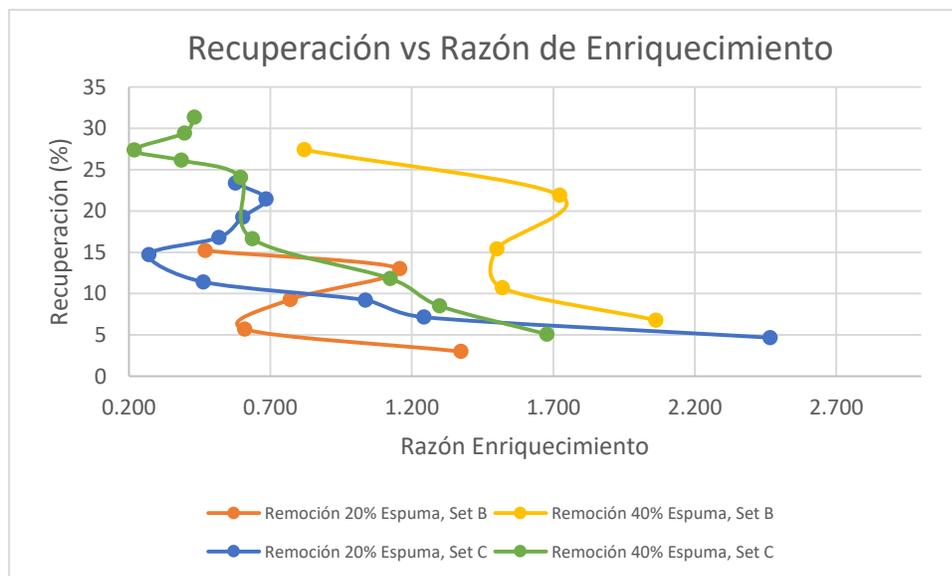


Figura 20: Gráfico Recuperación vs Razón enriquecimiento

mientras mayor es uno, el otro baja. Observemos la Figura 20 los datos obtenidos.

Al comienzo se obtienen las recuperaciones más bajas, pero con un índice de enriquecimiento mayor, esto indica que al comienzo de la flotación hay mayor limpieza en el proceso. Luego al comenzar a pasar el tiempo la flotación comienza a recuperar más cantidad pero con menor enriquecimiento, en esta parte el arrastre comienza a predominar. Finalmente llegamos a valores los cuales el índice de enriquecimiento se acerca a 1, ya desde ese minuto la flotación no tienen ningún efecto de selectividad, por tanto convendría detenerla. Es por ello que las flotaciones tienen un tiempo específico para cada elemento, así evitar que ocurra esto. Las muestras del Set C, tienen un índice aún más bajo, ya que esas muestras fueron sometidas hasta 3 horas de flotación batch. Se puede inferir que en un comienzo (primeros 2 minutos), puede parecerse a una flotación de limpieza o *Cleaner*, dado su alto enriquecimiento, luego pasa a una fase *Rougher*, ya que intenta maximizar la recuperación, perdiendo ley. Finalmente podríamos asociar una fase *Scavenger*, que el único propósito es evitar que algún contenido de mineral valiosos se pierda, aunque las leyes bajen de manera considerable.

Todos los datos y gráficas se encuentran en ANEXO C.

4.2.- CAPÍTULO 2: IMPACTO DE LA REMOCIÓN DE ÁREA EN LA RECUPERACIÓN

Este capítulo comprende tres set de experimentos diferentes, dando un total de 16 pruebas. En la tabla se mostrarán cada una de las muestras utilizadas. Estos experimentos tendrán una particularidad, la cual es que en el paleteo o *scrapping*, se realizará solamente retirando un cierto porcentaje de la espuma total que se encuentra en la celda.

Para ello se coloca un tope a una cierta cantidad de centímetros del labio de la celda, con tal que al retirar la espuma solo se extraiga la porción delimitada. Cada set de experimentos posee las mismas características técnicas, diferenciándose entre sí, en el tiempo el cual se van tomando las muestras.

4.2.1 Recuperación Mineral según área de remoción de espuma *Flotación Clásica*

Este primer set de experimentos realizados, los cuales denominaremos Set B, son 4 medidas diferentes, con sus respectivos duplicados, generando un total de 8 muestras. Son el caso base, ya que sus tiempos de muestreo son los mismos que con respecto a los otros experimentos realizados. Estos corresponden a tiempos de muestreo de 1,2, 4, 8 y 16 minutos.

Los datos más detallados se encuentran en ANEXO C.

En la Figura 21 se presentan las recuperaciones acumuladas en función del tiempo para el Set B de experimentos.

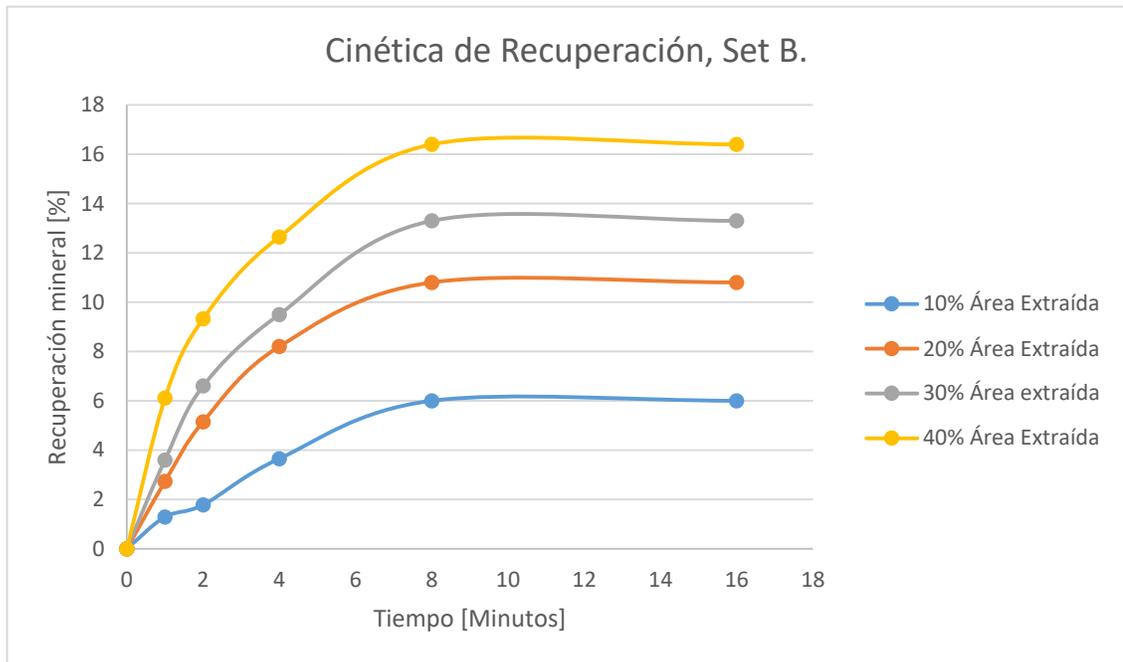


Figura 21: Recuperación Set B Capítulo 3. Mineral +#150-#80, Ganga -#325, Xantato 45 gr/ton; Aerofroth70° 35 gr/ton; Hidróxido de Sodio como Modificado de pH.

Como se muestra en la Figura 21 se observa una tendencia proporcional. A mayor área extraída, conlleva una mayor recuperación final, algo esperable en un comienzo, ya que existe una mayor remoción de espuma la cual está cargada con mineral. Otro punto a recalcar es que la diferencia porcentual entre cada uno de ellos es muy similar, esto puede deberse a que la espuma tiene una capacidad uniforme en toda su área disponible, quiere decir que si se extrae una porción de espuma de igual medida en cualquier lugar de la celda, probablemente obtenga una cantidad similar de mineral.

Flotación a tiempos Largos

El segundo set de experimentos, Set C, tiene como diferencia el tiempo total al cual fue sometida esta flotación. La primera parte de la flotación es la misma a la explicada en el Set A, con la particularidad que después de flotar por 16 minutos, el tiempo estándar para este estudio, se prolonga la toma de muestras a los tiempos de 30, 60 120 y 180 minutos.

Se realizaron 2 muestras para este experimento.

En la Figura 22 se grafica la recuperación en función del tiempo para el Set B.

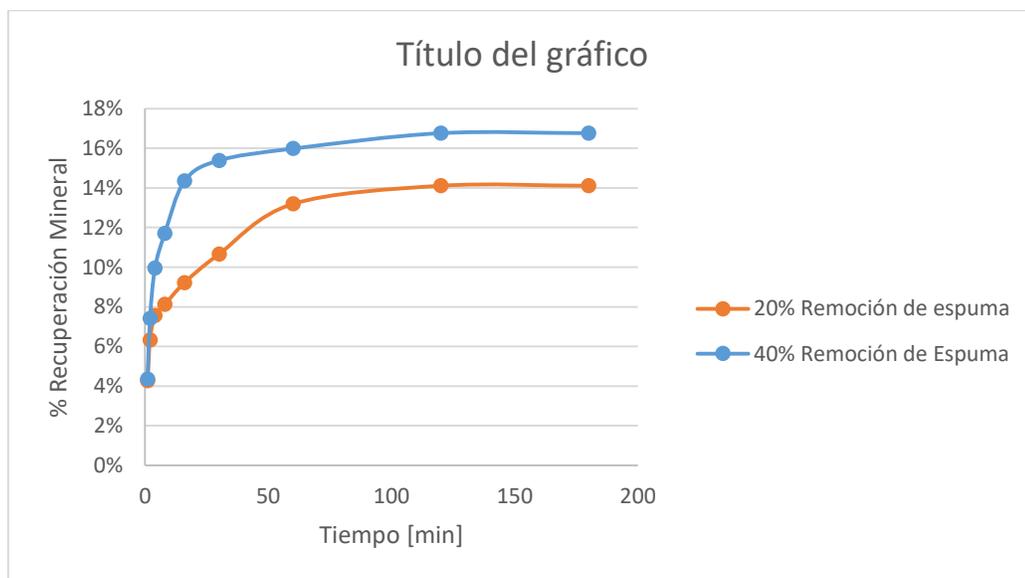


Figura 22: Recuperación Set C Capítulo 3. Mineral +#150-#80, Ganga -#325, Xantato 45 gr/ton; Aerofroth70° 35 gr/ton; Hidróxido de Sodio como Modificado de pH.

Como se observa en la Figura 22, la tendencia observada anteriormente se mantiene, a mayor área de remoción tendremos una mayor recuperación final. Otra observación importante que se puede dividir los gráficos en dos fases. En los primeros 20 minutos sucede la primera, y desde ahí varía la forma de la curva, entendiéndose que luego de tiempos muy largos, el proceso de flotación enfrenta cambios en la cantidad de recuperación.

4.2.2 Comparativa

En la Tabla 5 se muestran las recuperaciones finales, para tiempos iguales, y a tiempos finales para ambos sets de experimentos.

Muestra /Área Remoción	20% Remoción	40% Remoción
Set B.16 Min.	9.2%	14.3%
Set A. 16 Min.	10.8%	16.4%
Set B. 180 Min.	14.1%	16.8%

Tabla 5: Recuperaciones Finales Capítulo 3

El Set A tiene mejores recuperaciones acumuladas a los 16 minutos de flotación, no obstante, no son valores tan diferentes como para adjudicarlos a algún fenómeno específico.

Al finalizar el Set B (180 min), observa que tiene un aumento considerable en su recuperación, al punto de sobrepasar al Set A en ambas muestras. El aumento considerable de la muestra del Set B, donde se removía el 20% de la espuma, es el primer indicio de la teoría que existe del *dropback*.

La teoría dice que el *dropback* debiese ser inversamente proporcional al área de remoción, ya que a medida que nosotros tenemos una mayor área de espuma la cual se encuentra estática, la posibilidad de colapso de la burbuja o drenaje del material valioso en esa área aumenta considerablemente.

Si comparamos el aumento entre ambos experimentos del Set B desde el minuto 16 al minuto 180, el aumento en la muestra que se extrae el 20% de la espuma, con respecto del 40%, es cercana al doble, siendo consistente con la teoría del *dropback* expuesta anteriormente.

4.2.3 Cinética específica de recuperación

Considerando la posibilidad de obtener alguna información relevante sobre el *dropback* o cambios en la eficiencia de la fase espuma, se realiza un tercer set de experimentos, de 4 muestras. La diferenciación como se mencionó en un comienzo es el tiempo de muestra, para ver si existe algún cambio en la velocidad de recuperación a través del tiempo, se tomarán muestras a tiempos constantes de 30 segundos, durante 15 minutos.

Aquí observaremos la primera y segunda derivada de la recuperación versus tiempos, así determinar el punto de quiebre donde podrá diferenciarse los fenómenos de flotación verdadera, arrastre y *dropback*.

En las Figuras 23 y 24 se despliegan las formas que presentan ambas derivadas.

Para observar de manera fácil, fueron trasladadas de manera normal para que fuesen comparadas en un gráfico.

Los resultados de recuperaciones y datos específicos están en ANEXO C.

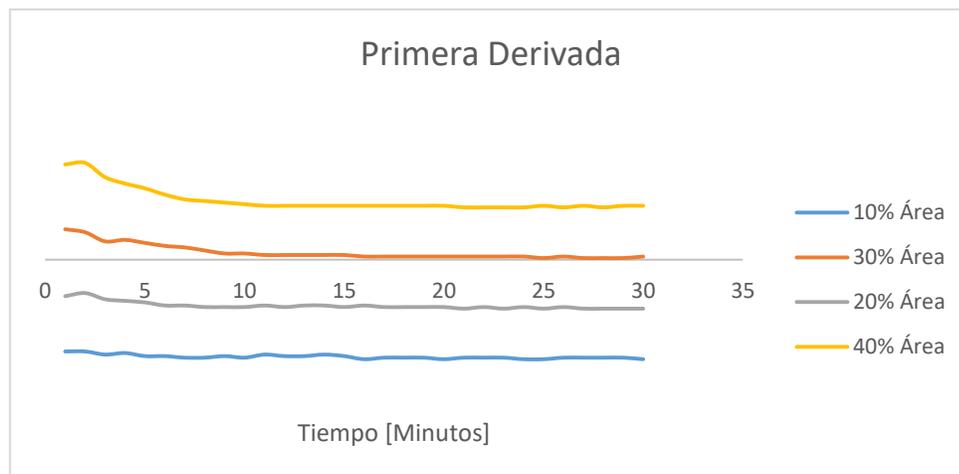


Figura 23: Primera Derivada Set D. Mineral + #150-#80, Ganga - #325, Xantato 45 gr/ton; Aerofroth70° 35 gr/ton; Hidróxido de Sodio como Modificado de pH

En la Figura 23 podemos apreciar que la pendiente se mantiene en todos los experimentos casi de manera constante, exceptuando el primer minuto donde se

observan mayores valores, estos valores son proporcionales al área de remoción, lo cual es concordante con la teoría, ya que en los primeros minutos es donde se presenta predominantemente la flotación verdadera. Es así que mientras mayor área disponible para extraer, mayor será su recuperación.

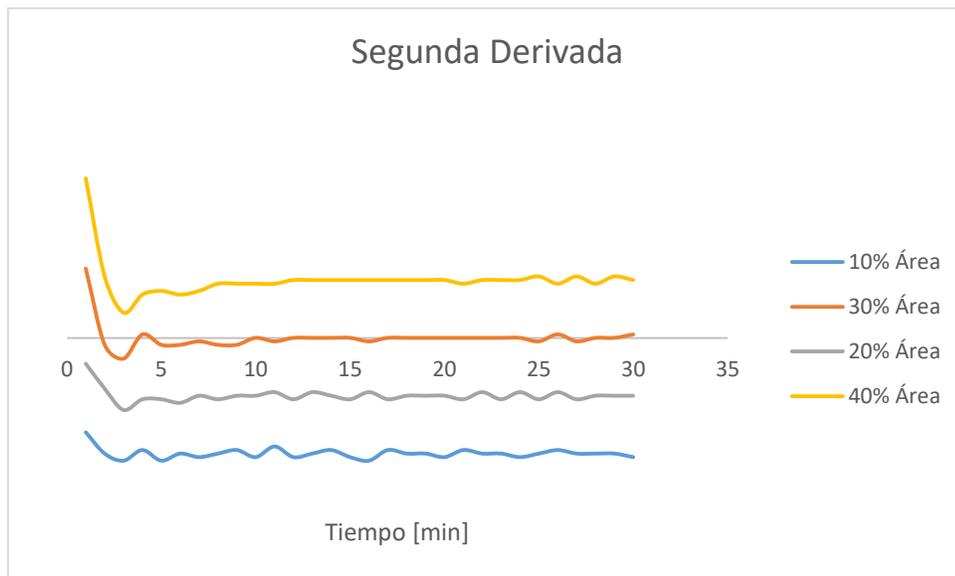


Figura 24: Segunda Derivada, Set D. Mineral + #150-#80, Ganga - #325, Xantato 45 gr/ton; Aerofroth70° 35 gr/ton; Hidróxido de Sodio como Modificado de pH

Al igual que en la Figura 24, se aprecia de mejor forma la primera parte de la flotación, donde ocurre en principio, la flotación verdadera. No obstante, luego de ello, no se observan mayores cambios apreciables. Es por esto, que no podemos aseverar la existencia de un momento específico en el cual se pueda asociar al arrastre o *dropback*. Por tanto el análisis no es concluyente.

Recuperación de mineral vs Índice de enriquecimiento

Al observar que los valores anteriores no son concluyentes para este experimento, se modifica el enfoque. Para observar en parte la eficiencia de la espuma según teoría, utilizaremos el gráfico de recuperación versus índice de enriquecimiento. Esta muestra de qué forma se está comportando en el tiempo la flotación.

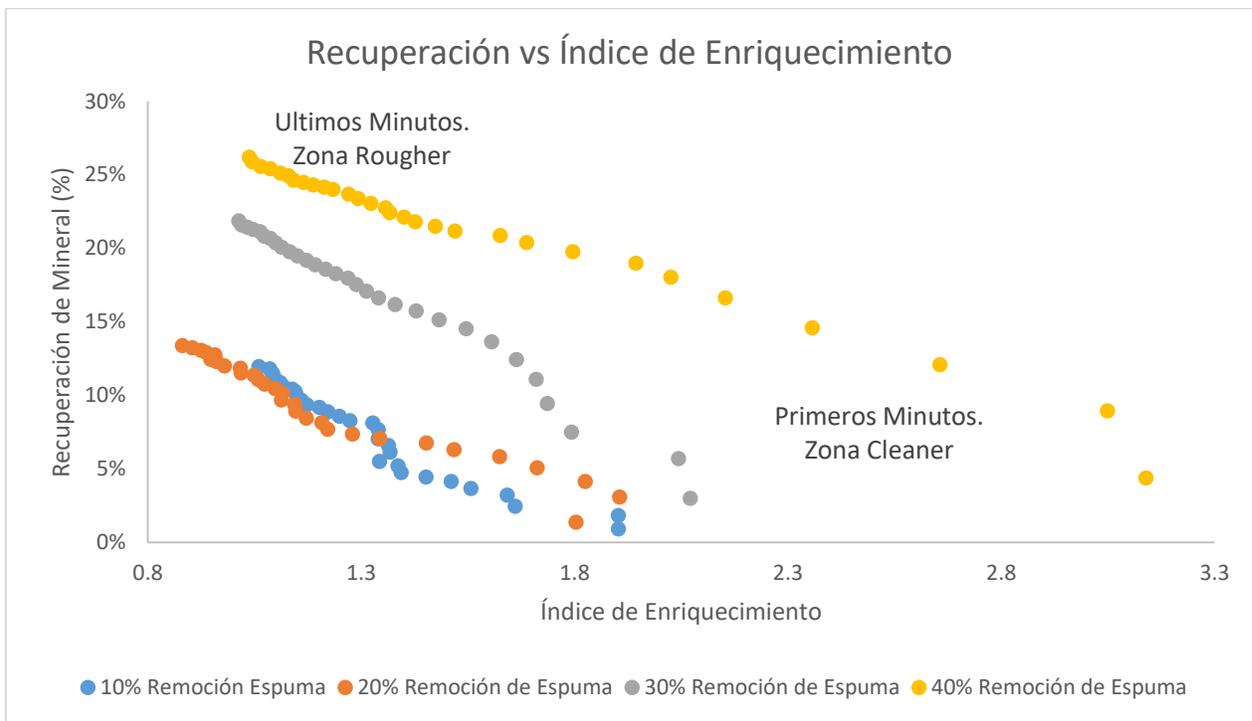


Figura 25: Recuperación Mineral vs Índice de Enriquecimiento, Set C Experimentos. Mineral +#150-#80, Ganga - #325, Xantato 45 gr/ton; Aerofroth70° 35 gr/ton; Hidróxido de Sodio como Modificado de pH

Como se aprecia en la Figura 25, se observa con el correr de los minutos como se desplaza desde una zona Cleaner, la cual su particularidad es tener bajas recuperaciones y una alta selectividad, hacia un zona Rougher/Scavenger, donde recuperar la mayor cantidad es prioridad. Además se aprecia que en los primeros minutos, existe una tendencia, mientras más espuma se remueva, mayor selectividad tendrá, esto al observar los valores máximos de enriquecimiento. Puede deberse a que el movimiento en sectores más cercanos al labio correspondan al transporte vertical de la espuma, asociado a la parte baja de la espuma y posiblemente con mayor partículas provenientes de arrastre, que “ensucian” el concentrado, a diferencia de remociones más grandes donde una componente horizontal se hace presente, siendo esta la primera capa de espuma, que es más limpia, como se observa en las columnas, a mayor altura de espuma existe una mayor limpieza del mineral.

4.2.4 Estimación de Recuperación y constantes de flotación

En este apartado se utilizarán modelos adaptados desde la literatura para ver la similitud que estos tienen con respecto a los resultados experimentales obtenidos.

Valores Estimativos

Antes de comenzar con el análisis, al tener los resultados de los experimentos, podemos estimar los valores que podremos obtener para segmentar nuestros posibles resultados. Para ello utilizaremos el gráfico de Vera (Figura 11), este consiste en un gráfico 3D que muestran los valores posibles de R_f y R_c para una determinada recuperación.

Se tomaron las recuperaciones globales por tiempo y según ese valor se trazó un plano en el gráfico, para darnos las combinaciones posibles de valores, con el fin de saber el máximo valor de R_f .

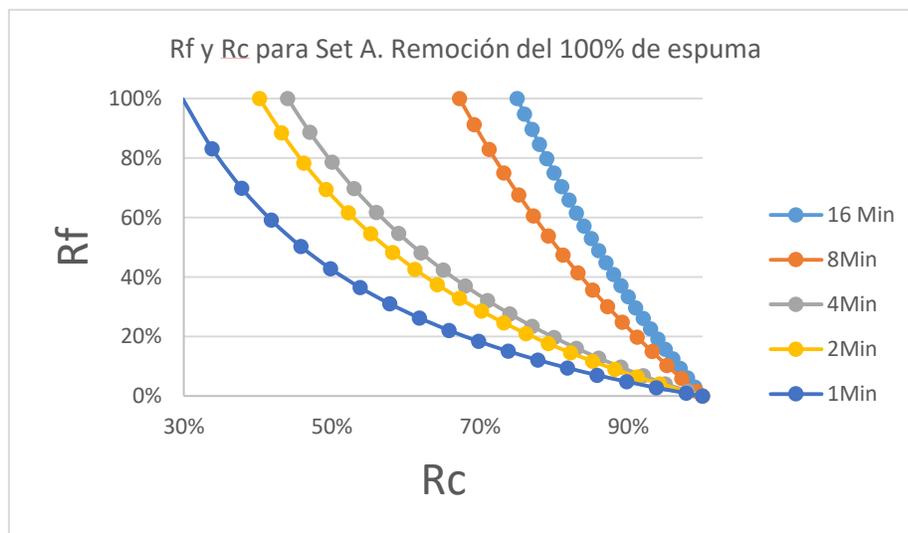


Figura 26: Gráfico R_f vs R_c para un R fijo, Set A de Experimentos. Mineral +#150-#80, Ganga -#325, Xantato 45 gr/ton; Aerofroth70° 35 gr/ton; Hidróxido de Sodio como Modificado de pH

En la Figura 26 apreciamos las diferentes curvas en función del tiempo, ya que se obtiene una mayor recuperación global. Se observa movilidad del gráfico hacia la derecha a través del tiempo y también la tendencia tener una forma lineal.

Para estimar estos datos, supondremos que cada caso en el cual se remueva solo una porción de la espuma, su eficiencia máxima será igual a esa proporción. Para ello debemos asumir que la espuma estará cargada de forma uniforme en todo su volumen. Así podremos observar la tendencia que tienen la eficiencia de pulpa.

En la figura 27 podremos ver para algunos experimentos, la supuesta eficiencia por parte de la pulpa durante la flotación. Los valores y otros gráficos de R_f versus R_c se encontrarán en ANEXOS E.

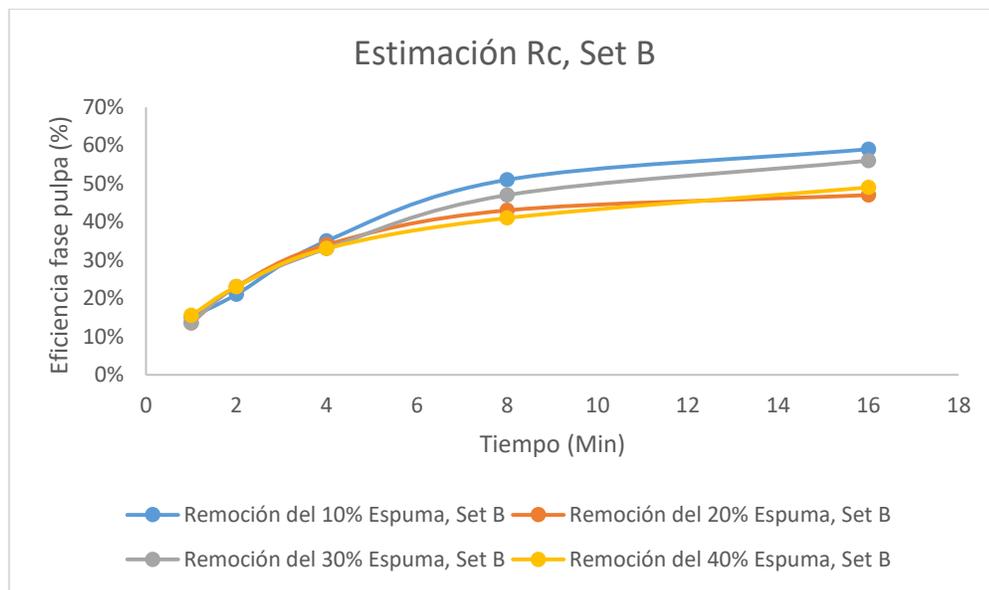


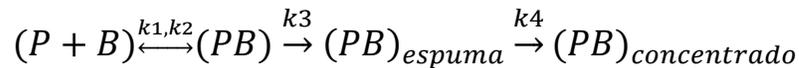
Figura 27: Estimación R_c .

Como se observa en la estimación, R_c se incrementa a través del tiempo llegando a valores similares para los diferentes experimentos. Este comportamiento uniforme por parte de la pulpa es esperable, dado que las condiciones iniciales para cada experimento fueron iguales. El incremento visto en la gráfica se debe a que, mientras avanza el tiempo, la probabilidad que el mineral se adhiera a una burbuja aumenta, aumentado as

Inclusive, observando las Figuras 40 y 41 encontradas en Anexos E, las cuales corresponden a la misma estimación para los otros Set (C y D), se observa los mismos valores a través del tiempo, lo cual refuerza la idea de que todos los experimentos tienen un comportamiento similar.

Estimación con Cinética de Primer Orden

Aquí se evaluará por completo el proceso de flotación como un agregado partícula-burbuja. Es por ello que se definirán diferentes etapas que serán identificadas a continuación.



Ecuación 11: Cinética del proceso de flotación

La ecuación 11 explica el proceso completo por el cual pasa la partícula, la cual es adherida y convertida en agregado partícula-burbuja con una constante k_1 , mientras que k_2 comprende el ratio de partículas que se desprenden de la burbuja.

Existe una cierta cantidad de agregado partículas burbujas que asciende hasta la espuma, lo cual está determinado por k_3 .

Finalmente una cierta cantidad de partículas que están en la espuma llegan finalmente al concentrado, ese valor esta denotado por k_4 .

Los resultados obtenidos están muy distantes de los experimentales, esto puede tener en consecuencia que los valores iniciales no son adecuados o que la ecuación no

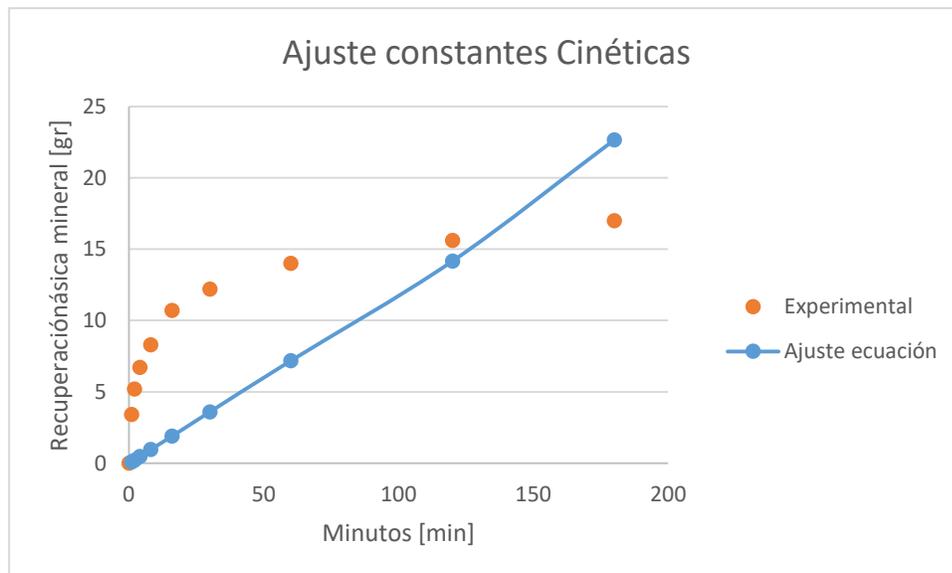


Figura 28: Ajuste Ecuación cinética

ajusta para los datos obtenidos.

Los balances específicos y las ecuaciones utilizadas de este proceso se encontrarán en ANEXO E.

Recuperación de fase espuma en continuo

Para este análisis se decidió usar una de las ecuaciones que definen la recuperación de espuma, esta fue la Ecuación 1 (Savassi, et al 1998).

$$R_f(t) = \frac{m_c(t)}{J_g * A * B_l(t)}$$

Ecuación 12: Recuperación de espuma, Yianatos et al 2008

Dicha ecuación posee una variante, mostrada en la Ecuación 12, la cual tiene como variables el flujo de masa del concentrado, el flujo que pasa por la celda y la carga de burbujas.

$$\frac{dR_f}{dt} = \frac{(-m_{cmax} * k_1 * e^{-k_1 t}) + (m_{cmax} * e^{-k_1 t} * k_2)}{J_g * A * B_{lmax} * e^{-k_2 t}}$$

Ecuación 13: EDO para recuperación de espuma

Mediante una ecuación diferencial y su consiguiente minimización de errores, realizados desde el software MATLAB, se pueden obtener los coeficientes (o ratios) del flujo de masa que se reporta al concentrado y de la carga de burbujas.

Más relevante que la propia aproximación de los valores a los datos experimentales, es observar la tendencia a través del tiempo, de la eficiencia de la fase espuma. Esto es debido a que como es una flotación en continuo, los datos otorgados por esta memoria no son útiles para utilizar este método.

Lo importante es comprender que a tiempos grandes la ecuación tiende a cero, esto ocurre cuando la constante de flotación (k_1) es mayor que la constante cinética de

carga de burbujas (k_2), así mientras avanza el tiempo, la eficiencia de la espuma va disminuyéndose hasta ser 0.

Esto es posible ya que las flotaciones a grandes tiempos se pueden dividir en dos fases de flotación, ya que a medida que existe menos porcentaje de sólidos dentro de la celda, el comportamiento cambia.

Mayores datos y procedimientos específicos, se encontrarán en ANEXOS E.

4.3.-CAPITULO 3: IMPACTO LEY DE MINERAL EN RECUPERACIÓN DE ESPUMA

En este capítulo observaremos como afecta la cantidad de mineral en la recuperación. La remoción de espuma en estos experimentos será completa. Se varía la razón de mineral sobre el total de sólidos (o ley de mineral), manteniendo constante la cantidad de sólidos que se incorporarán a la celda.

En la Tabla 6 se exponen las muestras utilizadas para el experimento con sus respectivos pesos.

Muestra #	Mineral [gr]	Ganga [gr]	Razón Mineral/Sólido (Ley de Mineral)
1A	50	300	14%
2C	100	250	29%
3C	150	200	43%
4C	200	150	57%

Tabla 6: Muestras Experimentos capítulo 2

En la Figura 29 se observa la recuperación en función del tiempo para las distintas razones utilizadas. En la Figura 30 tendremos la estimación del *dropback*, para el mismo set de experimentos, para reconocer si existe alguna relación de la alimentación inicial con este fenómeno.

4.3.1 Recuperación de Mineral

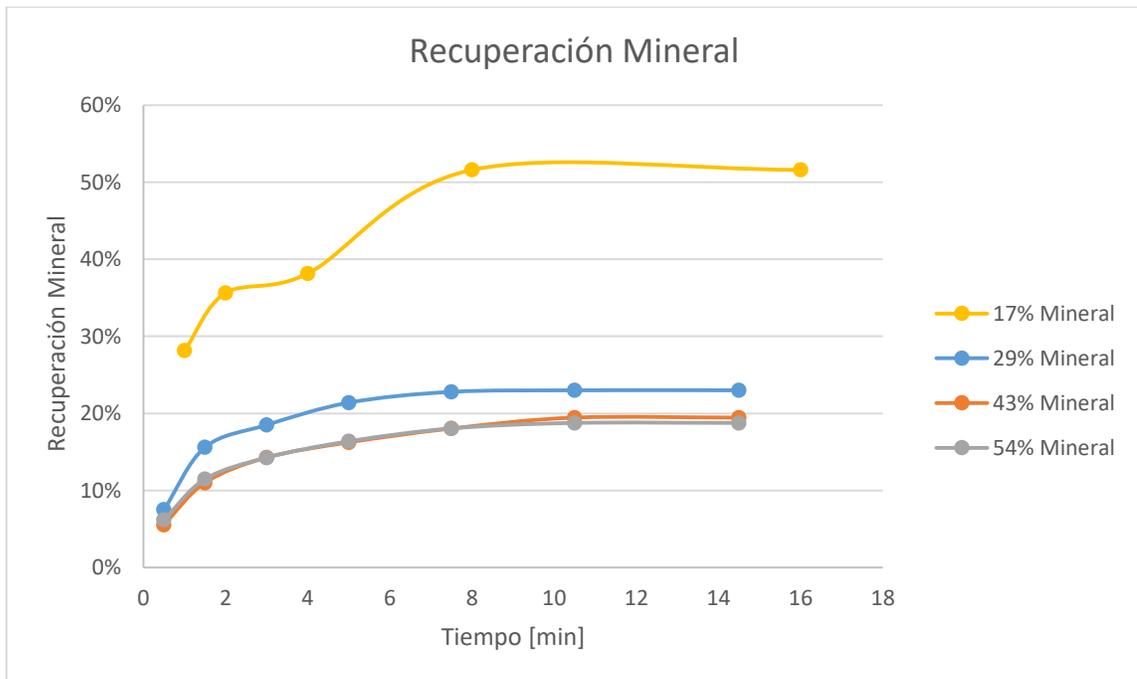


Figura 29: Gráfico razón Mineral / Ganga. Mineral + #150-#80, Ganga - #325, Xantato 45 gr/ton; Aerofroth70° 35 gr/ton; Hidróxido de Sodio como Modificado de pH.

Como se puede observar en la Figura 29, claramente se aprecia que existe una proporcionalidad entre la ley de mineral inicial con respecto a la recuperación final que se obtiene. Esto es algo que se podía predecir desde los análisis anteriores, ya que los gráficos Recuperación versus Ley (Figura 16) nos muestran que mientras mayor sea la ley, menor será la recuperación posible alcanzada. Esto puede explicar inicialmente lo que se refleja en la Figura 29.

La primera muestra, correspondiente a la **A1**, se encuentra a una distancia considerable respecto de las otras. Esto puede ser producido por diferentes cosas, una de las más predominantes es la capacidad máxima de transporte que posee la espuma. Recordar que, la espuma no es selectiva, por tanto lo que está reportando es por flotación verdadera o por arrastre.

Considerando esto, la Tabla 6 nos muestra la cantidad de mineral, en gramos, que fue reportada finalmente en el concentrado.

Prueba	Ley de Mineral	Rec. Final (%)	Mineral [gramos]
1A	14%	71%	35.7
1C	29%	46%	46.2
2C	43%	36%	54.2
3C	57%	33%	66.9

Tabla 7: Recuperaciones Capítulo 2

En la Tabla 6 se muestra que la masa de mineral va en aumento a medida que la ley se incrementa, indicador que son proporcionales.

La diferencia que se aprecia entre la tendencia observada en la recuperación final y la ley inicial, es debido a que aunque la cantidad de mineral reportada en el concentrado es mayor, no sobrepasa el incremento de mineral incorporado al comienzo de la flotación, dando como resultado un aumento másico de mineral pero una disminución del porcentaje total de este.

Es así como puede explicarse que la muestra 2C y 3C en la Figura 20 se aprecian prácticamente idénticas, observando la Tabla 6 podemos ver que la muestra 3C tiene una mayor masa de mineral recuperado.

4.3.2 Estimación de Dropback

Estimaremos la cantidad de *dropback* para diferentes alimentaciones iniciales. Para ello utilizaremos la ecuación de recuperación global y nos apoyaremos en la estimación de eficiencia de fase pulpa de la Figura 27. Utilizaremos los valores mínimos y máximos alcanzados allí y al obtener la recuperación total podremos en principio, estimar la eficiencia de espuma y su contrapartida, el *dropback*.

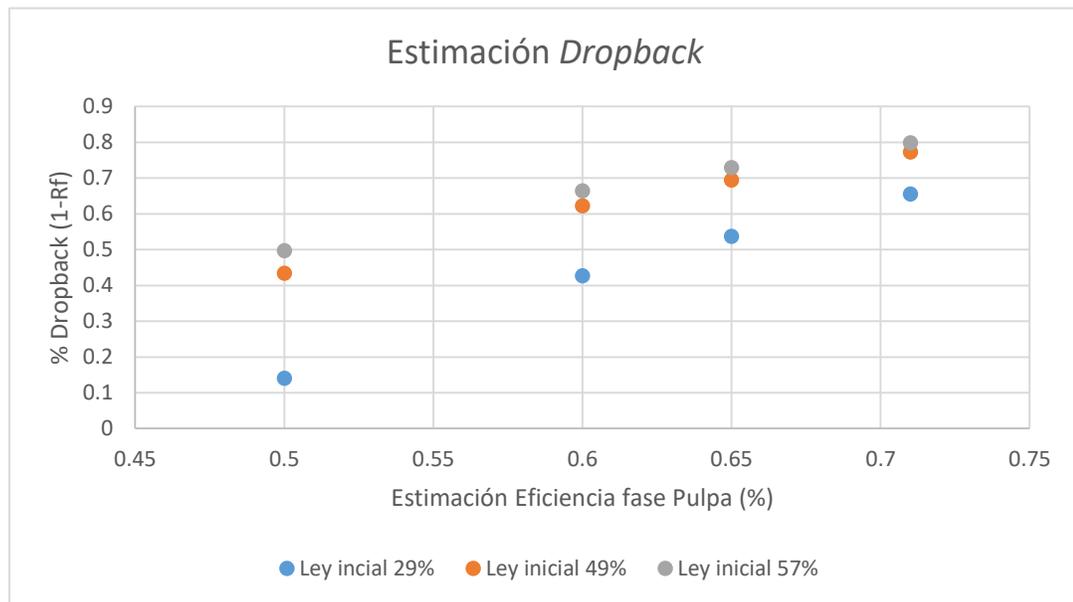


Figura 30: Estimación dropback

En la Figura 30 se observa que mientras mayor es la ley de mineral, mayor será el dropback-. Al evaluar en distintos valores la eficiencia de la fase pulpa, la tendencia sigue siendo la misma. Por consiguiente, si existe un mayor *dropback* de partículas a medida que aumenta la ley de mineral, es lógico al pensar que, con mayor ley, existe una mayor cantidad de partículas suspendidas en la espuma y una mayor posibilidad que estas se desprendan.

4.4.-CAPÍTULO 4: IMPACTO DE LA REMOCIÓN EN LA ALTURA DE ESPUMA

El presente capítulo tiene como propósito calcular a través del tiempo, la altura de espuma en ciertas zonas de nuestra celda.

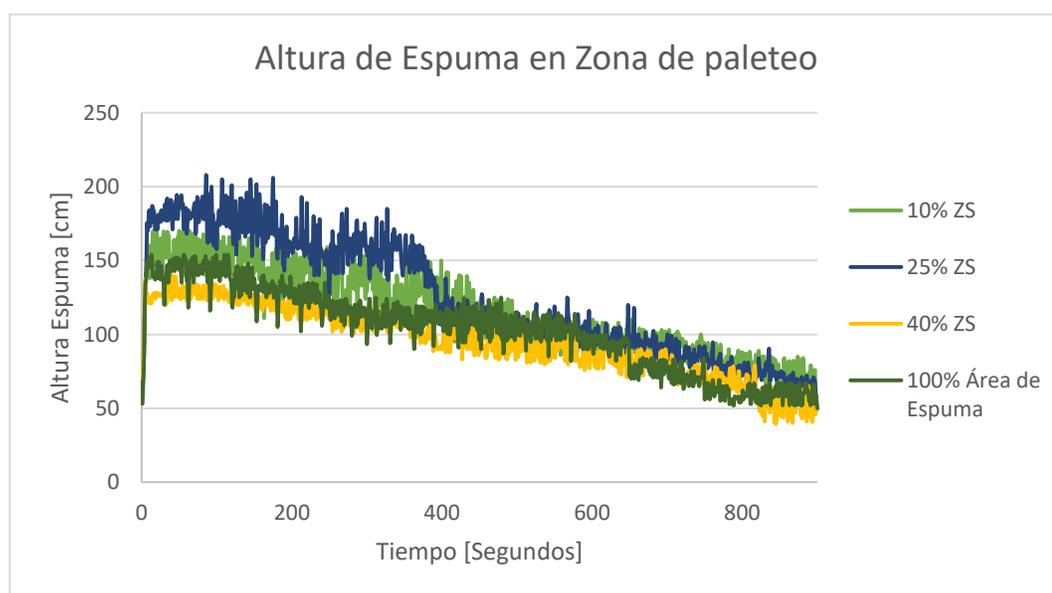
Se definen dos zonas principales, una dentro del área de remoción de espuma o *scrapping*, siendo esta el área delimitada entre el labio de la celda y el tope impuesto por nosotros según la proporción de área que queremos extraer. Otra zona es aquella fuera del área de remoción de espuma.

Para poder analizar tales experimentos, se procedió a grabar el proceso de flotación para cuatro diferentes zonas de *scrapping*. Luego se analiza y se mide la altura mediante el software IMAGE J para cada una de ellas.

4.4.1 Impacto en la altura de espuma dentro de la zona de *scrapping*

Para las mediciones de altura de espuma dentro de la zona de *scrapping*, se esperaría obtener valores no muy diferentes entre las 4 pruebas.

En la Figura 31 se muestran como varía la altura de espuma a través del tiempo para



estas cuatro muestras.

Figura 31: Altura de espuma en zona de scrapping

Se presenta una tendencia lineal decreciente, esto debido a que al retirar una cierta cantidad de espuma, el nivel global de pulpa disminuye, provocando una disminución a su vez de todos los componentes presentes en la flotación (agua, mineral, ganga, etc..).

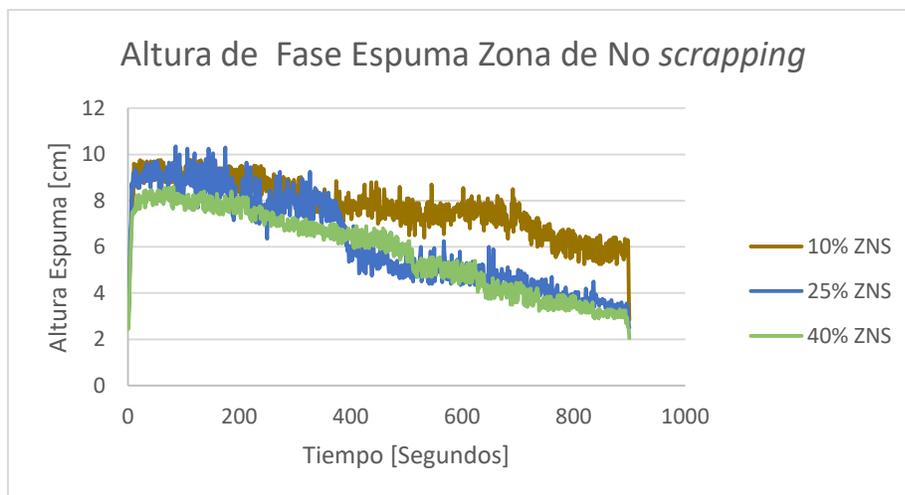
También se observa una cierta frecuencia (ruido), la cual está explicada ya que esta zona está siendo intervenida cada 20 segundos, el cual es el tiempo de paleteo.

Aun así, como estaba en los supuestos, la diferencia entre todas estas muestras no es importante.

4.4.2 Impacto en la altura de espuma fuera de la zona de *scrapping*

Para este análisis, solo tendremos 3 muestras a estudiar, debido a que la muestra donde se extrae la totalidad de la espuma, no existe zona que no esté siendo removida.

Estos valores debiesen mostrarnos la altura de espuma en forma general, ya que en este sector no estamos en la presencia del *scrapping*, por lo que esa disminución frecuente de la altura no debería observarse en un principio.



En la figura 32, se observa el gráfico de altura en función del tiempo.

Figura 32: Altura de Espuma fuera Zona *scrapping*

Para datos específicos, estos se encontrarán en forma detallada en el ANEXO D.

De la Figura 32 podemos rescatar que la tendencia en la altura de espuma es decreciente a través del tiempo. Es apreciable que se atenúa el efecto sinusoidal presentado en la parte anterior, ya como se menciona anteriormente, no existe *scrapping* en esta zona. El efecto que podemos percibir, parecido al ruido de una onda, es proveniente del colapso de burbujas grandes, que al unirse con otras burbujas y aumentar su tamaño, colapsan, provocando una disminución parcial de la altura máxima de espuma.

En promedio, la altura de espuma es ligeramente superior a la ZS (Zona de *scrapping*), algo esperable teniendo en cuenta que esta zona no es intervenida por el paleteo.

Es importante observar la muestra la cual se extrae el 10% de la espuma y que su descenso en función del tiempo es considerablemente menor comparado a las otras dos.

Esto puede ser explicarlo en parte, a que la cantidad de material que se extrae, es proporcionalmente más pequeña comparada con las otras. Podemos inferir, que mientras mayor volumen de espuma se extraiga, mayor será la disminución de la altura de espuma. Esto puede ser apreciado en esta zona, debido a su estabilidad.

4.4.3 Análisis de Fourier para cinética de altura de espuma.

Para este estudio, observaremos el comportamiento sinusoidal que presentan los gráficos anteriormente mostrados (Figura 31 y 32). Para ello utilizaremos el Análisis de Fourier, que transforma la forma del gráfico en valores complejos, los cuales al calcular su módulo, convierten el gráfico original en una ecuación periódica centrada.

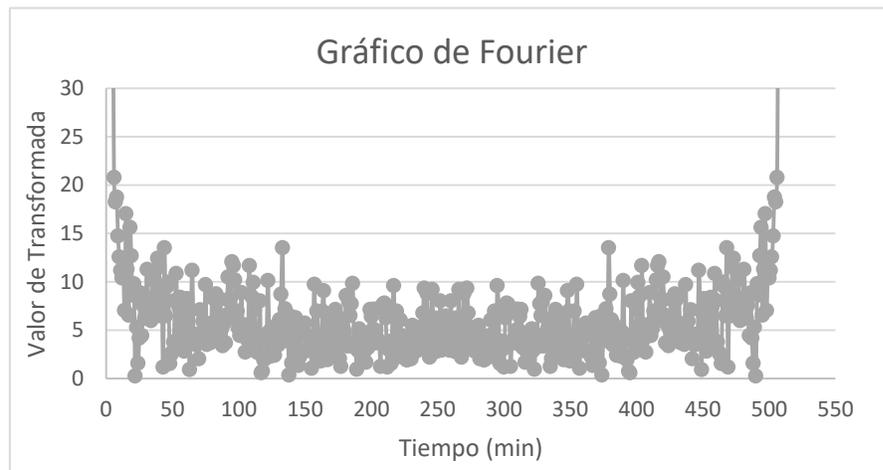


Figura 33: Gráfico análisis de Fourier, 40% remoción de espuma en zona de scrapping

Luego para ajustar los datos a alguna curva, utilizaremos la herramienta *curve fit*, de MATLAB. Con ella seremos capaces de ajustar los datos entregados por el análisis de Fourier y que ajustar las componentes que reduzcan el error con respecto a los datos originales.

En principio, al observar la Figura 33, se aprecia que el ajuste más acertado será una suma de senos. Al ver que en la práctica esto no sucede, se decide por incorporar a MATLAB una ecuación, y que el programa la ajustase. Esta forma esta denotada en Ecuación 14.

$$f(x) = p + a * \sin(w_1 * t + c_1) + a_2 * \sin(w_2 * t + c_2) + a_3 * \sin(w_3 * t + c_3)$$

Con este gráfico, se fuerza a que nos entregue un valor, ya que para este caso tanto la variable p como la variable a , serán entregadas como constantes. La primera de estas variables será el centro de la ecuación sinusoidal, ya que la transformación no entrega valores menores a 0. La segunda entregará será la amplitud de la onda, para que llegue a los puntos altos que se observan en la ecuación original.

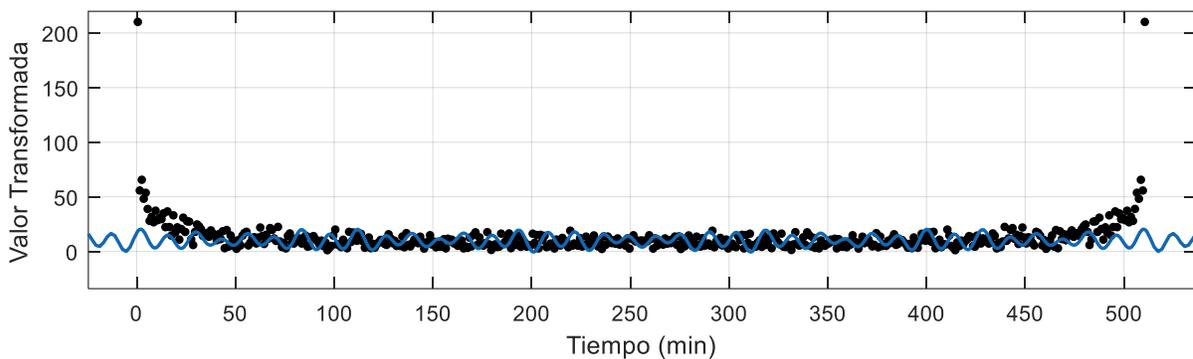


Figura 34: Ajuste de Curva para transformada de Fourier, por curvefit, MATLAB.

En la Figura 34 se aprecia como intenta ajustarse la curva, con ello nosotros pretendemos obtener un acercamiento a la frecuencia. Este valor estará determinado por la variable w_1 de nuestra ecuación de ajuste. Para este caso el período entre nodo fue de 11.919 segundos, pero los valores en general variarán entre los 18 y 6 segundos. Los gráficos y valores se encontrarán en ANEXO D. Al obtener estos valores, entenderemos que la período se disminuye a lo que se tenía pensado, que es cercano a los 20 segundos, esto se debe al peso que tienen las rupturas de burbujas grandes que implican en variaciones importantes de altura de espuma a través del tiempo. Podemos dejar en claro que a pesar de ser un avance y poder tener valores estimativos sobre la frecuencia y período, no son concluyentes, ya que ninguna ecuación estimada pudo acercarse de una manera considerable a los datos originales.

4.5 CAPÍTULO 5: ANÁLISIS ESPECÍFICO DE ARRASTRE

Este capítulo analizará el comportamiento entre el agua y la ganga.

4.5.1 Campaña 1 de Experimentos

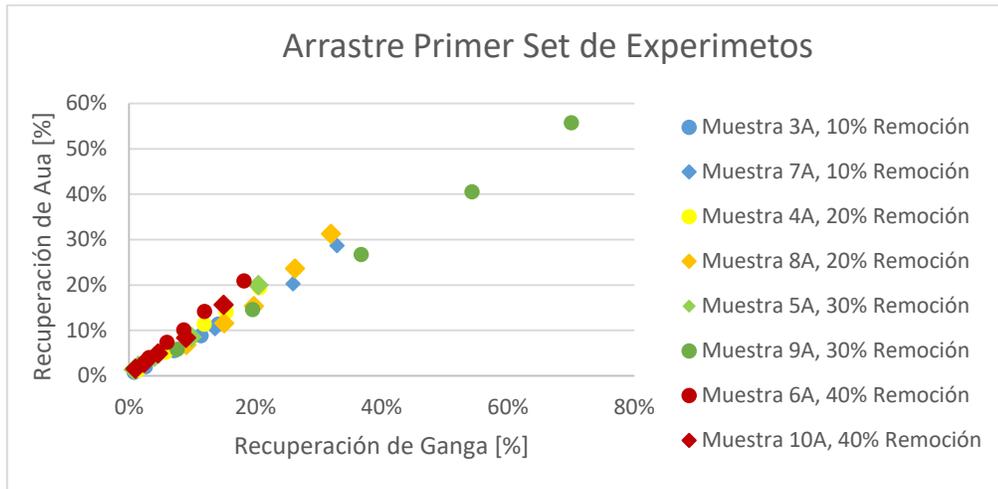


Figura 35: Gráfico de arrastre para Set A experimentos. Mineral +#150-#80, Ganga -#325, Xantato 45 gr/ton; Aerofroth70° 35 gr/ton; Hidróxido de Sodio como Modificado de pH.

En la Figura 35, podemos apreciar la fuerte tendencia lineal que poseen sus datos, como se encuentra en la teoría de arrastre de *Konopacka & Dryzmala (et al 2010)*, nos muestra un arrastre de Tipo 1, el cual presenta una conducta lineal.

Para este gráfico en particular, se calcula el coeficiente de arrastre, el cual se realiza mediante regresión lineal.

$$\varepsilon_s = \varepsilon_w * 1.282$$

Ecuación 16: Ajuste de arrastre para Set A de experimentos

En la ecuación 16, vemos que hay una fuerte tendencia entre el agua y el arrastre reportado en el concentrado, esto se debe particularmente a que el tamaño de partículas de la ganga es bajo, aumentando la probabilidad de arrastre.

4.5.2 Campaña 2 de Experimentos

Esta campaña corresponde a la flotación para tiempos largos.

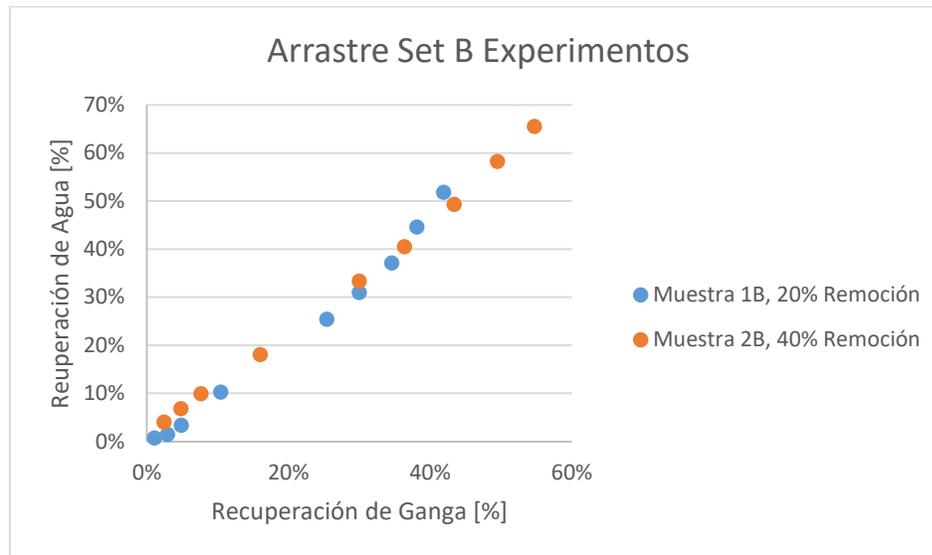


Figura 36: Gráfico Arrastre Set B Experimentos: Mineral + #150-#80, Ganga - #325, Xantato 45 gr/ton; Aerofroth70° 35 gr/ton; Hidróxido de Sodio como Modificado de pH.

En la Figura 36, la tendencia lineal está claramente marcada. Esto concluye en que corresponde al Tipo 1 de los gráficos de Konopacka & Dryzmala.

Considerando esto se realiza la regresión lineal, para conocer el coeficiente de arrastre de este set de experimentos.

$$\varepsilon_s = \varepsilon_w * 0.833$$

Ecuación 17: Ajuste arrastre set B experimentos Mineral + #150-#80, Ganga - #325, Xantato 45 gr/ton; Aerofroth70° 35 gr/ton; Hidróxido de Sodio como Modificado de pH.

Este valor, menor a 1, nos indica que existe una mayor recuperación de agua que de ganga. Posiblemente este efecto se debe a que la recuperación en tiempos mayores, existe una mayor limpieza de la espuma, entregando menor cantidad de ganga.

4.5.3 Campaña 3 de Experimentos

El Set C, o tercera campaña, corresponde al de la cinética específica.

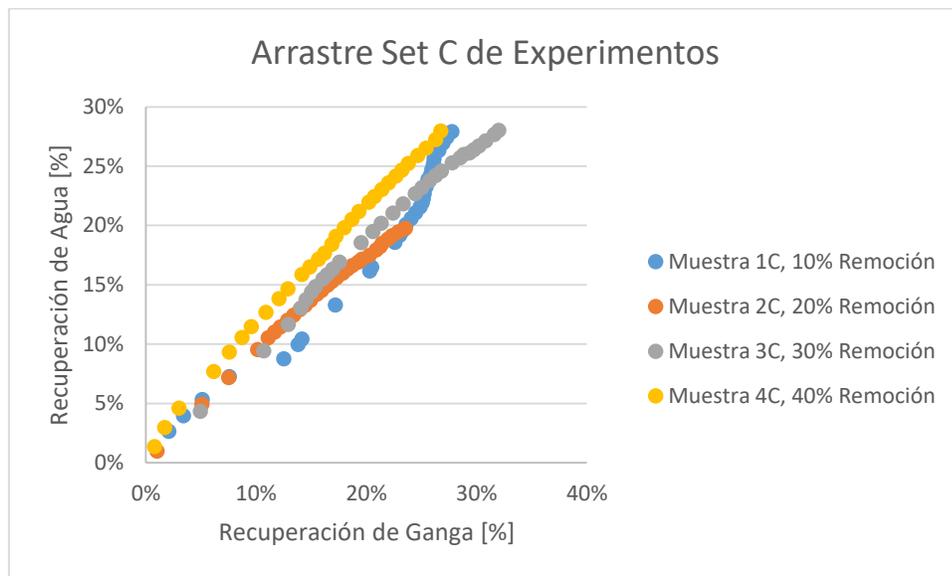


Figura 37: Gráfico Arrastre Set C Experimentos Mineral + #150-#80, Ganga -#325, Xantato 45 gr/ton; Aerofroth70° 35 gr/ton; Hidróxido de Sodio como Modificado de pH.

En la Figura 37, la tendencia lineal se observa de manera intuitiva. Concluyendo así en el Tipo 1 de los gráficos de Konopacka & Dryzmala, el arrastre lineal.

Considerando esto, se realiza la regresión lineal, para conocer el coeficiente de arrastre de este set de experimentos.

$$\varepsilon_s = \varepsilon_w * 1.279$$

Ecuación 18: Ajuste Arrastre Set C Experimentos

El valor, mayor a 1, indica que existe una mayor recuperación de ganga que de agua, lo cual es algo consistente observado en el primer Set A.

4.5.4 Campaña 4 de Experimentos

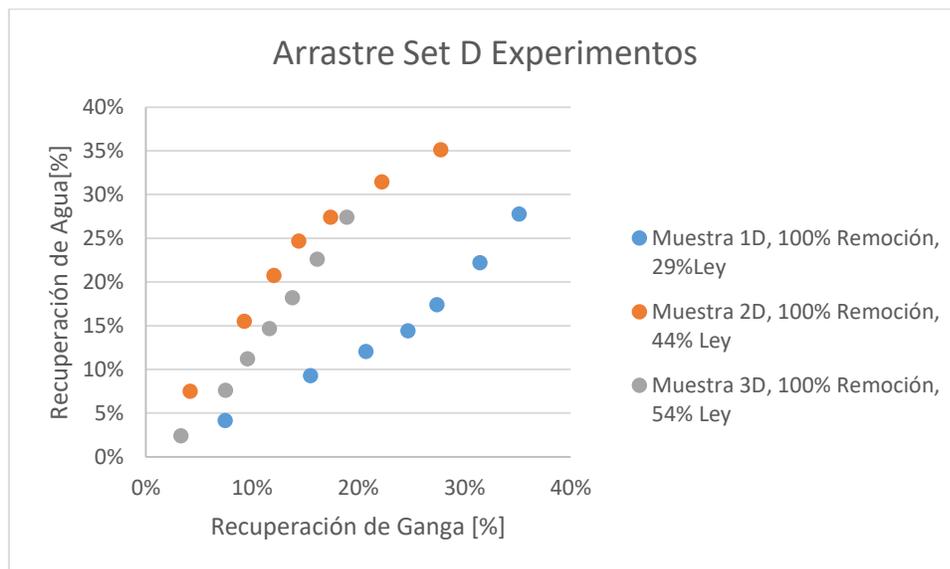


Figura 38: Gráfico arrastre set D Experimentos Mineral + #150-#80, Ganga -#325, Xantato 45 gr/ton; Aerofroth70° 35 gr/ton; Hidróxido de Sodio como Modificado de pH.

En la figura 38 podemos ver que no hay una tendencia clara, para ello se estudia cada uno por separado.

La muestra 1D, presenta una forma parabólica, la cual es del tipo 4 de arrastre, debido a su comportamiento en la fase final de la flotación, donde la recuperación de ganga aumento en forma considerable en comparación a la recuperación de agua.

La muestra 2D, posee levemente una meseta en la fase intermedia de la flotación. Podría asociarse a un Tipo 3 de flotación, que es cuando existen partículas gruesas o recirculación de agua, el cual no fue el caso. Al no ser una tendencia marcada y no presentar argumentos, no podemos obtener una conclusión.

Finalmente, la muestra 3D, posee un comportamiento lineal, asociado al Tipo 1. Para este caso se calculó el ajuste de arrastre, presentado en la ecuación.

$$\varepsilon_s = \varepsilon_w * 0.615$$

Ecuación 19: Ajuste Muestra 3D, Set D Experimentos

La Ecuación 19 muestra un valor mayor que 1, esto implica que existe una mayor cantidad de agua recuperada por sobre ganga, lo cual indica una mayor limpieza por parte de la espuma.

Esto producto de que al existir mayor cantidad de mineral en la celda, la colección de partículas tenderá al mineral por sobre la ganga, logrando así la disminución de ganga en el concentrado.

4.5.5 Comparativa de Resultados

Al podemos ver cada caso por separado, se puede resumir que todos los experimentos posee una tendencia lineal, las excepciones localizadas no son concluyentes para demostrar o explicar algún otro efecto.

La diferencia del Set B de experimentos en cuanto a su coeficiente de arrastre, es explicado por que al recurrir a mayor tiempo de flotación, el nivel de ganga que se mantiene en la espuma, baja considerablemente para tiempos más largos, provocando una limpieza de la espuma y disminuyendo el coeficiente de arrastre.

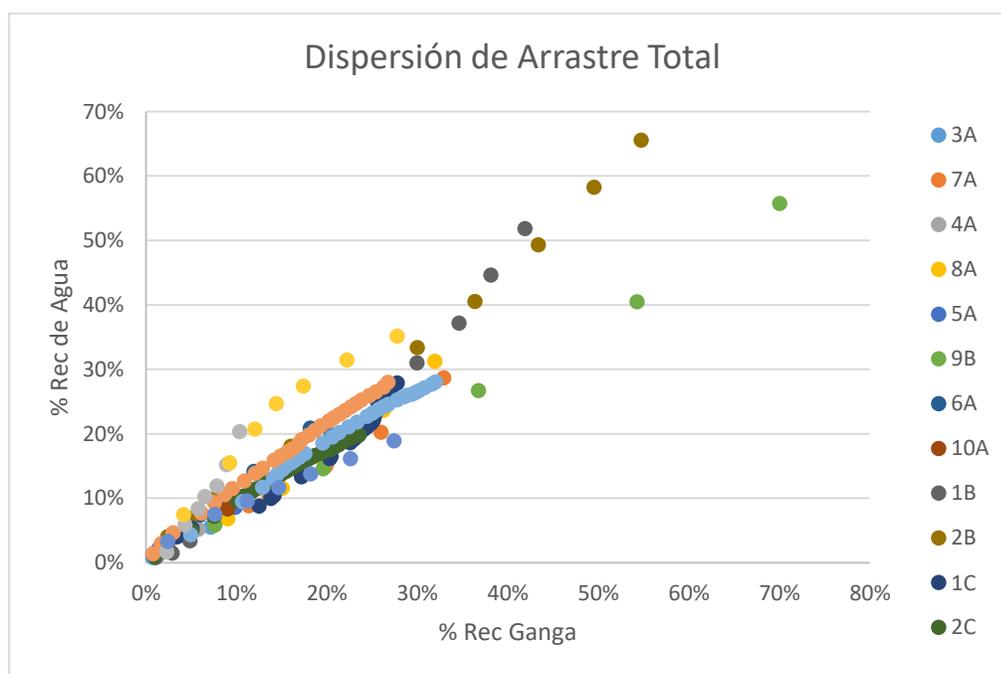


Figura 39: Gráfico de arrastre para todas las muestras Mineral +#150-#80, Ganga -#325, Xantato 45 gr/ton; Aerofroth70° 35 gr/ton; Hidróxido de Sodio como Modificado de pH.

4.6 Análisis y Modelo para calcular la Eficiencia de Espuma

Dentro de los objetivos principales de este estudio de memoria, se encuentra el poder calcular la eficiencia de espuma (R_f).

Para ello en literatura se encuentra una variedad de métodos, la mayoría de estos sin embargo, son para uso industrial (en continuo), y no para laboratorio.

Es por ello que propondremos dos metodologías para calcular la eficiencia de la espuma, con sus teorías, supuestos y analizarlos para observar su comportamiento.

4.6.1 Modelos

Modelo 1

Para entender el Modelo 1, observemos la Figura 40. Se observan las partículas adheridas o en suspensión (gris) en la fase espuma de la celda. Esto ocurre gracias a la colección en la fase pulpa y el traslado de ellas hacia la fase espuma, este fenómeno puede ser logrado por flotación verdadera, *dropback* o arrastre.

Debemos recordar que para este estudio de memoria, uno de los primeros experimentos fue corroborar las condiciones para llegar a una recuperación de pulpa (R_c) cercanas al 100% y estas usarlas para todos los experimentos siguientes.

Al hacer este supuesto, se entenderá que toda partícula de mineral, en algún instante, llego a la zona de recuperación, si esta reportada o no al concentrado, es parte de la eficiencia de espuma.

Al ser una flotación de laboratorio, se asume la velocidad del Impeler, sobre 1000 RPM, que la pulpa se considera homogénea o perfectamente mezclada. Por ello se entiende que para el mismo volumen de espuma en cualquier parte de la celda, se encuentra la misma cantidad de valioso.

Como se aprecia en la Figura 40, la celda se encuentra dividida en pequeños sectores, todos del mismo tamaño.

Utilizando los supuestos, se asevera que cada porción de espuma va a contener su porcentaje de mineral proporcionalmente correspondiente.

Por ejemplo, si agregásemos 200 gramos de mineral a la celda y la dividiésemos en 4 partes iguales. Los supuestos nos aseverarían que cada porción de espuma tendría como máximo 50 gramos de mineral.

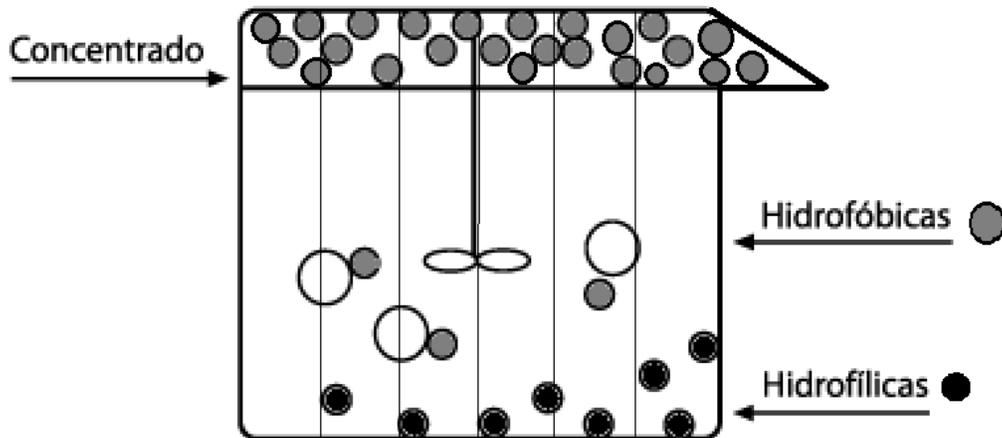


Figura 40: Esquema Celda para Modelo 1

Para estimar la eficiencia de espuma, utilizamos la relación entre la cantidad total de mineral que pasa la interfase sobre el mineral que fue reportado vía flotación verdadera, esto se realiza ajustando las curvas de recuperación según el tipo de arrastre que corresponda en cada caso.

$$R_f = \frac{m_{\text{flotación verdadera}}}{m_{\text{total de valioso}} * a_{\% \text{ área removida}}}$$

Ecuación 20: Estimación de Recuperación de Espuma

En la Ecuación 20 solo se observa que la eficiencia está relacionada con el área de remoción, lo cual hace sentido ya que solo queremos entender cómo funciona la espuma solamente en ese sector de la celda.

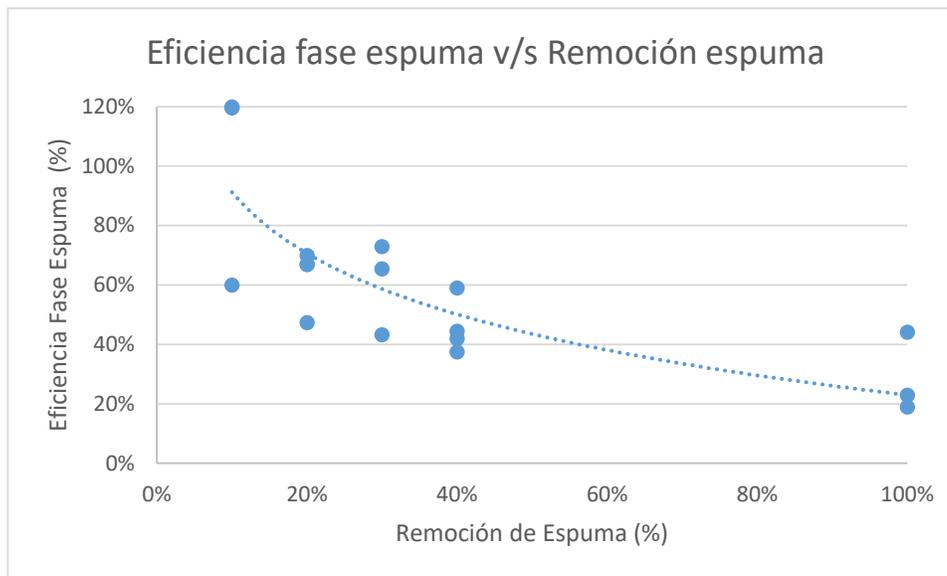


Figura 41: Gráfico Modelo 1 eficiencia de espuma Mineral +#150-#80, Ganga -#325, Xantato 45 gr/ton; Aerofroth70° 35 gr/ton; Hidróxido de Sodio como Modificado de pH.

Podemos observar en la Figura 41 que existe una disminución de la eficiencia de espuma a medida que aumentamos la remoción de esta.

Esto puede producirse ya que esta ecuación no contempla los efectos de estabilidad de espuma y del *dropout*, el cual se acentúa a menor remoción de espuma, provocando que partículas que inicialmente no estaban delimitadas en ese espacio, llegarán al concentrado. Por ello existen valores sobre el 100%, que en principio, físicamente no estaría erróneo.

Sin embargo, la eficiencia de la espuma debiese ser más constante, por lo tanto esta ecuación no es un gran acercamiento a lo experimental.

Modelo 2

Este modelo es una modificación de la Ecuación 1 que se encuentra en literatura, donde se agregarán dos componentes nuevas.

La estimación se basa en la observación que realizó *Zheng* en 2004 (Figura 12), donde asegura descomponer la flotación en dos componentes, una zona de transporte vertical y otra de estancamiento.

La zona de estancamiento es precisamente una zona la cual la dirección del movimiento es en forma vertical provocando que no se desplace al labio y por tanto no sea removida, constituyendo inmediatamente una ineficiencia en el proceso la cual en la Ecuación 1 no se tiene en cuenta.

Un primer supuesto, es que al ser una operación batch de laboratorio a altas velocidades de agitación, hay una pulpa homogénea.

De ellos se puede inferir que la pulpa puede tener una carga definida desde el comienzo que fluye a una porción de la espuma, la cual puede ser o no proporcional.

Es por ello que el cambio que realizaremos será a dos variables:

$$R_{fA} = R_f * A.$$

Ecuación 21: Ajuste variable eficiencia de espuma

La primera será la eficiencia de espuma, la cual se le agregará una componente asociada a la porción que si tiene transporte hacia el labio y por tanto si está concentrando mineral. Hay anteriores estudios (*Arredondo, 2016*), los cuales han intentado poder estimar este valor a escala industrial.

En este caso solo asumiremos A, como la proporción de espuma que estamos removiendo.

$$R_{pB} = R_p * B$$

Ecuación 22: Ajuste Eficiencia de pulpa

Este factor B, es el factor de traspaso de las partículas de la pulpa hacia la zona de espuma, la cual si tienen movimiento horizontal. Este factor dependerá fuertemente de las condiciones de régimen que se encuentre la pulpa.

Este valor por términos de simplicidad en la ejemplificación, lo consideraremos de igual valor que A.

Para ello debemos tener los supuestos mencionados anteriormente.

- Homogeneidad en la zona de Pulpa y Espuma
- El transporte de partículas en la pulpa será solamente en dirección vertical

Con ello, la Ecuación 23, nos entregará la eficiencia de espuma en función de la recuperación de pulpa, los dos factores y la recuperación global del proceso.

$$R_f = \frac{R * (1 - R_p * B)}{A * B * R_p * (1 - R)}$$

Ecuación 23: Ecuación ajustada para eficiencia de espuma 2

Para este caso, se ajustó con los resultados del **Capítulo 4.3.4**, para obtener el valor de B, el cual fue resultado ser de **0.805**.

Ahora en la Figura 42, veremos cómo afecta la distancia de remoción de espuma en R_f .

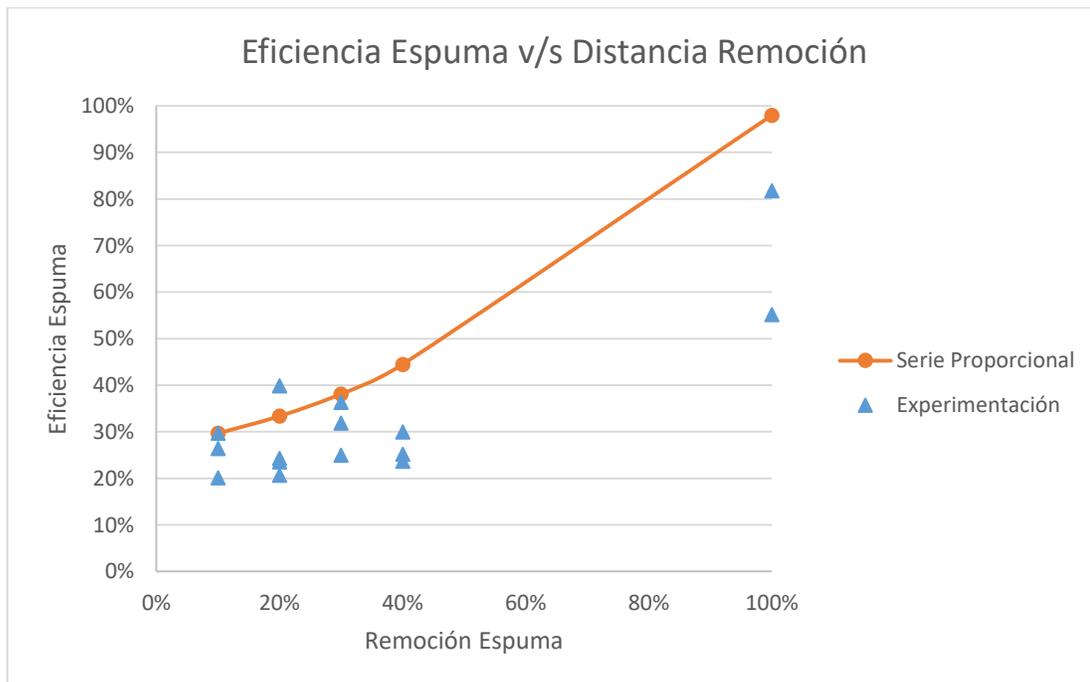


Figura 42: Gráfico Modelo 2 Eficiencia espuma vs Distancia Remoción Mineral + #150-#80, Ganga -#325, Xantato 45 gr/ton; Aerofroth70° 35 gr/ton; Hidróxido de Sodio como Modificado de pH.

Se puede observar en la Figura 42, que existen dos series de datos, la experimental muestra los datos obtenidos en las pruebas y su respectivo R_f .

La serie proporcional es el cálculo con respecto al valor A, nos otorgará la forma normal de cómo se mueve este gráfico a medida que vamos aumentando la distancia de remoción de espuma con grandes recuperaciones. Así podemos inferir que a medida que aumenta la distancia de remoción, aumenta la eficiencia de espuma respectivamente.

Además, esto nos demuestra que a medida que vamos disminuyendo la cantidad de espuma removida, el valor del *dropout*, que se define como $1-R_f$, aumenta.

Sin embargo, podemos ver que el aumento lleva casi al 100% de eficiencia. Sabemos que la eficiencia puede aumentar a medida que también aumenta la cantidad de espuma que se mueve horizontalmente (Valor A), pero no para llegar a esos valores.

Si se puede inferir que esta ecuación es una mejora, pero aún falta un estudio más acabado para perfeccionar estos valores.

V DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

5.1 Discusión

De los resultados obtenidos de los experimentos, podemos decir que en la variedad de las pruebas se obtuvieron resultados congruentes entre sí.

En un principio al remover la totalidad de la espuma, se obtuvieron valores máximos de recuperaciones porcentuales. Además de corroborar la existencia del arrastre, mediante Imaizumi y la relación lineal de esta, por Warren, la que posteriormente fue removida de los gráficos de recuperación.

Al limitar la remoción de espuma se observa que al aumentar la espuma removida, la recuperación final crecía. Luego utilizando estos valores y al estimar el valor máximo de eficiencia de espuma como el porcentaje que se retiraba de la celda, se calculó la recuperación de la fase pulpa, la cual resultó una recuperación creciente y similar entre todos los experimentos. Esto genera seguridad sobre las condiciones iniciales a las cuales fueron sometidas.

Al cambiar la variable del tiempo en el muestreo de datos para los experimentos se observan interesantes datos. Al aumentar el tiempo final de flotación, se observa una disminución considerable de la cantidad de mineral reportado para tiempos tan largos, que va desde los 30 minutos a 1 hora sin muestrear, en cambio el arrastre si fue constante, esto indica el pobre valor de enriquecimiento, que en parte puede ser demostrado por el envejecimiento de la espuma, al no agregar nuevamente los modificadores o da muestras de la dualidad de procesos dentro de una misma flotación. Por su parte, al comparar las recuperaciones de mineral entre los dos experimentos entre los 16 y 180 minutos de flotación, se observa claramente que el experimento el cual su espuma activa (o removida) era menor, tenía una mayor cantidad de mineral concentrado en estos tiempos, inclusive cercano al doble que el otro experimento, que coincidentemente, tenía el doble de área disponible para ser extraída. Dando una muestra que el *dropback* es inversamente proporcional al área de remoción.

El otro experimento donde se cambia el tiempo de muestreo, arroja una situación similar, haciendo un experimento diferente. Aquí al graficar la curva de recuperación vs

índice de enriquecimiento, para cada tiempo, observamos cómo se traslada mientras pasan los minutos de flotación, de un proceso Cleaner a uno Rougher/Scavenger, demostrando así que la eficiencia de espuma mientras pasa el tiempo, tiende a decrecer.

Al variar la ley de mineral, se obtuvo la misma constante de los experimentos anteriores, no obstante, se utilizó un análisis diferente, el cual era estimar el *dropback*, ya que en literatura es el opuesto a la eficiencia de espuma. Para ello se fijaron valores de eficiencia de pulpa, los cuales fueron obtenidos anteriormente y así junto con la recuperación global de mineral, estimar la eficiencia de espuma. Se pudo observar el aumento del *dropback*, o también la disminución de la eficiencia, algo lógico de pensar al existir mayor cantidad de partículas suspendidas en la espuma.

Al medir la altura de espuma, podemos ver que existe una diferencia, no tan importante, pero sí recalable entre la zona de paleteo, correspondiente a la zona activa de espuma y la estancada. Sobre la zona activa podemos inferir que todos poseen una similar altura, en general debido a que al ocurrir una recurrente remoción por parte de la paleta, tienden a tener los mismos valores. En cambio podemos observar una diferencia de altura en la otra medición, mientras menor era la remoción de espuma, mayor sería la altura de espuma remanente, lógico de pensar ya que se le quita menor cantidad de volumen y masa a la celda. Ahora bien, si conectamos estos valores con los anteriores resultados, podríamos decir que a mayor altura de espuma, existe menor eficiencia de espuma y mayor *dropback*, esto también está apoyado por literatura anterior. Ambos pueden ser explicados, a mayor altura de espuma, más le cuesta a la partícula ascender y ser concentrada, solo haciendo que las más hidrófobas puedan ser concentradas realmente, aumentando así el *dropback*. A su vez, varios autores observan como medición de eficiencia de espuma cambiar la altura de espuma, ya que a mayor espuma desciende la recuperación de esta.

Al modelar las eficiencias de espuma, a pesar de no obtener resultados claros, sí tenemos tendencias, entre ellas la más importante, la que apoya los resultados obtenidos, que la eficiencia de espuma a través del tiempo disminuye, llegando a cero a tiempos muy grandes, corroborando lo expuesto en esta memoria.

Más aún, la Ecuación 1, utilizada más comúnmente sobre la eficiencia de un proceso de flotación, asume que el proceso es constante, y al observar, no es así, para ninguno de los factores involucrados en ella. En principio, la eficiencia de espuma es creciente, ya que debe existir un cierto régimen de espuma-partícula y eso no ocurre inmediatamente, por ello existe esa selección por parte de las burbujas de adherirse a las partículas más hidrófobas, provocando que exista una mayor selectividad en los primeros minutos. Esto decae a través del tiempo y es cuando el arrastre y partículas menos hidrófobas asciendan, ya que la mayor cantidad de partículas hidrófobas ya están suspendidas en la espuma. Si exagerásemos este comportamiento, a tiempos grandes, la eficiencia de la pulpa debiese ser cercana al 100%, y que trae como consecuencia, que la ecuación elimina el término de la eficiencia de espuma, concluyendo que la recuperación global es 100%, lo cual carece de sentido experimental, ya que es la eficiencia de la espuma, la que rige al final, cuanto mineral es reportado en el concentrado. En estos experimentos está demostrado, que al flotar una gran cantidad de tiempo, el proceso se vuelva más ineficiente, ya que sale menos mineral, lo cual va en contra de lo que explicaría esta ecuación.

5.2 Conclusiones

Considerando todo lo anteriormente analizado en la discusión, podemos resumir que:

- Para flotaciones de laboratorio de tiempo extendido, la recuperación global final es igual a la recuperación de espuma.
- El material de ganga recuperado por mecanismos de arrastre en el concentrado es proporcional a la recuperación de agua observada.
- El *dropback* (*flujo de material que retorna a la fase pulpa desde la fase espuma*) de material valioso es inversamente proporcional a la fracción superficial de espuma removida en flotación. Esto es, a menor cantidad de espuma removida, mayor es el *dropback*.
- Al aumentar la ley de mineral valioso en la alimentación del experimento de flotación de laboratorio y a mayor profundidad de espuma, se observa que el *dropback* aumenta y la eficiencia de la fase espuma disminuye.
- A mayor ley de mineral de alimentación al experimento de flotación de laboratorio, menor será la recuperación en la fase espuma. Esto se verifica para todos los tiempos del experimento.
- Análisis matemáticos relacionados con expresiones que modelan el balance de masa a través de la interfaz pulpa-espuma, indican que existe una disminución paulatina de la eficiencia de la zona espuma en el tiempo, tendiendo a cero en tiempos extendidos de una flotación de minerales genérica.
- El comportamiento sinusoidal observado en la altura de espuma a través del tiempo en la zona de paleteo está asociado al colapso de burbujas como también de la remoción mecánica. Las frecuencias calculadas estuvieron entre 9 y 26 s, y se acercan a una distribución Normal centrada en los 14 segundos.

- La altura de espuma fuera de la zona de paleteo disminuye linealmente a medida que aumenta la fracción volumétrica de espuma removida. El coeficiente de Poisson fue de -0.48 ± 0.13 , el término negativo indica un comportamiento como material augético, en los cuales se encuentran algunos tipos de espumas, siendo consistente con el resultado.
- Se comprueba la hipótesis en forma parcial. Mientras mayor sea el tiempo de flotación y menor sea el volumen de espuma removida, la eficiencia de la fase espuma disminuye y aumenta el dropback de partículas. Esto ocurre debido a que durante un proceso de flotación batch diferentes condiciones de proceso son evaluadas en la secuencia Cleaner → Rougher → R-Scavenger haciendo que aumente el dropback de partículas debido al aumento gradual de partículas mixtas. Lo anterior se ve agravado por la reducción en el volumen de espuma removido pues reduce la capacidad de pulling de concentrado

VI RECOMENDACIONES

Son tres recomendaciones que propondría para futuros estudios.

- En primer lugar, poder seguir abordando este tema desde otra perspectiva, utilizando diferentes minerales, diferentes capacidades de celda, para poder en un futuro extrapolarlo a la industria.
- Por un tema de tiempo y comprensión del modelamiento, mejorar el método de construcción y ajuste de una ecuación que delimite de mejor forma las eficiencias a través del tiempo que suceden en una flotación.
- Contar con los análisis químicos pertinentes, para lograr así identificar no solamente el mineral valioso si no también cuantificar el elemento de interés. Cambiar la granulometría, algo sumamente importante considerando los efectos del arrastre.

VII BIBLIOGRAFÍA

- Alexander D. J, Franzidis J-P, Manlapig E. V. (2004), Froth recovery measurement in plant scale flotation cells.
- Al-Maghrabi M. N. (2014), Steady State Probabilities of Drop Back Particles in Column Flotation.
- Amelunxen P., Sandoval G., Barriga D., Amelunxen R. (2014), The implications of the froth recovery at the laboratory scale, Aminpro Peru S.A.C.
- Barahona Osorio, F. A. (2007), Influencia de la distribución de tamaño de burbujas en la recuperación de la flotación para minerales de cobre, Tesis para Magister en ciencias de la Ingeniería mención Metalurgia Extractiva, Universidad de Chile, Santiago.
- Bu X., Xie G., Peng Y., Ge L., Ni C. (2016), Kinetics of flotation. Order of Process, rate constant distribution and ultimate recovery.
- Bustamante M., Gaviria A., Restrepo J. (2008), Concentración de Minerales, p 10-18.
- Concha F. (2008), Soli-Liquid Separation in the Mining Industry.
- Dryzmala, J. (2007), Mineral Processing, 1st English Edition, Wroclaw University of Technology, p 269-284, 377.
- Falutsu M., Dobby G.S. (1989), Direct measurement of froth Drop-back and collection zone recovery in a laboratory flotation column.
- Falutsu M., Dobby G.S. (1992), Froth Performance in commercial sized flotation columns.
- Fichera M.A., Chudacek M.W. (1992), Batch cell flotation models- a review, M.D. Research Co.
- Finch J.A., Dobby G. S. (1990), Column Flotation, p 39-47, 75-90.
- Gomez C.O, Finch J. A. (2006), Gas dispersion measurements in flotation cells.
- Imaizumi T., Inoue T. (1963), Kinetic consideration of froth flotation.

- Kaya M., Laplante A.R. (1985), Investigation of Batch and Continuous Flotation Kinetics in a Modified Denver Laboratory Cell.
- Koh P.T.L, Shwarz M.P. (2007), CFD model of a self-aerating flotation cell.
- Konopacka Z., Dryzmala J. (2010), Types of particles recovery. Water recovery entrainment plots useful in flotation research.
- Levenspiel O. (1987), Ingeniería de las Reacciones Químicas, p 9-38.
- Méndez E. G. (2009), Flotación selectiva de enargita desde un concentrado final de sulfuros de cobre de Collahuasi, Tesis para Magister en ciencias de la Ingeniería mención Metalurgia Extractiva, Universidad de Chile, 2009.
- Nguyen A. V., Ralston J., Shulze H. J. (1998), On modelling of bubble-particle attachment probability in flotation.
- Moys M.H. (1989), Mass Transport in Flotation Froths.
- Rahman R. M, Ata S., Jameson G. J.(2013), Froth recovery measurements in an industrial flotation cell.
- Rahman R. M, Ata S., Jameson G. J. (2015), Study of froth behavior in a controlled plant environment.
- Rahman R. M, Ata S., Jameson G. J. (2014), Development of a froth dropback measurement device.
- Ralston J., Fornasiero D., Hayes R. (1999), Bubble-Particle attachment and detachment in flotation.
- Rojas I., Vinnett L., Yianatos J., Iriarte V. (2014), Froth transport characterization in a two-dimensional flotation cell.
- Runge K., Crosbie R, Rivett T., McMaster J. (2010), An evaluation of Froth Recovery Measurements Techniques, XXV International Mineral Processing Congress. Brisbane, Australia.
- Saavedra Y., Ata S. (2016), On the detachment of hydrophobic particles from the froth phase.
- Schuhmann Jr R. (1942), Methods for steady-state Study of Flotation Problems.
- Smith P.G., Warren L.J. (1989), Entrainment of particles into flotation froths.

- Sutherland D.N. (1989), Batch flotation Behavior of Composite Particles.
- Sutherland K. L., Wark I. W. (1955), Principles of flotation.
- Tucker J.P, Deglon D.A, Franzidis J-P, Harris M.C. , O'Connor C.T. (1994), An evaluation of a direct method of bubble size distribution measurement in a laboratory batch flotation cell
- Vera M.A., Franzidis J.P, Manlapig E.V. (1999), Simultaneous determination of collection zone rate constant and froth zone recovery in a mechanical flotation environment.
- Vera M.A., Mathe Z.T, Franzidis J-P, Harris M.C., Manlapig E.V., O'Connor C.T.(2002), The modelling of froth zone recovery in batch and continuously operated laboratory flotation cells.
- Vos C. F., Stange W., Bradshaw D. J. (2014), A new small-scale test to determine flotation performance.
- Warren L. J. (1985), Determination of the contributions of true flotation and entrainment in batch flotation test.
- Wiese J., Harris P., Bradshaw D. (2011), The effect of the reagent suite on froth stability in laboratory scale batch flotation test, Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre (JKMRC).
- Wood R. F., Dick R. I. (2015), Factors influencing batch flotation test, Water Environment federation.
- Yianatos J. B., Moys M. H., Contreras F., Villanueva A. (2007), Froth recovery of industrial flotation cells.
- Yu S., Finch J.A. (1990), Froth Zone recovery in a flotation column.
- Zheng X., Franzidis J-P, Manlapig E. (2003), Modelling of froth transportation in industrial flotation cells. Development of froth transportation models for attached particles.

ANEXOS

ANEXO A: Protocolo de flotación

Durante las pruebas de flotaciones se siguieron los siguientes pasos:

1. Calibrar el medidor de pH, el cual se realiza diariamente. Se utilizan buffer pH 4, 7 y 11. Este procedimiento es estándar.
2. Pesar las bandejas donde se vaciará el concentrado y con su rotulado para las mediciones posteriores de cinética.
3. Colocar el tope de paleteo según el experimento que corresponda (1, 2, 3 o 4 cm). Para ello se utiliza una lámina de acrílico la cual es colocada en posición paralela al labio de la celda, asegurando así que el paleteo, el cual se realiza de forma manual, sea solo en el área limitada entre la lámina y el labio.
4. Encender la máquina, y revisar que los parámetros de velocidad de rotación y tiempos de flotación estén de acuerdo a lo escogido.
5. Colocar en la celda de flotación, el concentrado y la ganga correspondiente al experimento. Es conveniente agregar gradualmente el concentrado a la celda agitada a las rpm de prueba
6. Una vez que esté bien agitado medir el pH natural y agregar el regulador de pH correspondiente para llegar al pH de operación.
7. Una vez alcanzado el pH, retirar los sensores correspondientes y agregar los reactivos (colector y espumante). Realizado esto, se procede a comenzar el conteo del tiempo de acondicionamiento (2 min). Asegurar de tener en posición la bandeja para recoger el concentrado y con la numeración correspondiente.
8. Terminado el tiempo de acondicionamiento de 2 min, la máquina automáticamente ingresa aire mediante el impeler, el cual está

calculado previamente por el rotámetro de la misma máquina. Si es necesario, agregar agua con el mismo pH de la pulpa, de manera de alcanzar el nivel adecuado, siempre y cuando cuidando que no se produzca un rebalse de la espuma mineralizada, ya que solo debe ser retirada por el paleteo.

9. Durante el transcurso de la flotación, el retiro de la espuma mineralizada debe ser apoyado por un paleteo metódico. Se mantiene una frecuencia de paleteo, el cual es de 20 segundos, durante toda la prueba de flotación. La remoción de espuma se lleva a cabo de modo manual, para lo cual se utiliza una paleta que permite retirar la totalidad de la espuma.
10. Para hacer el estudio de la cinética de flotación, se cambian las bandejas de flotación según tiempos fijos, los cuales son de 0-1 min, 1-2 min, 2-4 min, 4-8 min y 8-16. Para ello se deben tener las bandejas, para intercambiarlas rápidamente para evitar así derrames indeseados.
11. Terminado el tiempo de flotación, limpiar adecuadamente el equipo para el próximo experimento.
12. Pesar las bandejas con la espuma mineralizada recuperada.
13. Secar las bandejas en un horno a una temperatura entre 80°-100° durante 24 horas.
14. Transcurrido este tiempo, pesar las bandejas con el material seco.
15. Luego de pesarlos, depositar cuidadosamente el material con una brocha en un set de tamices previamente pesados y colocarlos durante 20 min en el tamizador de laboratorio Ro-Tap.

16. Al finalizar el tamizaje, pesar cada tamiz para obtener la cantidad de mineral y de ganga que fue recuperada.

ANEXO B: Muestras

Aquí se presentan todas las muestras utilizadas durante el estudio de memoria y en qué campaña fueron utilizadas y analizadas. Todas estas muestras según el momento en el que fueron muestreadas se les realiza el posterior análisis de errores para identificar que estas no superen el 5% de diferencia entre ellas y su promedio.

Muestra	Mineral	Ganga	Campaña
1A	49.9	296.9	0 y D
2A	50.1	297.3	0
3A	50	297.4	A
4A	50.1	297.8	A
5A	50.1	297.5	A
6A	50.0	297.8	A
7A	50.2	297	A
8A	49.8	298	A
9A	50.1	297.6	A
10A	49.8	297.4	A
1B	65.2	297.2	B
2B	64.4	301	B
1C	64.1	299	C
2C	63.7	296	C
3C	66	298	C
4C	65.5	297	C
1D	100.1	248	D
2D	151	202.3	D
3D	199.8	152	D

En la Tabla, se adjuntan las muestras utilizadas y que remoción de espuma se utilizó para cada caso.

Muestras	Área de Remoción de Espuma
3A	10%
4A	20%
5A	30%
6A	40%
7A	10%
8A	20%
9A	30%
10A	40%

ANEXO C: Resultados Metalúrgicos

En este apartado, se incluirán las tablas de recuperación para todas las muestras, incluyendo recuperación másica y porcentual tanto de mineral como de ganga

Muestra 1A	Tiempo (min)	Rec de mineral (%)	Rec de Mineral s/n Arrastre (%)	Rec de Ganga (%)
	1	29.8	28.775	2%
	2	40.2	38.15	3%
	4	44	39.9	5%
	8	67.2	59	8%
	16	75.4	59.1	10%

Muestra 2A	Tiempo (min)	Rec de mineral (%)	Rec de Mineral s/n Arrastre (%)	Rec de Ganga (%)
	1	29	27.55	1%
	2	36	33.1	3%
	4	42.2	36.4	5%
	8	55.8	44.2	6%
	16	67.4	44.3	8%

Muestra 3A	Tiempo (min)	Rec de mineral (%)	Rec de Mineral s/n Arrastre (%)	Rec de Ganga (%)	Rec de Agua (%)
	1	0.8	0.25	0.79	0.78
	2	1.2	1	1.2	1.1
	4	3	0.8	2.55	1.99
	8	7.8	3.4	7.1	5.5
	16	12.2	3.5	11.3	11.3

Muestra 4A	Tiempo (min)	Rec de mineral (%)	Rec de Mineral s/n Arrastre (%)	Rec de Ganga (%)	Rec de Agua (%)
	1	2	1.725	1.4	1.2
	2	4.4	3.85	5.7	5.1
	4	8.8	7.7	11.8	11.3
	8	12.8	10.6	15.3	14
	16	15	10.7	20.6	19

Muestra 5A	Tiempo (min)	Rec de mineral (%)	Rec de Mineral s/n Arrastre (%)	Rec de Ganga (%)	Rec de Agua (%)
	1	5	4.125	0.75	1.3
	2	9	7.25	1.4	2.2
	4	13.4	9.9	4	4.2
	8	19.4	12.4	9.8	8.6
	16	16.4	12.5	20.4	19.9

Muestra 6A	Tiempo (min)	Rec de mineral (%)	Rec de Mineral s/n Arrastre (%)	Rec de Ganga (%)	Rec de Agua (%)
	1	6	5.225	3.13	4
	2	9.2	7.65	6	7.4
	4	14.4	11.3	8.65	10.13
	8	21.2	15	11.7	14.17
	16	27.4	15.1	18.1	20.9

Muestra 7A	Tiempo (min)	Rec de mineral (%)	Rec de Mineral s/n Arrastre (%)	Rec de Ganga (%)	Rec de Agua (%)
	1	2.6	2.325	11.3	8.85
	2	4	3.45	13.5	10.38
	4	7.6	6.5	19	14.98
	8	10.8	8.6	25.9	20.23
	16	13	8.6	32.8	28.67

Muestra 8A	Tiempo (min)	Rec de mineral (%)	Rec de Mineral s/n Arrastre (%)	Rec de Ganga (%)	Rec de Agua (%)
	1	4	3.725	9	6.8
	2	7	6.45	15	11.56
	4	9.8	8.7	19.7	15.39
	8	13.2	11	26.2	23.6
	16	15.4	11.1	31.9	31.2

Muestra 9A	Tiempo (min)	Rec de mineral (%)	Rec de Mineral s/n Arrastre (%)	Rec de Ganga (%)	Rec de Agua (%)
	1	4	3.075	7.5	5.8
	2	7.8	5.95	19.5	14.57
	4	12.8	9.1	36.7	26.71
	8	21.6	14.2	54.2	40.5
	16	29	14.3	70	55.7

Muestra 10A	Tiempo (min)	Rec de mineral (%)	Rec de Mineral s/n Arrastre (%)	Rec de Ganga (%)	Rec de Agua (%)
	1	7.6	7	1%	2%
	2	12.2	11	2%	3%
	4	16.4	14	5%	5%
	8	22.6	17.8	9%	8%
	16	27.4	17.9	15%	16%

Muestra 1B	Tiempo (min)	Rec de mineral (%)	Rec de Mineral s/n Arrastre (%)	Rec de Ganga (%)	Rec de Agua (%)
	1	5%	4%	1%	1%
	2	7%	6%	3%	1%
	4	9%	8%	5%	3%
	8	11%	8%	10%	10%
	16	15%	9%	25%	25%
	30	17%	11%	30%	31%
	60	19%	13%	35%	37%
	120	21%	14%	38%	45%
	180	23%	14.1%	42%	52%

Muestra 2B	Tiempo (min)	Rec de mineral (%)	Rec de Mineral s/n Arrastre (%)	Rec de Ganga (%)	Rec de Agua (%)
	1	5%	4%	2%	4%
	2	9%	7%	5%	7%
	4	12%	10%	8%	10%
	8	17%	12%	16%	18%
	16	24%	14%	30%	33%
	30	26%	15%	36%	41%
	60	27%	16%	43%	49%
	120	29%	17%	50%	58%
	180	31%	17%	55%	66%

Muestra 1C	Tiempo (min)	Rec de mineral (%)	Rec de Mineral s/n Arrastre (%)	Rec de Ganga (%)	Rec de Agua (%)
	0.5	0.9%	0.8%	2.1%	3%
	1	1.8%	1.5%	3.4%	4%
	1.5	2.5%	2.0%	5.1%	5%
	2	3.2%	2.6%	7.6%	7%
	2.5	3.7%	2.9%	12.5%	9%
	3	4.1%	3.2%	13.8%	10%
	3.5	4.4%	3.4%	14.1%	10%
	4	4.8%	3.5%	17.2%	13%
	4.5	5.2%	3.8%	20.3%	16%
	5	5.5%	4.0%	20.5%	17%
	5.5	6.1%	4.4%	22.6%	19%
	6	6.6%	4.8%	23.0%	19%
	6.5	7.1%	5.1%	23.3%	20%
	7	7.7%	5.5%	23.6%	20%
	7.5	8.1%	5.8%	24.0%	21%
	8	8.3%	5.8%	24.5%	21%
	8.5	8.6%	6.0%	24.9%	22%
	9	8.9%	6.1%	25.0%	22%
	9.5	9.2%	6.3%	25.1%	22%
	10	9.4%	6.3%	25.2%	23%
	10.5	9.7%	6.4%	25.4%	23%
	11	10.0%	6.6%	25.6%	24%
	11.5	10.3%	6.7%	25.8%	24%
	12	10.4%	6.7%	25.9%	25%
	12.5	10.6%	6.7%	26.1%	25%
	13	10.9%	6.9%	26.1%	26%
	13.5	11.2%	7.1%	26.5%	26%
	14	11.5%	7.2%	26.9%	27%
	14.5	11.8%	7.4%	27.3%	27%
	15	12.0%	7.4%	27.8%	28%

Muestra 2C	Tiempo (min)	Rec de mineral (%)	Rec de Mineral s/n Arrastre (%)	Rec de Ganga (%)	Rec de Agua (%)
	0.5	1.4%	1.2%	1.0%	1.0%
	1	3.1%	2.8%	5.1%	4.9%
	1.5	4.2%	3.7%	7.5%	7.2%
	2	5.1%	4.5%	10.1%	9.6%
	2.5	5.8%	5.1%	11.1%	10.5%
	3	6.3%	5.4%	11.7%	11.0%
	3.5	6.8%	5.7%	12.2%	11.5%
	4	7.1%	5.8%	12.9%	12.0%
	4.5	7.4%	6.0%	13.4%	12.4%
	5	7.7%	6.2%	14.0%	12.9%
	5.5	8.2%	6.5%	14.4%	13.3%
	6	8.5%	6.6%	14.9%	13.7%
	6.5	8.9%	6.9%	15.5%	14.2%
	7	9.4%	7.2%	15.9%	14.5%
	7.5	9.7%	7.4%	16.5%	15.0%
	8	10.2%	7.7%	16.8%	15.3%
	8.5	10.5%	7.8%	17.3%	15.6%
	9	10.8%	8.0%	17.8%	16.0%
	9.5	11.1%	8.2%	18.3%	16.3%
	10	11.4%	8.3%	18.7%	16.6%
	10.5	11.5%	8.3%	19.2%	16.9%
	11	11.8%	8.5%	19.6%	17.2%
	11.5	12.0%	8.5%	20.3%	17.5%
	12	12.3%	8.6%	20.9%	18.0%
	12.5	12.5%	8.6%	21.3%	18.3%
	13	12.8%	8.8%	21.4%	18.5%
	13.5	12.9%	8.8%	21.9%	18.9%
	14	13.1%	8.8%	22.3%	19.2%
	14.5	13.2%	8.8%	22.9%	19.5%
	15	13.4%	8.9%	23.5%	19.8%

Muestra 3C	Tiempo (min)	Rec de mineral (%)	Rec de Mineral s/n Arrastre (%)	Rec de Ganga (%)	Rec de Agua (%)
	0.5	3.0%	2.8%	4.9%	4.4%
	1	5.7%	5.4%	10.7%	9.5%
	1.5	7.5%	7.0%	12.9%	11.7%
	2	9.4%	8.8%	14.1%	13.1%
	2.5	11.1%	10.3%	14.5%	13.8%
	3	12.4%	11.5%	15.0%	14.4%
	3.5	13.6%	12.6%	15.4%	14.9%
	4	14.5%	13.3%	16.1%	15.5%
	4.5	15.1%	13.8%	16.4%	15.9%
	5	15.7%	14.2%	16.9%	16.3%
	5.5	16.2%	14.5%	17.6%	16.9%
	6	16.6%	14.8%	19.5%	18.6%
	6.5	17.1%	15.1%	20.6%	19.5%
	7	17.5%	15.4%	21.3%	20.2%
	7.5	18.0%	15.7%	22.4%	21.1%
	8	18.3%	15.9%	23.3%	21.8%
	8.5	18.6%	16.0%	24.4%	22.7%
	9	18.9%	16.2%	25.0%	23.2%
	9.5	19.2%	16.3%	25.7%	23.8%
	10	19.5%	16.5%	26.3%	24.2%
	10.5	19.8%	16.6%	26.8%	24.6%
	11	20.1%	16.8%	27.8%	25.3%
	11.5	20.4%	16.9%	28.5%	25.7%
	12	20.7%	17.1%	28.8%	26.0%
	12.5	20.8%	17.1%	29.3%	26.1%
	13	21.1%	17.2%	29.7%	26.4%
	13.5	21.3%	17.2%	30.2%	26.7%
	14	21.4%	17.2%	30.8%	27.1%
	14.5	21.6%	17.2%	31.6%	27.7%
	15	21.9%	17.3%	32.0%	28.0%

Muestra 4C	Tiempo (min)	Rec de mineral (%)	Rec de Mineral s/n Arrastre (%)	Rec de Ganga (%)	Rec de Agua (%)
	0.5	4.4%	4.2%	0.8%	1.4%
	1	8.9%	8.6%	1.7%	3.0%
	1.5	12.1%	11.6%	3.0%	4.6%
	2	14.6%	14.0%	6.1%	7.7%
	2.5	16.6%	15.9%	7.6%	9.3%
	3	18.1%	17.1%	8.7%	10.6%
	3.5	19.0%	17.9%	9.6%	11.5%
	4	19.8%	18.5%	10.9%	12.7%
	4.5	20.4%	19.0%	12.1%	13.9%
	5	20.9%	19.3%	12.9%	14.7%
	5.5	21.2%	19.5%	14.1%	15.9%
	6	21.5%	19.6%	14.9%	16.5%
	6.5	21.8%	19.8%	15.6%	17.2%
	7	22.1%	19.9%	16.2%	17.7%
	7.5	22.4%	20.1%	16.9%	18.4%
	8	22.8%	20.3%	17.2%	19.1%
	8.5	23.1%	20.4%	18.0%	19.8%
	9	23.4%	20.6%	18.7%	20.5%
	9.5	23.7%	20.7%	19.3%	21.2%
	10	24.0%	20.9%	20.2%	22.0%
	10.5	24.2%	20.9%	20.7%	22.5%
	11	24.3%	20.9%	21.4%	23.0%
	11.5	24.5%	20.9%	22.0%	23.6%
	12	24.6%	20.9%	22.7%	24.2%
	12.5	25.0%	21.0%	23.2%	24.7%
	13	25.1%	21.0%	23.8%	25.2%
	13.5	25.4%	21.2%	24.7%	25.9%
	14	25.6%	21.2%	25.4%	26.5%
	14.5	25.9%	21.4%	26.3%	27.3%
	15	26.2%	21.5%	26.7%	28.0%

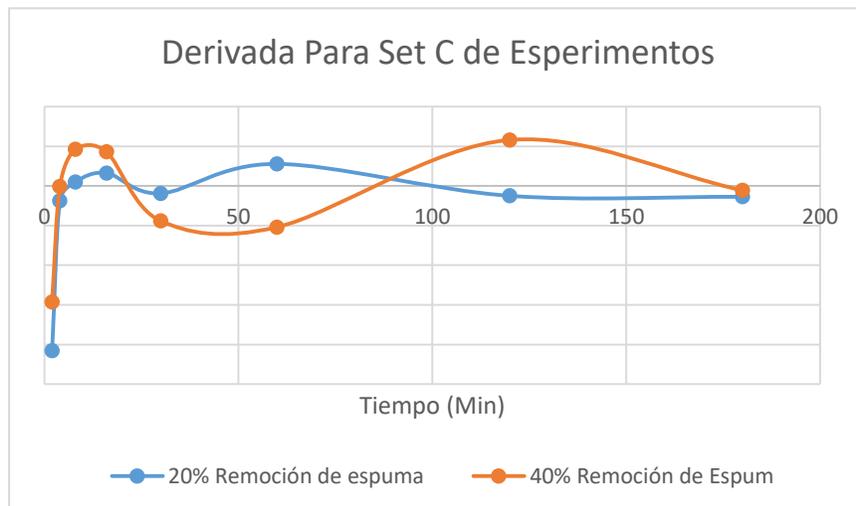
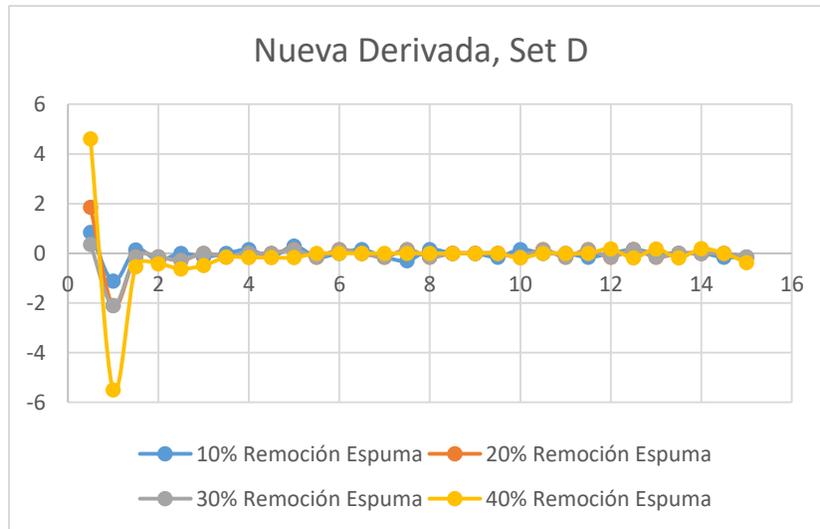
Muestra 1D	Tiempo (min)	Rec de mineral (%)	Rec de Mineral s/n Arrastre (%)	Rec de Ganga (%)	Rec de Agua (%)
	0.5	8%	8%	2%	2%
	1.5	18%	16%	4%	6%
	3	23%	19%	6%	8%
	5	29%	21%	7%	10%
	7.5	35%	23%	8%	12%
	10.5	40%	23%	9%	15%
	14.5	46%	23%	10%	20%

Muestra 2D	Tiempo (min)	Rec de mineral (%)	Rec de Mineral s/n Arrastre (%)	Rec de Ganga (%)	Rec de Agua (%)
	0.5	6%	6%	4%	7%
	1.5	13%	11%	9%	16%
	3	18%	14%	12%	21%
	5	22%	16%	14%	25%
	7.5	27%	18%	17%	27%
	10.5	32%	19%	22%	31%
	14.5	36%	19%	28%	35%

Muestra 3D	Tiempo (min)	Rec de mineral (%)	Rec de Mineral s/n Arrastre (%)	Rec de Ganga (%)	Rec de Agua (%)
	0.5	7%	6%	2%	3%
	1.5	13%	11%	8%	7%
	3	17%	14%	11%	10%
	5	21%	16%	15%	12%
	7.5	26%	18%	18%	14%
	10.5	29%	19%	23%	16%
	14.5	33%	19%	27%	19%

Resultados Derivada Nueva

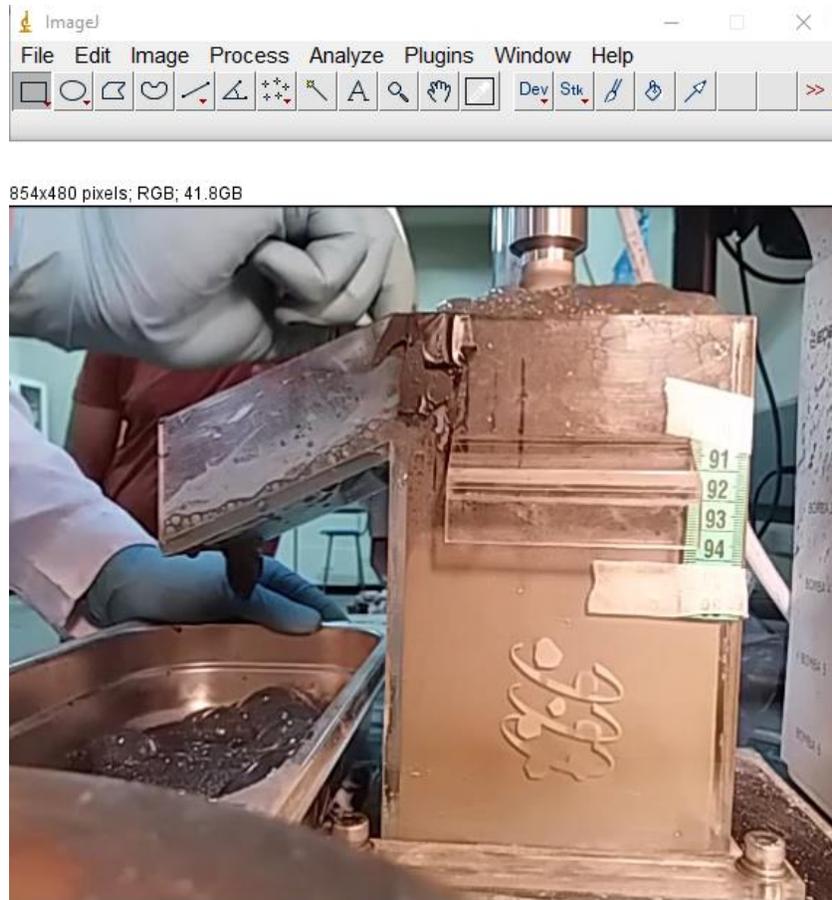
Aquí se entregarán los resultados correspondientes a las gráficas de la derivada nueva, informada en anteriormente en el cuerpo de la memoria. El análisis comprendido ya está hecho de manera previa.



ANEXO D: Mediciones Altura de Espuma

Como se explica en la parte de análisis, al grabar los videos en una cámara digital, el procedimiento para poder separar las imágenes y poder medirlas fue el siguiente:

- Corroborar que el video estuviese siempre a 30 FPS
- Convertirlo en Formato AVI



Al poder abrir los videos, se debe configurar mediante una cinta de medir, la cantidad de pixeles que corresponden a un centímetro, para normalizar todos los datos. 20 Pixeles corresponde a 1 Centímetro.

Finalmente los valores fueron los siguientes para cada muestra:

Seg/Muestra	Cm ZNS 10%	Cm 25% ZNS	Cm 40% ZNS	Cm 10% ZS	Cm 25% ZS	Cm 40% ZS	Cm 100% ZS
1	2.5	3	2.45	3.35	2.4	3.5	2.65
2	3.2	3.6	3.55	3.75	3.35	4.3	3.4
3	4.4	4.35	3.9	4.3	3.75	5	4.15
4	5.25	5.9	5.1	5.7	5.5	6.6	6
5	5.85	6.8	5.65	6.45	6.45	6.9	6.75
6	6.55	7.15	6.4	7.2	6.8	6.25	6.85
7	7.3	8.75	6.85	7.75	7	6.4	7.45
8	7.7	8.5	7.5	7.95	6.55	6.2	7.25
9	8.35	8.85	7.4	7.45	6.75	6.25	7.25
10	8.15	9.2	7.55	8	6.45	6.05	7.6
11	9.6	8.65	7.45	6.9	6.4	6.25	7.55
12	9.4	8.9	7.5	7.65	6.45	6.1	7.6
13	9	8.8	7.7	7.5	6.4	6.05	7.7
14	9.55	9.35	7.55	7.95	6.75	6.25	7.45
15	9.55	8.9	7.6	8.5	6.65	6.35	6.95
16	8.95	9.2	8.2	8.3	7.2	6.4	7.05
17	9.25	8.95	8.1	7.35	6.7	6.35	6.95
18	8.8	8.55	8.2	7.55	7.05	6.2	6.85
19	9	8.85	7.65	7.35	6.75	6.4	7
20	9.1	8.75	8.25	8.45	6.5	6.4	7.15
21	9.5	8.55	7.65	7.85	6.75	6.4	7.45
22	9.75	9.05	7.7	8.05	6.95	6.3	6.9
23	9.05	8.85	8.15	7.35	6.5	6.35	7.45
24	9.6	9	8.1	7.2	6.6	6.35	7.05
25	9.1	8.8	7.95	8.25	6.6	6.3	6.85
26	9.7	9.2	7.95	7.35	7.25	6.35	6.9
27	9.35	8.85	8.1	7.85	7.05	6.35	7.3
28	9.4	9.1	8.15	7.35	6.65	6.3	6.85
29	8.75	8.95	8.4	8.45	7.05	6.45	6.8
30	9.3	8.95	8.25	8.15	7	6.65	6
31	9.1	9.4	7.7	8.05	6.55	6.45	6.9
32	9.55	8.85	8.45	8	7.05	6	6.75
33	9	9.3	7.9	7.6	6.95	6.05	7
34	9.7	9.6	8.15	8.45	6.85	6.15	7.35
35	8.9	8.85	8.35	8.25	7.2	6.85	6.75
36	9.2	9.5	8.1	8.35	6.8	6.65	6.8
37	9.3	9.25	8.1	7.5	7.05	6.85	7.4
38	9.15	8.95	8.2	7	6.55	6.5	7.5
39	9.5	9.55	8.4	7.35	6.4	6.7	7.35

40	9.05	9.15	8.05	7.45	6.9	6.15	7.15
41	9.7	8.55	8.45	7.7	6.95	7	7.45
42	9.35	9.35	8.4	7.25	6.65	6.65	7.55
43	8.85	9.3	8.45	8.2	6.75	6.25	7.25
44	9.5	8.9	8.35	7.65	6.8	6.45	7.15
45	9.65	9.45	7.8	7.6	7.25	6.95	7.6
46	8.9	9.55	8.3	7.6	7.1	6.8	7.35
47	8.9	9.7	8.2	7.75	6.55	6.45	7.45
48	9	8.9	8.15	8.3	6.85	6.3	7.6
49	9.35	9.3	7.9	7.95	6.55	6.25	7.2
50	8.9	9.55	8.1	8.5	7	6.4	7.55
51	9.55	9.5	7.95	7.15	6.6	6.55	7.35
52	9.7	9.65	7.85	7.25	6.9	6.2	7.35
53	9.7	9.7	8.35	7.55	6.95	6.25	6.75
54	9.45	9.25	8.45	8.45	6.8	6.45	7.5
55	9.75	9.4	8.35	7	7.2	6.65	7.4
56	9.65	8.55	8.1	7	7.15	6.3	7.7
57	9.15	9	8	7.85	7.15	6.25	7.45
58	8.8	9.05	8.4	8.45	6.8	6.6	7.6
59	9.75	9.25	8.35	7.7	6.5	6.5	7.45
60	9.7	8.4	8	7.4	6.45	6.15	6.8
61	8.95	8.8	7.95	7.3	6.4	6.5	6.85
62	9.6	9.2	8	7.85	6.45	6.65	5.9
63	8.95	8.95	7.95	8.5	6.6	6.65	6.4
64	9.65	8.9	7.85	8.4	6.9	6.7	7.4
65	9.25	9	8	8.15	6.6	6.2	7.5
66	9.45	8.95	8.55	7	6.85	6.3	7.3
67	8.8	9.1	8.25	7.5	6.55	6.5	7.5
68	9.3	9.1	8.1	8.4	6.65	6.5	7.6
69	8.8	9.25	8.3	8.4	6.75	6.7	6.75
70	8.85	9.4	8.3	7.05	6.55	6.5	7.15
71	9.25	9.45	8.45	8.45	6.5	6.35	7.65
72	9.15	8.4	8.15	7.15	6.95	6.5	7.45
73	9.35	8.95	8.55	7.25	6.7	6.7	7.2
74	9.4	9.65	8	8.25	6.8	6.2	7.05
75	8.75	9.3	8.35	7.35	6.55	6.45	7
76	9.3	8.8	8.35	7.55	7.05	6.65	7.15
77	9.2	9	8.55	8.2	6.55	6.2	7.05
78	9.5	9.05	8.45	7.7	7.2	6.45	7.35
79	8.8	9.3	7.75	8.15	6.55	6.3	7.15
80	9.25	9.55	8.05	7.65	6.9	6.4	7.3

81	9	9.65	7.65	7.05	7	6.2	7.05
82	8.85	8.9	8.6	8.35	6.5	6.65	7.5
83	9.2	8.9	7.85	8	7.25	6.65	7.3
84	9.05	9.05	7.9	7.2	7.15	6.4	7.2
85	8.75	9.75	8.15	7	7.25	6.4	7.65
86	9.75	10.35	8.25	7.05	6.95	6.65	7.25
87	8.8	8.45	8.3	8.1	6.5	6.15	7.5
88	9.05	8.1	7.85	7.7	7.15	6.65	6.75
89	9.65	9.2	7.9	7.05	6.6	6.3	7.45
90	9.15	9.7	8.3	8.2	6.45	6.25	7.4
91	9.65	8.15	8.15	7.05	6.5	6.2	5.85
92	9.7	9.25	7.9	8.3	7.1	6.35	6.3
93	8.75	10	8.25	8.3	6.95	6.35	6.9
94	9.45	8.75	7.95	8.05	6.6	6.2	7.25
95	9.35	9.05	8.05	8.5	6.75	6.55	7.6
96	8.95	8	8.05	7.3	6.75	6.65	7.35
97	9.1	8.7	7.9	8.25	7.15	6.3	7.2
98	9.2	8.75	8.2	7.65	7	6.7	6.95
99	8.8	8.1	7.9	7.85	6.75	6.65	7.7
100	9.15	7.9	7.85	7.1	6.7	6.55	7.25
101	8.85	8.8	8.05	8.4	7.1	6.5	7.45
102	9	8.9	7.6	7.85	6.9	6.15	6.95
103	9.1	9.2	7.6	8.15	6.6	6.6	7.4
104	9.5	8.7	7.65	7.4	6.4	6.45	6.8
105	9.15	9.1	8.2	8.1	6.6	6.6	7.25
106	9.1	9.15	7.75	8.1	7.05	6.25	7.45
107	9.4	10.25	8.2	7.05	6.9	6.45	7
108	9.15	9.1	8.1	7.5	6.85	6.35	7.4
109	8.85	8.75	8.25	8.3	6.65	6.65	7.15
110	8.85	9	7.7	7.7	7.05	6.2	7.7
111	9.75	9.15	7.8	7.55	7.65	6.3	7.35
112	9.4	9.7	8.05	7.9	6.55	6.35	6.95
113	9.75	8.65	7.8	7.35	6.95	6.5	7.5
114	8.85	9.65	7.9	7.2	6.85	6.4	7.6
115	8.75	8.7	7.65	8	7.25	6.35	7.7
116	9.15	9.35	7.6	7.25	7.75	6.1	7.5
117	9.15	9.55	7.9	8.3	6.2	6.2	7.05
118	9.7	8.6	8.25	7.65	7.7	6.1	6.85
119	9.55	9.25	7.6	7.5	7.65	6.05	6.85
120	9.7	10.05	8.15	8.1	6	6.1	6.25
121	9.1	8.65	8.1	7.05	6.1	6	5.9

122	8.95	8.05	8.05	8	6.15	6.35	6.6
123	8.85	8.65	8.05	8.3	6.3	6.3	6.25
124	9.55	9.4	7.7	7.85	6.95	6.15	7.05
125	9	9.5	8.2	7.75	5.9	6.15	6.55
126	9.3	7.7	7.8	7.9	6.75	6.45	7.3
127	9.7	8.95	8.25	7.75	6.3	6	6.6
128	9.7	9.05	8.1	8.35	6.35	6.2	7.3
129	8.75	8.25	8.25	7.05	6.35	6.1	6.9
130	9.45	8.55	7.95	8.3	6.3	6	6.25
131	9.75	9.6	8.35	8	6.5	6.05	7.1
132	9.1	8.9	8.1	7.25	6.55	6.15	6.5
133	8.95	9.6	8.2	7.25	6.2	6.35	6.35
134	8.8	8.45	8.05	7.4	6.15	6.15	7.25
135	8.9	9.15	7.95	7.75	6.15	6.25	7.15
136	9.45	9.5	7.6	7.95	6	6.15	6.5
137	9.6	8.75	8.4	7.8	6.1	6.5	6.9
138	9.3	8.3	7.85	7.5	5.9	6.45	7.25
139	8.8	8.7	7.5	7.75	6.6	6.45	7.25
140	8.8	9.8	7.9	7.35	6.2	6.05	6.45
141	8.8	8.45	7.9	7.1	6.5	6.1	6.4
142	8.85	9.75	8	7.95	6.25	6	7.4
143	9.7	9.05	7.6	8.25	6.1	6.2	6.9
144	9.75	9.55	8.2	7.65	6.05	6.1	6.25
145	9.35	10.25	7.8	8.25	6	6.35	6.6
146	9.75	9.4	7.95	7.45	5.9	6.15	7.2
147	9.05	7.65	7.85	7.85	6.1	6.35	7.25
148	9.35	8.95	8.2	8.05	6.7	6.1	6.55
149	8.85	8.45	7.7	7.05	5.95	6	6.7
150	8.8	9.55	7.55	7.5	6.3	6.35	6.9
151	9.35	8.95	8.05	8.45	6	5.9	6.6
152	9.5	9.3	8.15	7.55	6.3	6.15	6.25
153	9.05	10.05	7.65	7.75	6.45	5.9	5.45
154	8.7	8.05	7.45	7.15	6.35	6.2	5.75
155	9.25	8.45	7.9	7.9	6.5	6.3	6.6
156	9	9.45	7.6	7.75	6.65	6.1	6.65
157	8.6	9.75	7.95	6.85	6	5.9	6.6
158	9.45	9.15	7.85	7.35	6.2	6.15	6.5
159	8.6	8.35	7.65	7.7	6.35	6.25	6.6
160	9.2	8.95	8.3	7.7	6.3	6	6.95
161	9	7.9	7.65	6.7	6.5	5.8	6.45
162	8.55	7.55	7.45	7.5	6.15	6.2	7

163	9.1	8.45	8.05	5.55	6.45	6.3	6.75
164	9.15	9.4	7.55	6.9	5.95	6.3	6.7
165	8.6	8.1	7.4	6.45	6.35	6.3	6.75
166	9.4	9.15	7.85	6.8	6.25	5.95	6.25
167	8.9	9.35	7.95	7.2	6.2	6.2	6.45
168	9.15	8.25	7.9	6	6.3	6.1	6.7
169	9.4	9.3	7.55	7.25	6.4	6.15	6.4
170	8.95	8.45	7.85	6.5	6.15	6.2	6.4
171	8.8	8.95	7.4	7.2	6.45	6.3	6.45
172	8.5	8.4	7.7	7.15	5.95	5.8	6.55
173	8.9	8.75	7.8	6.5	6.7	6.35	6.55
174	8.6	9.5	8.2	7.75	6.15	6.2	6.8
175	9.15	10.3	8	7.2	6.25	6.1	6.75
176	9.3	8.85	8	7.75	6.65	6.1	6.25
177	8.7	8.35	8.1	7.75	6.45	5.8	6.4
178	8.95	9	7.55	6.65	6.6	6.1	6.65
179	9.15	9.45	7.75	7.9	6.4	5.95	6.4
180	8.7	7.85	7.6	7.55	6.5	6.2	6.35
181	8.95	7.55	7.85	7.95	6.3	6.3	5.25
182	9.5	8.3	7.5	6.8	6.25	6.1	5.9
183	9.3	7.95	8.05	7.5	5.9	6.15	6.45
184	8.95	8.55	7.7	7.3	6.05	6.15	6.8
185	9.45	7.95	8.25	7.55	6.2	5.95	6.45
186	9.15	8.5	8.4	7.95	6.05	5.75	6.45
187	9.25	9	8.2	7.45	6.2	5.95	7
188	8.8	7.35	7.7	5.95	6.25	6.05	6.6
189	8.85	8	8.05	7.75	6.4	6.1	6.7
190	9.35	7.15	7.45	7.45	6.5	5.95	6.3
191	8.35	7.95	7.6	6.95	6.4	5.6	6.35
192	8.25	8	7.75	7.4	6.6	5.65	6.65
193	8.4	8.65	7.85	6.75	6.4	5.5	6.4
194	8.45	7.75	7.7	7.55	6.5	5.7	6.55
195	9.35	7.65	7.45	7.85	6.1	6.15	6.55
196	8.85	7.95	8.1	6.15	6.2	5.55	6.5
197	8.95	8.15	7.9	6.55	6.15	5.5	6.25
198	8.7	8	8.15	7.55	6.15	5.55	6.95
199	8.9	8.05	8.05	6.25	6.35	5.7	6.7
200	8.35	7.95	7.55	7.2	6.2	6.15	6.3
201	9.45	7.75	8.1	7.15	6.1	5.9	6.55
202	8.45	8	7.35	7.9	6	5.7	6.35
203	9.4	8.25	7.25	6.1	6.5	6	6.05

204	9.5	8.05	8	6.35	6.3	5.95	6.55
205	8.25	8.3	7.9	7.7	6.15	5.85	6.15
206	9.2	8.95	8.1	7.35	5.95	6	6.05
207	8.3	7.9	8.15	6.65	6	5.95	6.45
208	9.45	7.9	7.85	6.7	6.4	5.9	6.05
209	9.2	8.05	8.05	5.75	6.75	5.5	6.5
210	8.35	8.15	7.85	6.15	5.9	5.65	6.65
211	8.8	8	7.65	7.6	6.5	6.15	6.55
212	8.9	7.95	7.45	6.9	6.5	5.65	5.1
213	9.1	9.65	8.15	6.3	6.35	6.05	5.85
214	9.25	7.9	7.7	7.5	5.9	5.7	6.05
215	8.25	8.5	8.1	6.45	6.4	5.5	6.4
216	9.1	8	7.6	7.85	6.6	6	6.7
217	8.4	7.65	7.5	7.05	6.15	5.65	6.15
218	8.9	7.95	7.35	7.1	5.95	6.05	6.1
219	9.1	8.1	7.55	7.75	6.75	6	6.15
220	8.75	9.45	7.2	7.1	6.4	5.5	6.1
221	8.55	7.8	7.55	7.9	6.5	5.55	6.75
222	8.4	7.75	7.25	7.85	6.1	6.15	6.05
223	9.4	8	7.1	8	6.5	6.1	5.9
224	8.55	7.55	7.6	7.25	6.1	5.55	6.65
225	8.9	7.75	7.2	5.75	7.15	5.65	6.7
226	9.35	7.35	7.4	8	5.95	6.15	6.1
227	9.5	8.1	7.7	7.15	6.6	5.75	6.2
228	8.85	7.9	7.3	5.95	7	5.85	6.75
229	8.95	9	7.15	6.35	7.3	5.65	6.5
230	9.5	7.05	7.65	6.85	7.5	6.05	6.7
231	9.1	7.5	7.6	7.1	6.3	5.95	6.4
232	9.2	8.05	7.65	7.45	6.8	5.55	6.05
233	9.45	8.7	7.5	6.85	7.4	5.5	6.7
234	9	8.35	7.5	6.95	6.45	5.55	6.1
235	8.55	8.55	7.55	6.1	5.75	5.7	6.45
236	9.05	7	7.7	7.75	5.8	5.9	6.25
237	9.2	8.9	7.75	5.8	5.8	5.9	6.4
238	8.3	7.65	7.5	6.8	6	5.6	5.95
239	9.5	7.85	7.2	7.9	6.1	5.6	5.9
240	8.25	7.7	7.7	7.8	6.05	5.55	5.3
241	9.25	7.7	7.4	6.8	6.35	5.8	5.5
242	9.35	7.6	7.55	6	6.35	6.1	6.05
243	9.15	7.55	7.15	7.05	5.9	5.7	6.05
244	9.35	7.35	7.4	5.8	6.05	5.85	6.75

245	8.6	7.35	6.95	7	6.25	6.05	6.3
246	9.05	7.85	7.2	6.15	6.25	6.1	6.05
247	8.75	7.4	7.55	7.95	6	5.65	5.9
248	8.4	7.65	7.15	5.95	6.05	5.75	6.1
249	8.5	7	7.4	6.25	6.3	5.8	6.3
250	9	6.35	7.5	7.45	6.15	5.5	6
251	8.8	7.4	7.5	6.35	5.9	5.8	5.55
252	8.4	8.05	7.25	7.55	6.25	5.45	5.5
253	8.95	7.1	7.2	7.2	6.5	5.75	6
254	8.65	8.45	7.4	6.5	6.4	5.1	6.15
255	8.9	8.1	7.35	7.7	6.05	5.25	6.05
256	8.25	7.85	7.4	6.15	6.35	5.8	6
257	8.6	7.4	6.9	7.95	6.05	5.55	5.55
258	8.25	7.05	7.15	7.45	5.75	5.6	5.7
259	8.3	7.8	7.5	7.4	5.8	5.2	6.1
260	8.05	7.95	7.35	5.8	6.2	5.7	6.05
261	8.75	7.5	7.45	6.1	6.4	5.4	6.1
262	9.15	7.1	7.3	7.55	6.35	5.75	6
263	8.8	8.35	7.1	7.45	6.05	5.55	5.65
264	8.85	8.05	6.95	7.05	6.1	5.25	6.1
265	8.35	8	7.05	7.25	6.05	5.8	6.15
266	9.05	8.75	7.25	7.85	6.2	5.1	5.45
267	8.3	9.05	6.9	6.85	6.15	5.2	5.7
268	8.6	7.1	6.9	6.05	6.1	5.55	5.7
269	8.2	7.8	7.25	6.25	5.9	5.2	6.15
270	8.05	7.95	7.1	6.4	6	5.7	5.3
271	8.4	8	7.2	6.15	5.9	5.5	5.65
272	8.45	8.5	6.9	6.4	5.85	5.65	6.2
273	8.15	9.25	7	6.5	6.2	5.6	6.1
274	8.4	8	7.05	5.85	5.95	5.65	6
275	8.3	7.35	7.35	6.95	5.55	5.8	5.7
276	8.7	7.95	7.15	6.9	5.75	5.45	5.7
277	8.8	7.95	7.35	5.75	5.7	5.3	5.75
278	7.9	8.25	7.3	6.8	5.75	5.45	5.95
279	9	8.05	6.9	7.4	5.9	5.7	5.5
280	8.75	7.85	6.95	7.15	6.25	5.65	4.95
281	8.05	7.45	6.7	7.35	6	5.3	5.25
282	8.95	7.75	6.95	6.55	6.15	5.15	5.5
283	8.3	8.4	6.75	7.95	5.7	5.05	5.85
284	8.15	7.7	6.95	6.65	6.1	5.5	6
285	8.9	7.85	6.85	6.5	6.15	5.8	5.65

286	8.5	8.8	6.75	7.35	6.25	5.4	5.25
287	8.65	8.85	7.2	5.95	5.6	5.7	5.5
288	8.95	7.75	6.85	6.45	6.05	5.55	5.35
289	8.15	8.45	6.95	6.95	6.2	5.45	6.05
290	8.15	7.75	6.7	7.15	5.6	5.2	5.6
291	7.95	7.35	6.85	7.7	5.75	5.55	6.15
292	8.8	8.05	7.1	7.2	5.75	5.1	5.7
293	7.95	8.2	7	6.65	5.5	5.45	5.6
294	8.6	8.45	7.05	7.45	5.5	5.1	5.9
295	8	8	7.2	7.6	5.55	5.75	5.8
296	7.9	8.05	7	7.65	6.15	5.8	5.9
297	8.15	8.75	7.25	6.8	5.7	5.5	5.9
298	8.9	8.25	6.7	6.2	5.55	5.7	5.6
299	8.8	7.85	7.25	7	5.9	5.75	5.8
300	7.85	7.75	6.9	6.45	5.55	5.05	4.7
301	8.05	7.65	6.8	6.85	5.9	5.6	5.05
302	7.85	7.95	6.9	7.8	6	5.35	5.65
303	8.65	7.05	7.1	7.75	5.55	5.55	6.2
304	8.25	6.9	7.15	6.8	6.15	5.45	6.2
305	8.1	8	7.15	7.25	5.75	5.45	5.35
306	7.85	8.25	7	7.5	5.7	5.85	5.25
307	9	7.85	6.5	7.75	5.3	5.85	5.2
308	8.8	7.35	6.95	6.5	5.6	5.15	5.5
309	8.3	7.4	6.8	7.9	5.8	5.1	5.7
310	8.8	7.5	6.95	6.4	5.4	5.65	5.8
311	9	7.7	6.85	5.4	5.25	5.65	5.55
312	8.2	8.35	7.05	7.2	5.6	5.3	6.25
313	8.3	8.95	6.55	6.8	6	5.6	5
314	7.5	7.5	7.1	5.75	5.35	5.25	5.45
315	8.05	7.35	6.55	6.15	5.9	5.1	5.8
316	8.35	7.3	6.8	6.45	5.55	5.35	5.25
317	8.15	7.45	6.8	6.15	5.9	5.35	5.4
318	8.25	7.85	6.95	7.3	5.4	5.85	5.45
319	7.8	7.15	7.15	6.55	5.8	5.65	5.2
320	7.6	8.8	7.2	5.4	5.35	5.25	5.2
321	8.5	7.95	6.5	6.05	5.75	5.55	5.7
322	7.55	8.05	6.65	5.85	5.35	5.75	6
323	7.85	7.85	6.6	6.85	5.55	5.4	5.35
324	7.95	7.6	6.75	5.4	5.3	5.7	5.7
325	8.25	8.45	7.05	5.35	5.5	5.55	5.25
326	7.85	7	6.7	6.25	5.4	5.8	6.2

327	7.75	9.25	6.55	5.3	5.4	5.1	6.15
328	7.5	6.85	6.5	5.35	5.6	5.3	5.5
329	7.85	7.85	7.05	7.4	5.9	5.3	5.55
330	7.9	7.9	6.95	5.95	5.25	5.45	5.55
331	8.2	8.05	6.6	6.1	5.95	5.8	4.7
332	7.75	7.45	6.95	5.95	5.75	5.7	5.4
333	8.35	7.2	7.05	5.8	5.75	5.1	5.8
334	8.15	8.4	6.45	6.2	5.95	5.7	5.7
335	7.55	7.85	6.9	5.6	5.7	5.5	5.35
336	8.05	8.55	6.95	5.9	5.7	5.65	6.05
337	7.5	8.35	7	6.65	5.95	5.6	5.55
338	8.4	8.3	6.8	6.5	5.85	5.5	5.4
339	8.45	7.95	7	5.6	5.6	5.4	5.7
340	8.25	7.85	6.6	7	5.8	5.25	6
341	8.05	7.95	6.75	6.25	5.95	5.5	6.1
342	7.5	8.05	6.6	5.6	5.25	5.55	5.75
343	8.2	8.3	6.65	5.4	5.4	5.25	5.55
344	8.15	8.35	6.7	5.85	5.6	5.7	5.8
345	8.25	7.8	6.95	5.9	5.85	5.65	5.15
346	8.2	7.45	6.8	6.7	5.35	5.5	5.95
347	7.7	7.15	6.65	5.65	5.35	5.55	5.5
348	8	7	6.55	5.5	5.6	5.25	5.9
349	7.5	7.5	6.55	6.3	5.3	5.3	5.65
350	7.9	7.35	6.9	5.8	5.45	5.65	5.45
351	7.5	8.25	6.4	6.5	5.55	5.55	5.3
352	7.75	8.35	6.3	6.75	5.75	5.45	5.9
353	8.5	7.4	6.8	7.25	5.95	5.85	5.65
354	8.25	7.5	6.45	5.3	5.4	5.7	5.9
355	8.25	7.6	6.65	5.3	5.55	5.65	5.2
356	7.8	7.4	6.8	5.75	5.6	5.25	5.9
357	7.3	7.1	6.55	5.75	5.25	5.4	5.2
358	7.35	8	6.5	5.75	5.9	4.9	5.35
359	7.3	7.25	6.75	7.35	5.4	5.4	5.65
360	8.2	8.35	6.5	6.65	5.65	5.25	5.3
361	7.6	7.8	6.55	6.25	5.45	4.95	5.45
362	7.8	8.05	6.5	7.35	6	5.3	5.05
363	7.55	7.1	6.95	5.75	5.25	5.15	4.5
364	7.55	7.3	6.35	5.4	6	5.15	5
365	7.65	8	6.9	6.8	5.6	5.55	5.6
366	7.8	7.4	6.95	6.2	5.9	4.9	5.95
367	7.75	7.25	6.9	7.35	5.35	5.4	5.1

368	7.5	7.5	6.45	7.4	5.45	5.35	5.3
369	7.8	7.15	7	7.5	5.5	5	5.2
370	7.8	8	6.3	6.3	6	5.2	5.95
371	8	7.8	6.95	6.4	5.55	4.7	5
372	7.6	7.2	6.75	6.6	5.35	5.25	5.35
373	7.6	7.6	6.55	6.4	5.3	4.9	5.05
374	8.85	7.95	6.95	6.55	5.9	5.15	5.95
375	7.75	7.5	6.35	6.85	5.55	4.75	5.25
376	8.3	7.15	6.8	7.4	5.6	4.9	5.75
377	7.5	7.65	6.25	6.1	5.3	4.7	5.9
378	7.75	6.65	6.15	6.85	5.75	4.7	5.8
379	7.7	6.9	6.8	5.55	5.25	4.75	5.35
380	8.4	7.3	6.25	6.1	5.4	5.15	5.6
381	7.2	7.45	6.65	6.75	5.65	5.05	5.5
382	7.6	6.6	6.7	5.25	5.7	5.15	5.8
383	7.3	6.65	6.5	6.65	5.5	4.85	5.45
384	7.9	7.15	6.15	7.45	6	5.3	5.55
385	7.8	7.15	6.75	7.35	5.95	4.9	5.6
386	7.45	6.65	6.7	5.55	5.85	5	5.8
387	7.1	7	6.55	5.55	5.65	5.2	5.4
388	7.8	6.65	6.25	5.55	6	4.45	5.65
389	7.8	6.85	6.55	5.45	5.75	4.6	4.6
390	7.9	6.9	6.65	6.9	5.9	4.95	5.4
391	7.6	6.35	6.3	5.75	5.45	5	5.9
392	8.15	6.05	6.45	6.15	5.3	4.85	6
393	7.95	6.65	6.7	6.95	5.9	4.6	5.7
394	7.8	5.85	6.35	6.4	5.4	4.5	5.6
395	7.45	6.05	6.45	5.35	5.15	4.5	5.4
396	8.35	5.95	6.8	5.35	5.7	4.55	5.45
397	7.65	5.35	6.4	6.25	5.05	4.55	5.65
398	7.75	5.7	6.7	5.85	5	4.5	5.75
399	7.6	5.95	6.4	7.5	5.55	4.6	5.65
400	8	5.75	6.35	5.35	5.15	4.5	5.3
401	7.2	6.05	6.65	6.1	5.15	4.65	5.5
402	7.25	5.4	6.5	6.1	5.4	4.95	5.1
403	7.85	5.55	6.15	5.3	5.45	5.2	5.65
404	7.7	5.7	6.75	5.25	5.65	4.55	5.35
405	8	6.9	6	5.55	5.2	4.4	5.35
406	7.75	6.2	6.15	7.1	5.1	5.05	5.9
407	7.9	6.3	5.95	5.85	5.4	4.85	5.05
408	7.6	6.15	6.5	7.1	5.4	4.7	5.3

409	7.9	5.85	6.7	5.9	5.2	4.7	5.85
410	7.7	5.6	6.9	6.1	5.4	4.4	5
411	7.8	5.85	6.85	5.65	5.65	4.4	5.05
412	7.4	6.1	6.3	5.15	5.15	4.9	5.4
413	7.7	5.85	6	5.65	5.4	4.8	5.75
414	7.35	6.2	6	4.8	5.7	4.9	5.45
415	8.2	4.85	6.6	6.5	5.7	4.95	5.55
416	7.85	5	6.7	6.4	5.3	5.2	5.35
417	7.4	5.35	6.05	4.75	5.6	5.05	5.7
418	7.9	5.65	6.55	5.55	5.3	4.85	5.5
419	7.65	5.25	6.2	6.8	5.75	5.2	5.9
420	7.7	5.5	6.75	6	5.4	4.95	5.55
421	8.25	5.45	6.15	6.25	5.25	4.85	5
422	7.9	6.05	6.05	6.2	5.3	5	4.55
423	7.7	4.95	6.15	7	5.5	5.05	5.15
424	7.95	5.25	6.65	5.25	5.35	4.55	5.3
425	8.7	5.5	6.4	6.95	5.65	4.65	5.4
426	7.7	5.2	5.95	6.55	5	5.1	6
427	7.85	4.85	6.65	4.75	5.65	4.15	5.3
428	7.95	5.95	6.9	6.2	5.5	5	4.75
429	7.85	5.85	6.05	5	5.55	4.7	6.2
430	8.05	6.2	6	6.25	5.7	4.65	6
431	7.35	5.5	6.45	6.1	5.3	5.1	4.75
432	7.9	5.3	6	5.45	5.55	4.65	5.2
433	7.4	5.9	5.95	6.95	5	4.55	5.9
434	7.5	6.15	6.5	6.75	5.15	4.5	5.05
435	7.5	5.85	6.55	6	5.05	5.1	5.5
436	8.2	5.7	6.3	6.75	4.95	4.9	5.9
437	8.8	5.05	6.25	6.25	5.45	4.65	5.55
438	7.25	4.75	6.6	5.15	5.25	5	5.5
439	7.95	5.15	6.1	4.8	5.65	4.5	5.8
440	8.15	5.5	6.35	5	4.95	4.9	5.9
441	8	5.95	6.05	6.4	5.5	5.25	5.35
442	7.6	5.55	6.8	6.5	5.7	4.9	5.75
443	8.4	5.65	6.35	5.5	5.5	4.3	5.3
444	7.75	5.2	6.1	5.75	5.45	4.3	5.85
445	8.4	5.6	6.1	5.4	5.25	4.9	5.3
446	8.8	5.6	6.7	5.85	5.75	5.2	6.05
447	8.2	5.05	6.5	5.65	5.25	5	5.15
448	7.8	5.65	6.45	4.8	5.25	4.85	5.75
449	7	5.35	6	5.1	5.4	4.3	5.3

450	7.85	5.05	6.45	6.1	4.75	5.25	4.8
451	8.5	5.7	6.65	4.8	5.15	4.4	5.75
452	7.15	5.1	6.15	6.25	5.2	5.25	4.5
453	7.7	6.35	5.9	5.4	5.35	4.95	5.85
454	7.55	6.25	5.95	5	5.25	4.5	5.95
455	7.6	5.25	6.3	5.5	5.25	4.5	5.4
456	7.25	5.4	6.3	5.25	4.65	4.5	5.05
457	7.55	5.4	6.6	4.9	5.15	4.6	5.65
458	7.25	5.9	6.8	5.9	5.5	4.2	5.15
459	7.8	5.25	6.7	5.15	5.35	4.2	5.65
460	8.5	5.95	5.9	5	5.2	4.25	5.7
461	8.05	5.35	6.7	5.6	5.5	5.15	4.9
462	7.2	5.5	6.45	5.8	5.3	4.95	6.15
463	7.85	6.15	5.75	5.4	4.7	4.8	6
464	7.75	5.3	6.1	5.95	5.05	5.05	4.75
465	8.05	5.7	6.45	5.05	4.55	4.85	5.85
466	7.55	5.7	6.4	6	4.5	4.55	4.9
467	7.7	5.35	5.8	5.95	4.6	4.45	5.2
468	7.4	5.05	6.5	5.6	4.65	5.1	5.9
469	7.5	4.9	6.1	5.25	4.75	4.85	5.6
470	7.4	5.2	5.85	6.25	5	5.15	5.3
471	7.95	5.2	6.6	5.05	4.85	4.2	5.35
472	7.9	5.4	6.4	5	4.95	4.55	6.05
473	7.85	5.25	6.6	4.75	4.6	4.9	5.05
474	8	4.95	6.35	5.25	5.2	5.1	5.65
475	7.25	4.85	6.15	6.15	5.4	4.2	5.3
476	7.25	4.8	6.05	5.45	5.2	4.15	6.05
477	7.15	5.3	5.6	5.7	4.5	4.2	5.45
478	7.2	5.05	5.6	5.7	4.6	5.1	4.95
479	7.8	5.3	6.3	4.8	5.05	4.3	6.25
480	7.35	5.05	6.15	5.6	4.9	5.1	4.85
481	7.4	4.9	5.8	5.8	5.5	4.7	5
482	7.8	4.85	6.45	5.95	4.95	4.8	4.35
483	7.95	5.4	5.7	5.9	5.05	4.65	4.75
484	7.25	4.95	6.4	6.05	5.2	5.25	5.1
485	7.45	5.2	5.65	5.4	4.9	4.2	5.7
486	7.8	4.8	6.1	5.65	4.65	4.2	4.95
487	7.7	4.7	5.95	5.6	5.3	4.15	4.8
488	8.6	4.65	6.1	6.2	4.75	4.9	5.4
489	7.2	4.85	5.45	5.9	5.05	4.75	5.4
490	6.9	5	5.7	5.05	5.05	4.35	4.9

491	7.8	5.2	5.6	4.85	4.85	5.3	5.6
492	7.85	4.8	5.75	5.05	5.05	5.25	5.65
493	7.7	4.7	6.15	6.15	4.55	4.45	5
494	7.9	4.65	5.7	4.6	5.15	5	5.25
495	7.6	4.95	6.05	5.6	4.9	4.85	4.9
496	7.85	5.05	5.95	4.6	5.45	4.65	5.6
497	7.6	5.25	5.75	5.05	4.8	5	4.8
498	7	4.7	6.1	4.55	4.55	4.15	5.75
499	7.55	5.05	5.7	5.65	5.3	4.45	5.05
500	7	5.75	6.1	4.8	4.85	4.5	5.3
501	8.1	5.35	5.85	4.5	5.05	4.35	5.2
502	7.9	5.7	5.35	5	4.65	4.25	5.05
503	7.5	4.9	6.2	4.65	5.05	4.9	5.5
504	8.1	4.75	6	5.2	5.5	4.4	4.95
505	6.5	5.2	6.25	5.4	4.8	4.75	5.25
506	7.65	5.25	5.55	4.95	4.8	5	5.15
507	6.75	5.35	5.8	5.5	4.95	4.45	5.55
508	7.45	4.65	5.35	5.6	5.45	4.55	5.15
509	7.1	4.75	5.7	4.8	5.05	4.6	5.6
510	7.75	4.95	5.9	4.95	4.9	4.8	5.35
511	8.05	4.9	5.35	4.5	4.75	4.75	5.4
512	7.6	4.5	5	5.05	5.2	4.9	4.45
513	7.65	5.25	5	4.75	5.25	4.05	5.35
514	7.7	5.5	4.9	5.75	5.25	4.15	4.95
515	6.5	5.35	5.15	5.1	4.85	5.05	5.05
516	7.5	4.75	5.15	4.95	5.4	4.8	5.35
517	7.35	4.9	4.8	5.2	5.3	4.55	5.15
518	7.9	5.2	4.95	5.2	4.6	4.05	4.75
519	7.45	4.7	4.7	4.55	4.75	4.5	4.8
520	7.15	4.75	5.3	5.45	4.55	4.2	5.4
521	7.4	4.75	5.15	4.95	4.95	4.55	5.15
522	7.9	4.8	5.25	5.15	4.7	5	5.65
523	7.5	5	5.25	5.6	5.4	4.1	5.75
524	7.7	5.5	5.35	4.65	4.5	4.9	5.35
525	7.4	5.75	5	5.3	5.45	4.55	4.85
526	6.95	6	5.5	4.8	5	5.05	5.1
527	7.15	4.5	5.3	5.05	4.8	4.75	4.95
528	7.3	4.7	4.7	5.15	5.3	4.25	5.55
529	7.1	4.85	5.3	5.1	4.8	4.8	5.3
530	6.9	4.9	5.15	4.6	5	4.3	4.85
531	7.4	5.05	5.45	4.95	5.3	4.05	4.95

532	6.4	5.25	5.25	5.1	4.6	4.05	4.75
533	7.35	5.3	5.4	4.9	4.6	4.55	4.9
534	7.15	5.35	4.8	4.6	4.85	4.45	5.5
535	7.7	4.9	4.7	5.45	5	4.8	5.65
536	7.45	4.95	5	5.05	5.05	4.25	5.35
537	7.9	4.7	5.15	4.65	5.4	4	5.4
538	7.25	4.75	5	4.85	5	4.7	5.65
539	7.95	4.5	5.45	4.9	5.45	4.45	5.15
540	7.8	5.4	4.75	5.55	5	4.05	4.8
541	6.85	4.4	4.8	5.1	4.5	4.75	5.7
542	7.3	5.05	5.45	4.6	5.2	4.75	4.25
543	7.05	5.8	4.8	5.35	5.25	4.8	5.65
544	7.25	5.65	5.55	5.3	4.95	4.1	4.95
545	8.7	5.4	4.7	4.85	4.9	4.8	4.8
546	8	4.4	4.75	5.2	4.55	4.2	5.25
547	7.2	4.95	4.9	4.85	4.6	4.6	4.95
548	7	4.7	5.55	4.25	4.6	4.95	5.25
549	7.7	5.25	5.25	5.3	5.45	5	5.4
550	7.2	5.95	5.3	4.25	4.7	4.55	5.35
551	7.8	4.55	5.4	5	5.5	4.2	5.5
552	7.05	4.85	4.8	5.4	4.9	4.95	4.8
553	7.3	4.8	5.35	5.15	5.25	4.85	4.8
554	7.35	5.05	5.25	5	4.6	4.45	5.4
555	7.7	5.2	5.15	5.3	4.6	4.9	5.7
556	7.75	5.2	5.35	4.7	4.5	4.6	4.85
557	7	5.25	5.5	4.8	4.85	5.1	5.5
558	7.25	5.05	5.2	4.3	4.95	4.95	4.8
559	7.05	4.9	5.5	4.6	4.9	5.05	5.6
560	7.4	5.2	5.55	5	4.9	4.55	5.45
561	7.9	5.15	5.35	5.2	4.7	4.9	5.5
562	7.6	5.45	5.1	4.5	4.5	5.1	4.9
563	6.9	5.5	4.7	5.4	4.8	4.65	5.15
564	7.35	4.5	5.1	5.15	5.2	4.1	4.85
565	6.95	4.75	4.95	4.95	5.4	4.65	5.3
566	7.8	5.3	4.65	5.4	5.2	4.1	5.25
567	6.55	6.25	4.65	4.55	4.9	5.05	5.1
568	7	5.8	5.3	5.05	4.8	4	5.1
569	7.35	5.5	5.2	5.45	4.65	4.15	5.25
570	7.4	5.1	4.75	4.85	4.6	4.15	5.2
571	7.85	4.8	5.2	5.45	4.6	4.55	5.35
572	7.35	4.6	4.75	4.45	4.85	4.7	4.1

573	7.45	5.15	5.15	4.85	5	4.85	4.8
574	7.15	4.75	4.75	4.65	5.15	4.45	4.8
575	7.85	4.6	5.35	4.45	4.75	4.45	5.3
576	7.85	4.8	4.7	5.15	5.25	4.85	5
577	7.35	4.75	5.15	5	5	4.1	5.7
578	7.2	4.55	4.85	5.45	5.3	4.6	5.4
579	7.5	4.9	5.05	4.6	4.75	4.95	5.35
580	6.95	4.4	4.75	5.4	4.8	4.1	4.9
581	7.55	5.65	5.3	5.5	4.75	4.1	4.8
582	7.4	5.25	4.6	4.9	4.65	4.15	5.15
583	7.4	4.6	4.45	4.9	4.9	4.15	4.85
584	7.65	4.7	5.05	5.2	5.5	3.9	4.85
585	7.15	4.6	5.35	5.15	4.5	3.95	5
586	7.7	4.8	4.5	4.95	4.55	4.1	4.75
587	7.5	4.8	4.8	4.55	4.8	3.95	4.75
588	7.5	5.3	4.7	4.65	4.6	4.55	4.5
589	7.65	4.6	4.6	5.25	5.5	4.45	5.1
590	7.75	5.2	4.7	4.3	5.15	3.8	4.55
591	7.6	5.45	5.4	5.3	4.85	3.85	4.95
592	7.85	5.2	4.6	4.8	5.2	4.5	4.55
593	7.85	5.4	5.1	5.05	4.75	4.45	4.5
594	7.65	5.3	4.4	4.75	5.4	4.6	5
595	7.3	4.55	5	5.25	5.45	4.7	4.5
596	7.4	5.8	4.5	4.7	4.7	4.45	4.7
597	7.4	4.35	4.65	4.8	4.55	3.85	4.9
598	7.35	4.55	4.55	4.65	4.5	4.7	4.65
599	7.55	5.1	4.75	4.7	5.05	4.15	4.95
600	7.95	4.7	5.3	4.6	4.5	4.6	4.9
601	7.6	4.75	5.05	5.5	4.75	4.5	4.5
602	8.55	4.4	5.1	5.1	4.5	4.6	4.35
603	7.5	4.7	4.55	4.45	5.45	4.05	4.9
604	7.75	5.2	4.8	4.35	4.75	3.9	5
605	7.25	4.95	4.95	4.45	4.5	4.4	4.8
606	7.15	4.65	4.95	5.4	5.4	3.85	4.9
607	7.5	4.75	4.45	4.75	5.15	4.2	4.9
608	7.75	5.3	5.2	4.5	5.5	3.9	4.8
609	7.6	4.7	5.25	5.15	4.55	3.85	4.7
610	8	5	4.8	4.85	4.65	4.5	4.95
611	7.1	4.6	5.05	5.15	4.55	4.6	4.55
612	7.9	4.8	5.2	5.15	4.55	4.35	4.95
613	7.4	4.4	4.45	4.45	5.4	4.55	4.95

614	6.8	4.35	5.3	5.4	5.3	4.45	4.9
615	8.05	4.45	5.05	4.75	5.45	3.85	4.5
616	7.7	4.65	4.7	4.8	4.6	4.55	4.95
617	8.2	4.75	4.45	4.6	4.45	4.65	4.6
618	7.5	5.2	4.5	5.4	4.75	4.45	5
619	7.45	5.35	5.25	4.9	4.7	4.6	4.8
620	7.5	4.65	4.7	5.1	4.5	4.6	4.5
621	7.2	4.7	5.15	5.3	4.7	4.5	4.7
622	7.9	4.9	5.2	4.65	4.55	4.25	4.35
623	7.7	4.35	5.4	4.25	4.75	4.1	4.25
624	7.7	4.65	4.8	4.9	4.55	4.05	4.6
625	7.3	4.75	4.65	4.9	4.55	4.35	4.75
626	7.35	4.45	4.9	4.8	4.75	4.05	4.45
627	7.4	5.05	4.6	4.3	4.5	4.05	4.55
628	7.75	4.85	4.05	5.05	4.55	4	4.8
629	7.5	5.2	4.7	4.65	4.75	4.45	4.55
630	8.2	4.75	4.2	5.25	4.65	4.4	4.45
631	7.7	4.9	4.7	4.65	4.75	3.95	4.75
632	7.9	5.2	4.3	4.75	4.6	4.25	4.1
633	7.9	4.6	4.65	4.35	4.65	3.9	4.7
634	7.3	4.7	4.9	4.65	4.6	4.35	4.4
635	7.25	4.8	4.55	5.4	4.6	4.4	4.75
636	7	5.25	4.7	4.65	4.5	3.7	4.35
637	7.5	5.2	4.3	5.25	4.7	3.8	4.6
638	7.5	5.2	4.3	4.9	4.7	3.95	4.3
639	6.7	4.6	4.8	5.05	4.55	3.65	4.8
640	7.9	4.7	4.1	4.6	4.7	4.5	4.65
641	7.65	4.4	4.4	4.95	4.65	3.95	4.6
642	7.25	4.45	3.8	4.55	4.65	4.1	4.8
643	7.65	4.35	4.35	4.75	4.75	3.95	4.9
644	7	4.6	4.25	4.9	4.6	4.05	4.9
645	7.5	4.75	3.8	4.6	4.6	4.25	4.85
646	8.1	4.8	4.15	5.2	4.45	3.55	4.75
647	7.55	4.85	3.75	4.25	4.6	3.55	4.85
648	7.4	6	4	5.35	4.45	4.5	4.7
649	7.9	4.7	4.3	4.4	4.6	3.7	4.7
650	7.5	4.75	4.1	4.6	4.65	4.3	3.6
651	7.5	4.3	4.3	5.2	4.5	3.6	3.95
652	7.1	4.6	3.75	5.5	4.55	4.45	3.5
653	7.9	4.9	4.05	5.05	4.55	3.85	3.85
654	7.85	5	3.95	5.5	4.5	3.55	3.75

655	7.55	5.05	4.65	4.7	4.5	4.15	3.85
656	7.55	5.9	3.95	5.05	4.5	3.6	3.5
657	7	4.55	4	4.4	4.5	4.05	4
658	7.6	4.6	3.8	5	4.7	3.55	3.55
659	7.7	4.7	4.45	4.6	4.55	4.3	3.7
660	7.75	4.7	4.05	4	4.6	3.9	3.95
661	6.85	4.8	3.95	4.65	4.7	4.45	3.85
662	7.65	5	4.1	4.65	4.6	3.6	3.45
663	8.2	4.6	3.95	5.2	4.6	4.25	3.85
664	8.15	4.7	4.55	4.05	4.6	3.9	4.15
665	7.65	4.8	4.15	4.55	4.45	4.5	3.7
666	7	4.6	4	4.5	4.65	3.7	4.05
667	7.25	4.4	4.25	5.15	4.7	4.4	4.15
668	7.5	4.35	3.9	4.4	4.5	3.6	4.2
669	7.4	4.5	4	5.15	4.7	4.35	3.95
670	8.05	4.55	3.75	4.4	4.6	3.95	3.95
671	6.95	5.05	3.75	4.55	4.65	4.25	4.15
672	7.9	4.9	4.2	5.1	4.75	3.9	3.9
673	7.65	4.85	4.35	4.1	4.45	4.15	4.15
674	7.35	4.75	4.4	4.05	4.6	4.45	4.05
675	7.55	4.65	4.15	4.85	4.6	3.95	3.9
676	7.75	4.8	4.2	4.75	4.7	4.4	3.75
677	7.2	4.6	4.45	4.2	4.65	4.4	3.8
678	6.7	4.65	3.95	4.2	4.65	4.4	3.65
679	7.4	4.6	4.4	4.55	4.7	3.9	4.2
680	7.25	4.7	3.8	4.8	4.65	3.8	3.6
681	7.1	4.95	4.25	5.05	4.55	3.8	3.55
682	6.35	5.1	4.3	5.1	4.6	3.65	3.55
683	6.9	4.45	4.35	4.45	4.45	3.65	4.15
684	6.8	4.2	3.9	4.25	4.75	3.55	3.8
685	7.05	4.95	4	4.7	4.7	3.75	3.7
686	6.9	4.35	4.35	5.05	4.5	4	3.55
687	6.9	4.55	3.5	4.8	4.05	4	3.55
688	7.1	4.65	4.4	4.9	4.15	3.9	4.05
689	7.9	4.15	3.65	4	4.15	3.9	3.55
690	6.9	3.9	3.5	4.35	4.5	3.9	3.85
691	8.5	4	4.25	5.05	4.55	4.4	4.1
692	6.65	4.7	3.7	4.7	4.35	4.15	3.2
693	8.1	4.1	3.65	5.15	4.45	4.45	3.75
694	7.4	4.2	4.05	4	4.35	4.3	3.65
695	6.95	4.55	3.6	4.25	4.3	4.15	4.15

696	7.15	4.15	3.8	4.9	4.65	3.8	3.65
697	7.8	4.7	4.45	4.1	4.35	4.45	4.05
698	7.3	4.15	3.6	5.1	4.7	4.5	4.1
699	7.8	4.25	4.4	4.15	4.35	4.3	4.1
700	7.55	4.95	3.7	4.4	4.55	4.05	3.8
701	7.3	5	4.4	4	4.3	3.9	3.9
702	7.9	4.2	4.15	5	4.6	4	3.55
703	7.6	4.75	4.4	5.15	4.5	4	3.5
704	7.1	4.15	4.25	4.65	4.2	3.5	3.75
705	7.1	4.8	4.45	4.9	4.65	3.55	3.9
706	7.1	4.95	4.3	4.5	4.15	4.3	3.35
707	6.75	4.45	4	4.65	4.75	4.25	3.6
708	7.1	4.35	4.1	4.3	4.65	3.85	4.15
709	7.25	4.6	4.15	4.2	4.25	3.4	3.3
710	7.4	4.25	4.3	5	4.55	3.75	4.1
711	7.5	4.75	3.5	4.65	4.6	3.8	3.85
712	7.35	4.85	4.2	4.65	4.1	3.95	3.35
713	7.45	4.5	3.45	4.95	4.4	3.55	3.4
714	6.75	4.2	3.95	5.1	4.35	3.3	3.6
715	7.45	3.9	3.75	4.85	4.25	3.45	3.6
716	7.15	4.75	4.15	5	4.2	3.75	3.65
717	6.7	3.6	3.4	4.75	4.3	3.35	4
718	7.35	4.05	4	4.85	4.3	3.35	3.35
719	6.8	3.9	4.15	4.6	4.4	3.8	4.1
720	7.05	4.1	3.8	4.85	4.25	3.95	3.8
721	7.25	4.25	4	4.8	4.1	3.8	3.85
722	6.3	4.1	3.8	4.7	4.05	3.5	3.15
723	6.75	4.3	4.2	4.4	4.15	3.3	3.6
724	6.1	4.55	3.5	4.35	4.5	3.35	3.45
725	6.8	4.6	3.95	4.75	4.05	3.35	3.55
726	7.1	4.25	3.55	4.15	3.8	3.4	3.65
727	7.1	4.2	3.45	4.05	4.2	3.35	3.55
728	6.7	4.35	3.5	4	3.85	3.75	3.4
729	6.5	4.55	3.8	4.55	3.85	3.3	3.25
730	6.4	3.9	4	4.3	4.25	3.65	3.55
731	6.45	4.05	3.65	4.3	4	3.45	3.45
732	6.8	4.2	3.7	4.1	3.9	3.65	3.75
733	6.65	4.25	4.05	4.1	4.15	3.55	3.6
734	7.25	4.35	4.2	4.65	3.85	3.75	3.25
735	6	3.7	4.2	4	4.25	3.85	3.25
736	7.25	4.5	4.05	4.55	3.8	3.3	3.75

737	6.05	4.05	3.9	4.4	4.25	3.95	3.4
738	7.1	4.1	3.25	4.55	4.2	3.65	3.55
739	6.5	4.3	3.4	4.15	3.9	3.95	3.45
740	6.15	3.9	3.35	4.75	3.9	3.85	3.5
741	6.15	4.2	3.5	4.25	4.25	4	3.55
742	6.7	4.3	3.65	4.75	3.95	3.75	3.3
743	6.05	4.6	3.35	4.7	4.2	3.5	3.25
744	6.5	4.3	3.45	4.85	3.95	3.9	3.55
745	6.5	4.55	3.55	5	3.85	3.65	3.55
746	6.35	4.35	3.8	4.85	4	3.75	3.55
747	6.9	4.05	3.6	4.25	3.75	3.75	3.65
748	6.45	4.2	3.75	4.4	3.9	3.3	4.1
749	6.6	3.9	3.35	4.55	4.05	3.7	4.2
750	6.3	4.6	3.35	4.7	4.2	4	2.8
751	6.7	3.6	3.7	4.15	3.85	3.1	3.35
752	6.75	3.85	3.85	4.25	4.1	3.75	3.05
753	6.95	4.35	3.65	4.5	4.05	3.45	2.85
754	6.55	3.85	3.25	4.6	3.8	3.4	3.35
755	6.3	3.9	3.5	4.7	4	3.4	3.25
756	6.85	3.95	3.85	4.25	4.1	3.3	3.2
757	7	4.05	3.3	4.35	4.1	3.6	2.8
758	6.75	4.15	3.55	4.4	4.2	3.2	3
759	6.6	4.2	3.85	4.15	4.15	3.1	3.2
760	6.7	4.45	3.45	4.05	4.15	3.7	3.35
761	5.9	4.7	3.7	3.95	4.05	3.5	3.45
762	5.75	3.6	3.7	4.35	4.1	3.2	3.15
763	6.65	3.75	3.3	4.25	3.95	3.35	2.9
764	6.6	3.65	3.25	3.8	3.8	3.9	3.05
765	6.25	4.05	3.5	4.7	4	3.2	3.15
766	6.3	3.9	3.3	4.2	4.25	3.85	3.2
767	6.35	3.8	3.65	4.15	4.1	3.85	3.2
768	5.55	4.1	3.7	4.3	4	3.45	3.05
769	6.35	4.2	3.7	3.75	3.8	3.6	3.45
770	5.65	4.3	3.35	4.15	3.75	3.35	3.45
771	6.45	4.35	3.7	4.65	4.05	3.7	2.75
772	5.75	3.8	3.9	4.45	3.8	3.7	3.2
773	6.55	3.8	3.3	3.95	4	3.65	2.8
774	6.5	3.85	3.45	4.1	4.25	3.55	3.25
775	6	3.9	3.9	4.05	4.2	3.4	3.2
776	6.65	3.95	3.85	3.7	4	3.55	3.05
777	5.9	3.8	3.35	3.5	3.8	3.5	2.75

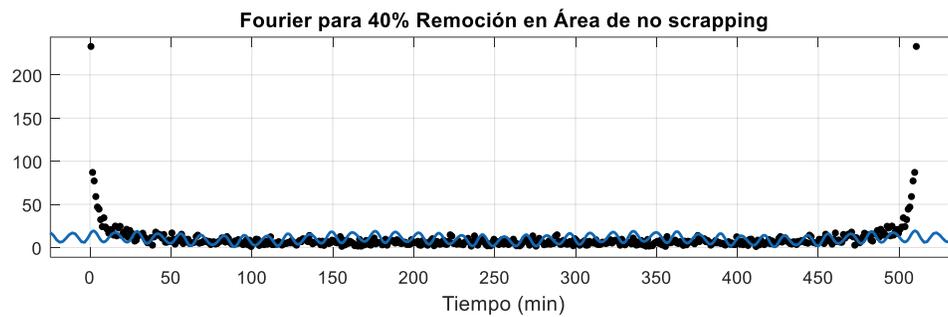
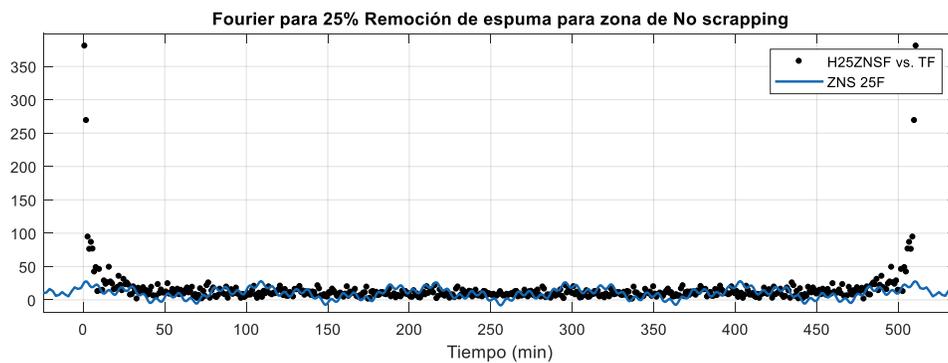
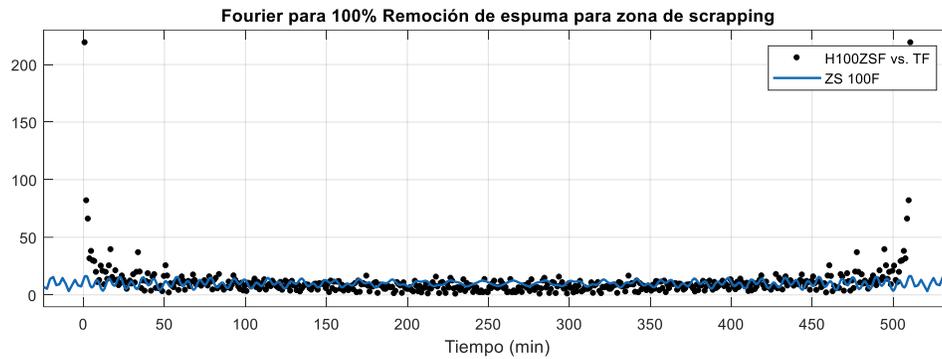
778	6.7	3.9	3.35	3.9	3.9	3.45	3.25
779	5.9	3.6	3.9	4.25	4.25	3.3	3.1
780	5.95	3.7	3.4	3.95	3.8	3.15	3.25
781	6.75	4.05	3.75	3.8	4.25	3.4	2.9
782	5.75	3.75	3.9	4.5	3.85	3.1	3.15
783	6.25	3.9	3.3	4.2	4.2	3.7	2.65
784	6.65	3.9	3.35	4.25	3.8	3.85	2.75
785	6.2	4.1	3.85	4.05	4.05	3.3	2.8
786	5.55	4.25	3.25	3.85	3.8	3.25	2.8
787	6.55	3.9	3.35	3.55	4	3.15	2.8
788	6.05	3.7	3.75	3.85	3.8	3.9	2.6
789	6.4	3.75	3.45	4.1	3.8	3.7	2.6
790	6.75	3.9	3.45	3.6	3.5	3.4	2.9
791	6.75	3.7	3.4	3.6	3.85	3.55	2.85
792	6.35	3.7	3.25	4.25	3.75	3.2	2.85
793	6.7	3.55	3.6	3.7	3.9	3.05	2.85
794	5.5	3.9	3.4	4.3	3.5	3.05	2.85
795	5.95	3.9	3.85	4.45	3.95	3.75	2.9
796	6.15	3.95	3.5	3.9	4	3.75	2.7
797	5.55	3.75	3.35	3.5	3.65	3.1	2.8
798	6.6	3.95	3.75	4.35	3.65	3.2	2.7
799	6.7	3.8	3.9	3.85	3.95	3.4	2.75
800	6.45	3.6	3.4	4.4	3.7	3.2	3
801	5.8	3.9	3.6	3.9	3.5	3	3.1
802	6.55	3.7	3.45	4.3	3.95	3.15	2.8
803	6.25	4.05	3.85	3.75	3.95	3.05	3
804	5.8	3.75	3.4	4.3	3.9	3.15	3
805	5.85	3.55	3.6	4.35	3.9	3.55	2.95
806	6	3.8	3.3	3.95	3.5	3.65	2.9
807	5.85	3.65	3.4	4.2	3.85	3.55	3
808	6.25	4.05	3.45	4.05	3.55	3.6	3.3
809	5.35	3.75	3.5	3.65	3.55	3.2	3.05
810	5.85	3.65	3.25	4.4	3.8	3.3	3.35
811	6.45	3.35	3.65	4.2	3.85	3.1	2.65
812	6.05	3.45	3.2	3.5	3.45	3.25	2.65
813	6.05	3.55	3.15	3.8	3.9	3.3	3
814	5.95	3.6	3.55	4.05	3.8	3.35	3.25
815	5.95	3.7	3.15	4.05	3.6	3.6	3
816	6.05	3.75	3.2	3.9	3.85	3.9	3.35
817	6.3	3.6	3.3	3.75	3.8	3.95	3.1
818	6	3.45	3.55	4.3	3.45	3.4	2.75

819	5.25	3.6	3.4	4.1	3.5	2.9	2.7
820	5.5	3.6	3.55	3.55	3.8	2.65	3
821	6	3.7	3.65	4.2	3.45	3.05	3.1
822	6.45	4.2	3.15	4.45	3.25	2.85	2.65
823	5.8	3.9	3.6	3.9	3.05	2.4	2.8
824	6.25	3.75	3.55	3.9	3.55	3.05	3
825	5.85	3.6	3.2	4.2	3.45	2.4	2.6
826	5.5	3.45	3.5	4.25	3.45	2.55	2.75
827	6.4	3.6	3.15	3.5	3.35	2.25	3.2
828	5.85	3.6	3.25	3.6	3.25	3.2	2.8
829	6.35	3.8	3.2	4.25	3.55	3.2	2.8
830	5.55	3.6	3.45	3.75	3.05	2.05	2.7
831	6.15	3.8	3.3	3.4	3.55	2.75	3.25
832	5.85	4.05	3.2	3.25	3	3.25	3.1
833	5.5	3.8	3.15	3.65	3	3.1	2.7
834	6.3	3.95	3.6	4.05	3.05	2.75	3.25
835	5.4	4.35	3	3.35	3.3	2.5	3
836	5.4	4.5	2.95	3.7	3.15	2.75	3.35
837	6.3	3.4	3.25	3.6	3.05	2.35	3.25
838	5.85	3.55	2.9	4.25	3.05	3.2	2.6
839	5.85	3.75	3.1	3.85	3.3	3.15	3
840	6.1	3.95	3.15	4.1	3	2.6	2.85
841	5.35	3.6	3.15	4.2	3.65	3.2	3.1
842	6.4	3.7	3.2	4.15	3.4	3	2.9
843	6.2	3.75	3.05	3.8	3.6	2	2.9
844	5.75	3.7	3.3	4.15	3.65	2.9	3.15
845	5.95	3.6	2.9	3.7	3.05	2	3.25
846	5.25	3.45	3.2	3.35	3.15	2.2	3.05
847	6.5	3.7	3.3	3.3	3.3	2.7	3.35
848	6.45	3.6	3.1	4	3.65	3	2.9
849	5.7	3.55	3.2	3.6	3.65	3.25	3.2
850	5.25	3.6	3.15	3.75	3.55	2.95	2.95
851	5.85	3.7	3.05	3.3	3	2.25	3.35
852	6	3.75	3.1	3.5	3.4	2.25	3.2
853	5.35	3.6	3	3.65	3.1	2.9	3.3
854	5.5	3.55	3.1	3.4	3.35	2.2	2.6
855	5.75	3.7	3.2	3.8	3.3	2.2	3.15
856	5.75	3.65	3.05	4.2	3.05	3.25	3.3
857	5.6	3.35	3.1	3.25	3.65	2.65	3.05
858	6.15	3.4	3.05	3.3	3.65	2.8	3
859	6.05	3.45	3.15	3.7	3.45	2.5	2.9

860	5.4	3.5	2.95	4.05	3.5	2.65	3.15
861	5.8	3.5	3.3	3.4	3	2.05	3.25
862	5.8	3.45	2.95	3.7	3.05	3	3.35
863	6.25	3.6	3.1	4.1	3.4	3.05	2.6
864	5.35	3.5	3.1	3.55	3.5	2.65	3.3
865	6.25	3.45	3.1	4	3.35	2.2	3
866	6.3	3.25	3.15	3.45	3.65	3.15	3.35
867	5.4	3.6	3.3	3.8	3.55	2	2.85
868	6.2	3.7	3.2	4.1	3	2.85	3
869	6.1	3.35	3.25	4.1	3.4	2.7	2.6
870	5.5	3.4	3	3.85	3.6	2.8	3.25
871	6.4	3.25	3.05	3.5	3.3	2.35	3.2
872	5.6	3.45	3.25	3.4	3.1	2.85	2.6
873	6	3.5	2.9	3.3	3.05	3.2	3.2
874	6.4	3.45	3.2	4.25	3	2.9	2.65
875	6.25	3.25	3.15	3.4	3.5	3	2.85
876	6.4	3.2	3.1	4.15	3.4	2.85	3.35
877	5.25	3.35	2.95	4.05	3.4	3.2	2.75
878	5.35	3.2	3.2	4.05	3.2	2.25	2.6
879	5.85	3.55	2.95	3.35	3.6	2.85	2.95
880	5.9	3.45	3.15	3.4	3.1	2.15	2.6
881	5.85	3.4	3.1	4.2	3.4	3	3
882	6.15	3.2	3.1	3.9	3.05	3.1	3.05
883	6.2	3.4	3.3	3.6	3.2	2.3	3
884	5.85	3.45	3	3.3	3.6	3.25	3.3
885	6.1	3.55	2.95	3.25	3.35	3	3.35
886	5.7	3.6	3.05	3.35	3.15	2.05	3.25
887	5.65	3.45	3	3.45	3.1	3.1	3.05
888	6	3.25	3.05	3.5	3.05	3.25	3.1
889	5.6	3.1	3.25	3.7	3.3	2.2	2.75
890	5.45	3.2	2.95	3.25	3.3	3.15	2.85
891	5.8	3.4	2.95	3.95	3.4	3.1	2.6
892	6.35	3.15	3.2	3.9	3.5	3.1	2.95
893	5.6	3.45	3.25	3.65	3.1	2.05	2.7
894	5.75	3.4	2.7	3.75	3.15	2.15	3.3
895	6	3.55	2.8	3.05	3.2	2.75	2.65
896	5.85	3.45	2.95	3.45	3.05	3.25	3.3
897	6.3	3.4	2.6	3.8	3.65	2.4	2.7
898	5.95	3	2.5	3	3.25	2.3	3
899	4	2.65	2.4	2.9	3.3	2.75	2.75
900	2.85	2.5	2.05	2.45	3.55	2.55	2.5

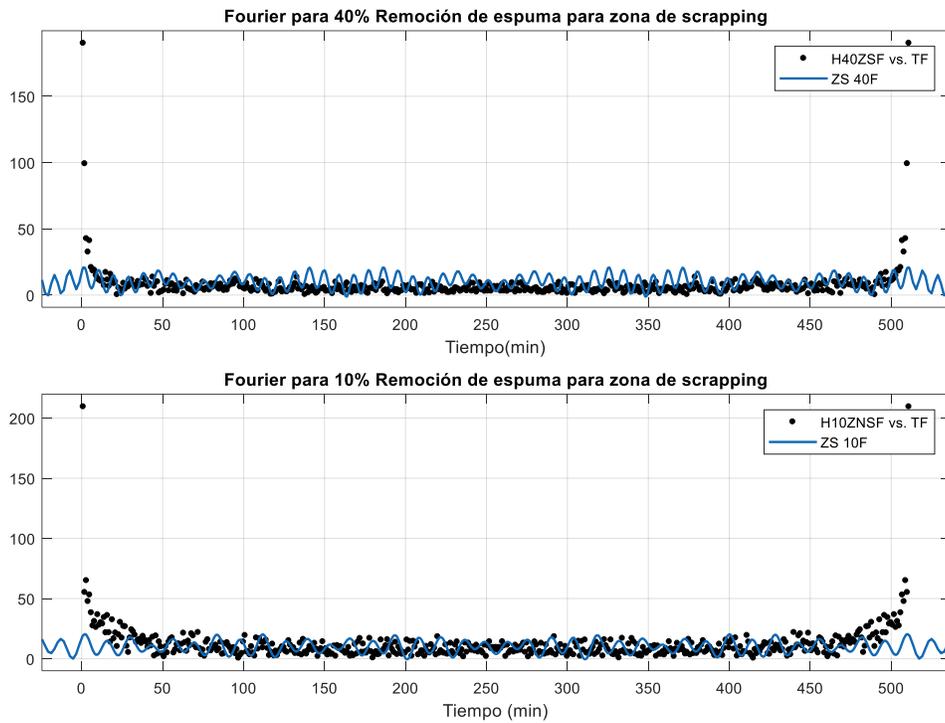
Análisis de Fourier

A continuación se entregarán los gráficos correspondientes a los ajustes



realizados, y sus respectivos períodos.

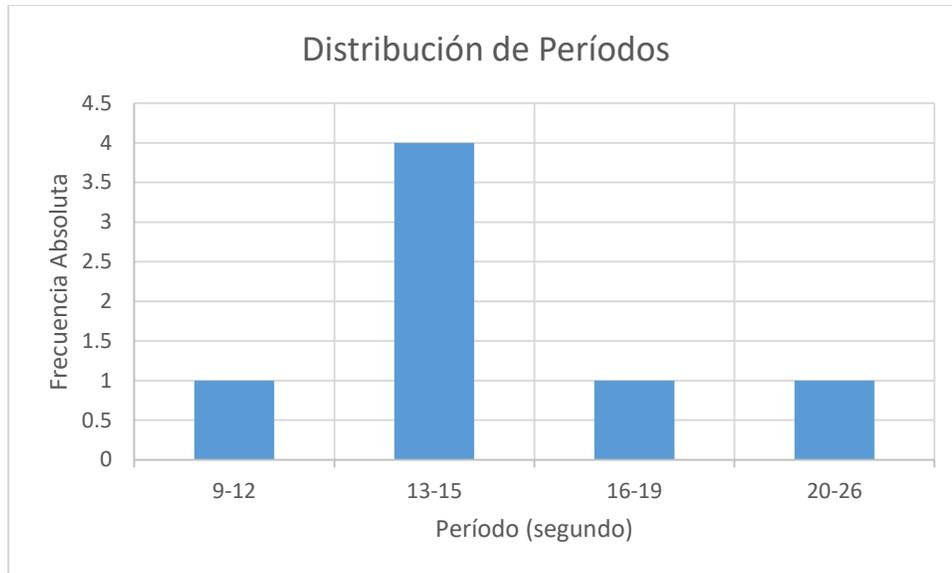




Aquí está su respectiva tabla de valores de ajuste

Variable	10% ZS	25% ZS	40% ZS	100% ZS	10%ZNS	25%ZNS	40%ZNS
p	10	10	7	9	10	10	8
a	7	6	4	6	6	6	6
w1	0.46	0.49	0.68	0.350	0.48	0.24	0.47
c1	0.83	0.16	0.48	1.42	0.55	1.02	0.47
a2	2.50	3.94	3.32	5.95	0.64	-4.10	-3.41
w2	0.24	0.04	0.14	0.89	0.91	0.88	0.16
c2	0.54	1.36	1.20	-0.94	-5.76	3.40	16.62
a3	2.40	1.16	2.04	2.28	-1.44	-8.31	1.73
w3	0.40	0.89	0.72	0.33	0.62	0.06	0.70
c3	0.61	0.18	0.68	1.08	-2.64	-8.23	-5.86
Período	13.75	12.89	9.25	17.97	13.02	26.70	13.35

Luego de ello verificaremos la distribución lograda de estos períodos y ver cómo se comportan, es por ello que se incluyen en un gráfico de barras para asimilar si tiene alguna distribución conocida.

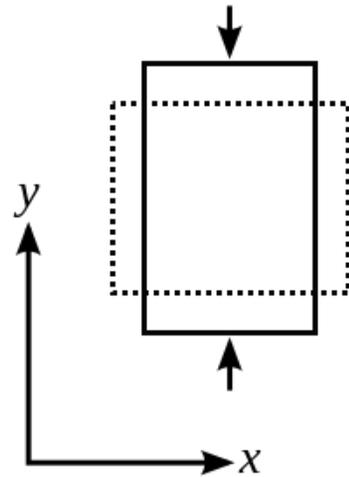


Al observar cómo se distribuyen los períodos previamente calculados, podemos asumir que presentan una distribución Normal, ya que los valores en el centro son presentados con mayor frecuencia que en las colas.

Coeficiente de Poisson

Este coeficiente se calcula con respecto a la espuma, para saber cómo se estira longitudinalmente la espuma con respecto a la deformación que sufre transversalmente. Esto se calcula cuando nosotros removemos una porción de la espuma, la parte restante tiende a expandirse, lo cual genera una disminución de la altura de espuma. Ese valor nos dice cuanto afecta un esfuerzo o deformación

$$\nu = -\frac{\epsilon_{\text{trans}}}{\epsilon_{\text{long}}}$$



en la dirección opuesta.

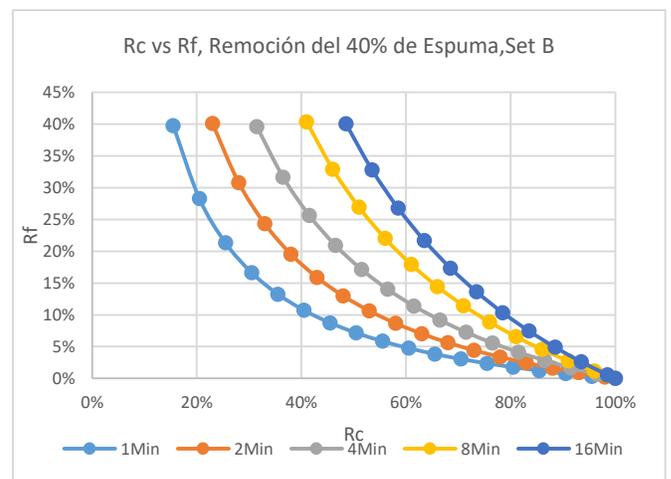
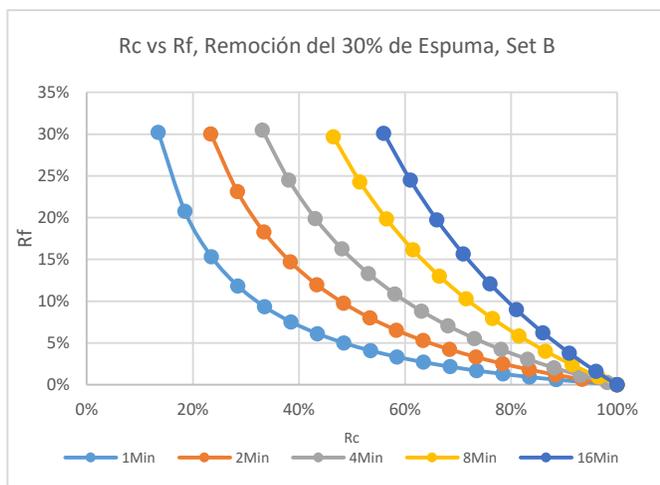
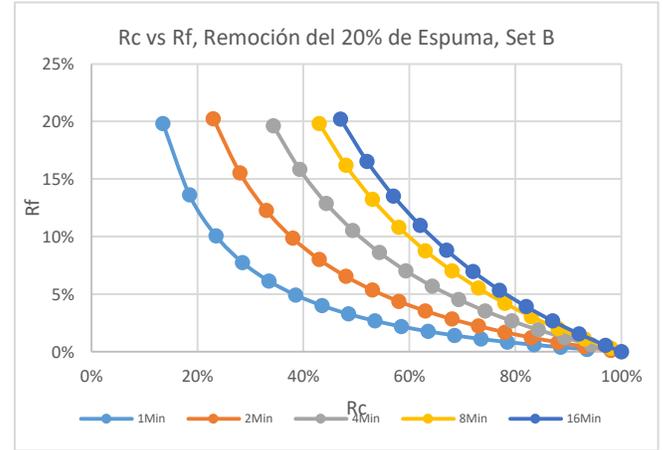
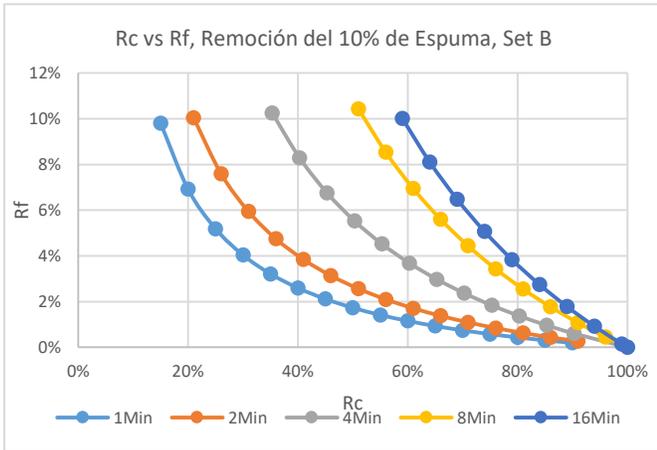
Por ello tomamos la disminución de tamaño de espuma, comparado con el estiramiento ocurrido, correspondiente a la diferencia entre la totalidad de la celda con la porción removida de espuma producto del paleteo. Así obtenemos los siguientes datos.

Remoción de espuma	Deformación transversal	Deformación longitudinal	Poisson
10%	0.1	0.317931793	-0.31453287
25%	0.25	0.5	-0.5
40%	0.4	0.635294118	-0.62962963

ANEXO E: Derivadas, Resultados para las
Estimaciones de R_f y R_c .

Para la Estimación de R_c :

Se adjuntan los gráficos para cada uno de los experimentos, con su set correspondiente.



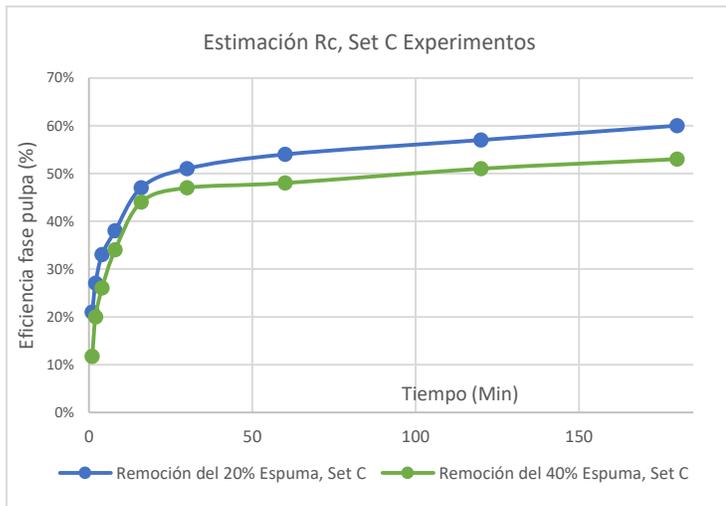


Figura 43: Estimación Rc, Set C

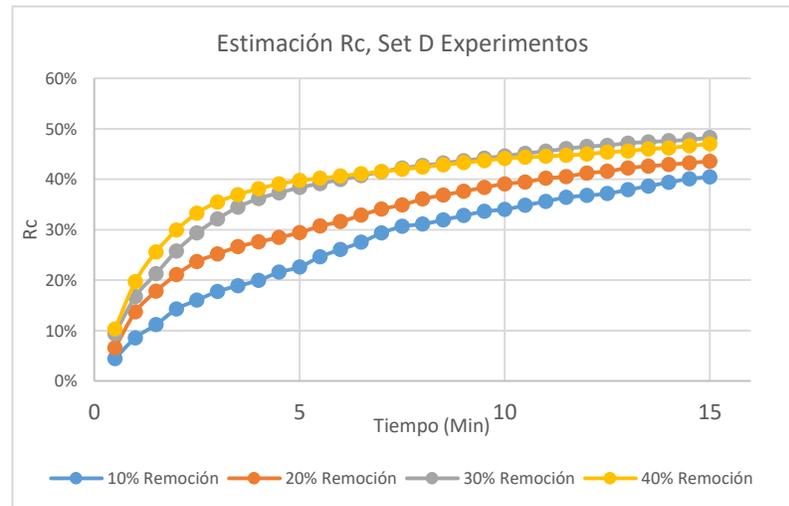
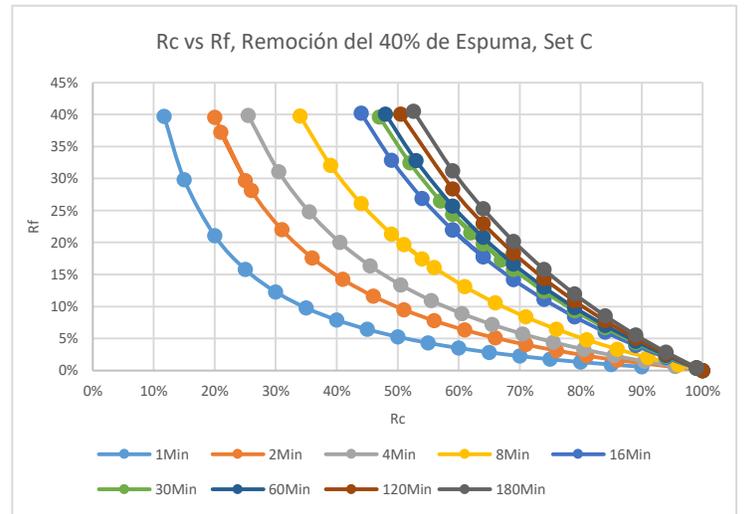
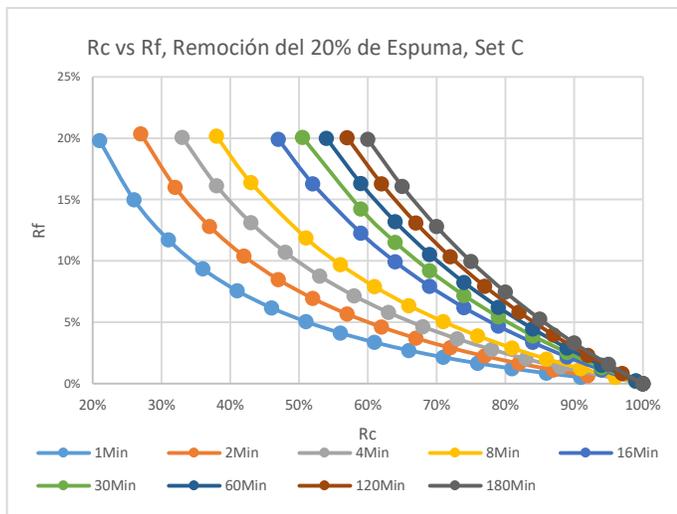


Figura 44: Estimación Rc, Set D



Para estimación eficiencia de espuma en continuo:

Para el caso de la Ecuación original de Savassi (1998) sobre la recuperación en la fase espuma. Se derivará con respecto al tiempo.

$$R_f(t) = \frac{m_c(t)}{J_g * A * B_l(t)}$$

Cada ecuación expuesta de la siguiente manera

$$m_c(t) = m_{cmax} * e^{-k_1 t} \quad (1)$$

y

$$B_l(t) = B_{lmax} * e^{-k_2 t} \quad (2)$$

Derivando, en principio quedaría de esta forma:

$$\frac{dR_f}{dt} = \frac{-m_{cmax} * k_1 * e^{-k_1 t}}{J_g * A * B_l(t)} + \frac{m_c(t) * k_2 * B_{lmax} * e^{-k_2 t}}{J_g * A * (B_l(t))^2}$$

Y simplificada reemplazando las ecuaciones (1) y (2) quedaría

$$\frac{dR_f}{dt} = \frac{-m_{cmax} * k_1 * e^{-k_1 t}}{J_g * A * B_{lmax} * e^{-k_2 t}} + \frac{m_{cmax} * e^{-k_1 t} * k_2}{J_g * A * B_{lmax} * e^{-k_2 t}}$$

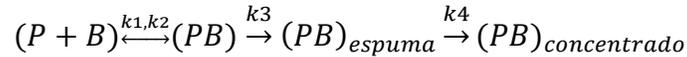
Simplificando finalmente en

$$\frac{dR_f}{dt} = \frac{(-m_{cmax} * k_1 * e^{-k_1 t}) + (m_{cmax} * e^{-k_1 t} * k_2)}{J_g * A * B_{lmax} * e^{-k_2 t}}$$

Estimación mediante agregado partícula burbuja:

Para el otro caso, se resolvió utilizando análogamente un caso similar obtenido en problemas anteriores de Material Docente 2013, Universidad de Chile.

Desde la primera reacción involucrada (Ecuación 11)



Tendremos la siguiente dinámica para cada uno de estos casos.

$$1) \quad \frac{dPB}{dt} = k_1 P - k_2 PB - k_3 (PB)$$

$$2) \quad \frac{d(PB)_{\text{esp}}}{dt} = k_3 (PB) - k_4 (PB)_{\text{esp}}$$

Al resolver los sistemas EDO's, la ecuación final queda de la siguiente forma:

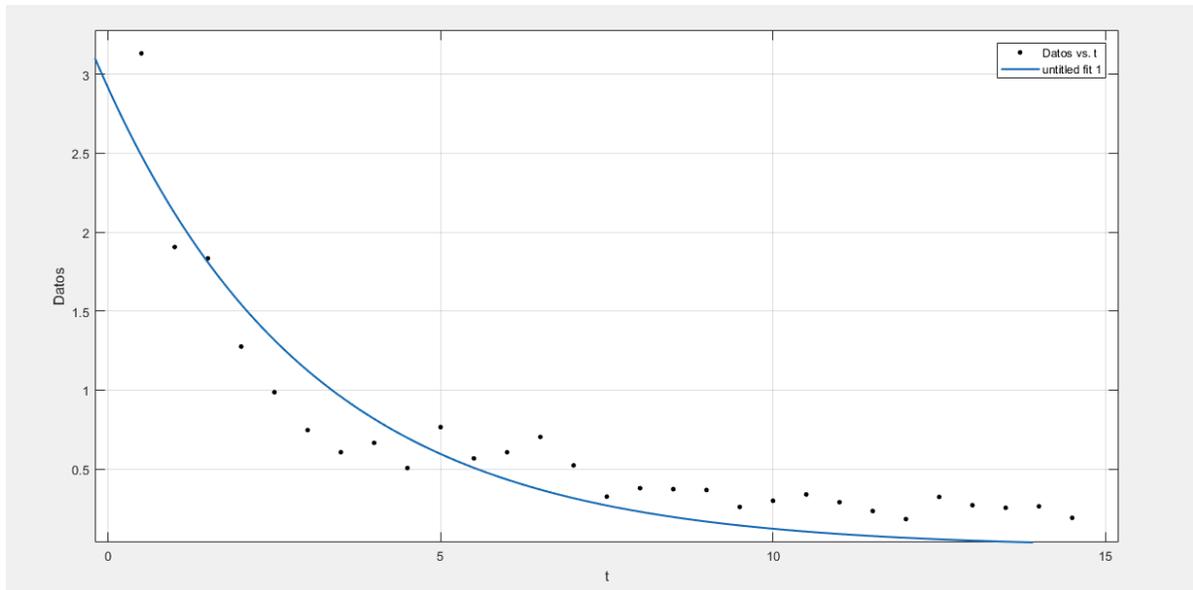
$$(PB) = \frac{k_3 k_1 P}{(k_2 + k_3) k_4} [1 - e^{-k_4 t}] + \frac{k_3 k_1 P}{k_2 + k_3 - k_4} [e^{-(k_2 + k_3) t} - e^{-k_4 t}]$$

Estimación de constante de traspaso en función del tiempo y el área desde pulpa hacia espuma.

Para calcular el k correspondiente a al traspaso, utilizaremos la recuperación de pulpa, asumiendo que la cantidad de mineral alcanzó la fase espuma, sin importar si estas partículas se quedaron, fueron reportadas o volvieron a la pulpa como partículas de dropback, es por ello que este se considerará como valor neto, quiere decir la cantidad de gramos de mineral que ascendió en un minuto para un centímetro de espuma.

Para este análisis utilizamos los datos de la **Figura 27**, los cuales entregan la eficiencia de pulpa, estos datos al estar en tiempos pequeños, los transformaremos en derivadas, para observar el aumento por tiempo de la

recuperación de la fase pulpa. Luego estos datos son divididos por la cantidad de tiempo que fueron muestreados (0.5 minutos), dando la razón de aumento en función del tiempo. Posteriormente, estos valores los cuales están calculados según su remoción de espuma, la cual comprende des 10% hasta 40% son normalizados a solamente la unidad, esto quiere decir 1cm. Finalmente estos 4 valores son promediados con su respectivo error.



Los valores obtenidos se ajustaron según la siguiente ecuación, en MATLAB.

$$\frac{\partial m_{Interf}}{\partial t * \text{Área}} = m * e^{-kt}$$

Obteniendo la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial m_{Interf}}{\partial t * \text{Área}} = 2.911 \pm 0.432 * e^{-0.3174 \pm 0.224 * t}$$

Así podemos observar que la cantidad el aumento de partículas que van llegando a la espuma, va disminuyendo a través del tiempo.

Los datos utilizados estarán a continuación:

Tiempo	Flujo de masa que pasa a través de la interfaz espuma-pulpa				Promedio y error	
	10%	20%	30%	40%	Valor	Error
0.5	4.13	3.57	2.47	2.35	3.13	0.86295037
1	2.60	2.06	1.50	1.46	1.91	0.53689365
1.5	3.09	1.64	1.51	1.09	1.83	0.87162946
2	1.78	1.30	1.19	0.84	1.28	0.3873848
2.5	1.72	0.75	0.92	0.56	0.99	0.51165073
3	1.12	0.73	0.78	0.36	0.75	0.30989578
3.5	1.09	0.47	0.57	0.29	0.61	0.34392017
4	1.60	0.46	0.37	0.23	0.67	0.62984098
4.5	1.04	0.45	0.36	0.17	0.51	0.37433304
5	2.02	0.67	0.27	0.11	0.77	0.86659364
5.5	1.46	0.43	0.26	0.11	0.57	0.61054694
6	1.42	0.64	0.26	0.11	0.61	0.58561318
6.5	1.83	0.62	0.25	0.11	0.70	0.78135427
7	1.33	0.40	0.25	0.11	0.52	0.55027169
7.5	0.43	0.59	0.16	0.11	0.32	0.22744835
8	0.86	0.39	0.16	0.11	0.38	0.34096994
8.5	0.84	0.38	0.16	0.11	0.37	0.33419367
9	0.83	0.37	0.16	0.11	0.37	0.32760731
9.5	0.41	0.37	0.16	0.11	0.26	0.14957292
10	0.80	0.18	0.16	0.05	0.30	0.34193719
10.5	0.79	0.36	0.16	0.05	0.34	0.32670531
11	0.78	0.18	0.15	0.05	0.29	0.32919945
11.5	0.38	0.35	0.15	0.05	0.23	0.15819228
12	0.38	0.17	0.08	0.10	0.18	0.1375307
12.5	0.75	0.34	0.15	0.05	0.32	0.30906069
13	0.74	0.17	0.07	0.10	0.27	0.31379856
13.5	0.73	0.17	0.07	0.05	0.25	0.31800731
14	0.71	0.17	0.07	0.10	0.26	0.30227384
14.5	0.35	0.16	0.15	0.10	0.19	0.11065612

ANEXO F: Número de Reynolds

El número de Reynolds es aquel factor adimensional que sirve para caracterizar el flujo que se produce en una sección, la cual puede ser o no circular. Tenemos diferentes valores que indicarán si un flujo es Laminar, Transicional o Turbulento.

Si el número de Reynolds es menor de 2100 el flujo será laminar y si es mayor de 4000 el flujo será turbulento. El mecanismo y muchas de las razones por las cuales un flujo es laminar o turbulento es todavía hoy objeto de especulación.

Ecuación de Reynolds para tuberías no circulares

$$Re = \frac{\rho * v_s * D_H}{\mu}$$

- ρ =Densidad del fluido
- v_s =Velocidad característica del fluido
- $D_H = \frac{4*Área}{Perímetro}$ =Diámetro hidráulico de la tubería*
- μ =Viscosidad dinámica del fluido

Para el caso de esta memoria, el flujo tenderá a una forma de Anillo, ya que el movimiento se genera producto de la velocidad de giro del Impeler en la celda, por ello el fluido se mueve en la misma dirección, formando una especie de anillo con centro en el Impeler. La velocidad del fluido irá disminuyendo a medida que nos alejamos del impeler, llegando a velocidades cercanas a 0 en las paredes de la celda, esto es por la distribución de velocidades que ocurre en una sección cerrada.

Es así que con los siguientes valores mostrados en la tabla adjunta

Densidad (kg/m3)	Diámetro Hidráulico (cm)	Viscosidad dinámica (Pa*s)	Velocidad fluido (m/s)
1214	1.428	0.001002	1.6575±1.3

A la velocidad no se puede asumir que es una sola para toda la sección, por la distribución de velocidad. Es por esto que nuestro Reynolds tendrá un valor de

28676± 22490. Lo cual demuestra un flujo turbulento, así corroborando que existe un régimen uniforme en toda la celda.