

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAISO
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA



PROYECTO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL EN METALURGIA EXTRACTIVA

**“ESTUDIO PARA DISMINUIR CONSUMO DE
CAL EN PLANTA CONCENTRADORA
CODELCO ANDINA”**

Roxana Cárdenas Díaz

Profesor Guía:

Alvaro Aracena Caipa

2014

“Dedicado a mis padres, por su apoyo incondicional y su amor verdadero”

AGRADECIMIENTOS

Primero quisiera agradecer a mis padres: Luis Cárdenas y Marina Diaz, quienes me dieron todo su amor, apoyo y me inculcaron que con esfuerzo, siempre se puede, por ser pilares fundamentales en el logro de esta importante etapa de mi vida y encontrar en ellos el apoyo para nunca rendirme, nunca me cansare de agradecerles todo lo que han hecho por mí.

A mi amado Alvaro Tello por estar conmigo en todas, por la complicidad, por hacer los momentos difíciles más fáciles, por la paciencia durante este tiempo juntos, por tener siempre una palabra de aliento cuando lo necesite, espero sigas siendo partes de cada uno de mis logros en el futuro, agradezco también a su familia por hacerme parte de ellos.

A mi familia hermanos, tíos, primos, en especial mis tías regalonas Ximena y Cristina Cortes, por el cariño siempre presente, por la constante preocupación y por estar en cada momento que lo necesite, gracias por darme una linda familia.

A todos mis amigos y compañeros de la universidad, a todos por su amistad, a Xenia, Naty y Yerko gracias por ser un gran apoyo en esta carrera que juntos recorrimos.

A mi profesor guía Alvaro Aracena infinitas gracias por su paciencia y dedicación quien tuvo que disponer de su tiempo para ofrecerme la guía necesaria, por su ayuda y consejos constantes, por acompañarme en el camino para lograr mi título.

Agradezco A don Hernan Villarroel que confió en mí y me dio la oportunidad de entrar a Andina y desarrollar este trabajo, a don Patricio Gaete y Fernando Castañeda, por brindándome toda su ayuda y apoyo durante mi estadía, transformándose en grandes amigos y compañeros de labores, les agradezco todo el apoyo otorgado tanto dentro como fuera del ámbito laboral cuya ayuda es impagable, y a todas aquellas personas de Andina que colaboraron en la realización del trabajo

Y finalmente a mi ángel, mi abuelita que sin duda un gran apoyo en cada meta que me he puesto, si bien ella partió antes que comenzara este camino, no dudo lo orgullosa que debe estar mirándome desde el cielo. Gracias Mami

Muchas gracias a todos lo que me apoyaron durante este proceso

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	1
PROBLEMA.....	1
OBJETIVO GENERAL.....	2
Evaluar la calidad de la cal y el efecto de quebracho como depresor de pirita para la disminución del consumo de cal.....	2
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE.....	3
2.1 QUEBRACHO.....	3
2.2 CAL.....	5
CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO.....	6
3.1 FLOTACIÓN.....	6
3.1.1. Mecanismos de Flotación.....	6
3.1.2 Reactivos utilizados en flotación.....	9
3.2. QUEBRACHO.....	12
3.2.1 Mecanismo depresor sobre pirita.....	14
3.2.2 Características fisico- químicas del Quebracho.....	15
3.4. CAL.....	16
3.4.1. Curvas de solubilidad y Kps de la cal.....	16
3.4.2. Formación de Cal.....	17
3.4.3. Depresión de Pirita por la cal.....	20
3.4.5. Impurezas contenidas en la cal.....	25
3.4.6. Estabilidad de la cal en el tiempo.....	25
3.4.7. Reactividad de Cal.....	26
3.4.8 Reactividad de Cal según norma Reactividad ASTM C-110.....	27
3.4.9 Lechada de Cal.....	28
CAPÍTULO IV: EMPRESA.....	30
CAPÍTULO V: TRABAJO EXPERIMENTAL.....	37
5.1 PREPARACIÓN DE REACTIVOS.....	37
5.1.1 Preparación concentración Quebracho.....	37
5.1.2 Reactivos de Flotación.....	37

5.1.3 Preparación Cal.....	38
5.2 TRABAJO CON QUEBRACHO	39
5.2.1 Trabajo Preliminar	39
5.2.2 Pruebas asignadas	39
5.2.4 Cinética de Molienda.....	40
5.2.5 Pruebas de Flotación Rougher	40
5.2.6 Pruebas Cinética de Flotación.....	41
5.3 CAL.....	43
5.3.1 Índice de Reactividad según Norma ASTM-C110	43
5.3.2 Índice de Reactividad utilizando agua de planta.	44
5.3.3 Índice de Reactividad con distintas leyes de cal	45
5.3.4 Índice de Reactividad con distintas temperaturas de agua.....	46
CAPÍTULO VI: RESULTADOS Y DISCUSIONES	47
6.1 REACTIVO DEPRESOR DE FeS ₂ , QUEBRACHO.....	47
6.1.1 Pruebas Preliminares	47
6.1.2 Preparación de muestras de mineral mixto	49
6.1.3 Pruebas de Flotación Rougher.....	53
6.1.5 Cinética de Flotación.....	56
6.2 EFECTO DE LA REACTIVIDAD DE CAL	60
6.2.1 Índice Reactividad a distintas razones agua: cal, según norma ASTM C-110	60
6.2.1 Índice Reactividad a distintas razones agua: cal, con agua fría	66
6.2.2 Índice de Reactividad con diferentes leyes de cal	68
6.2.3 Índice de Reactividad con diferentes temperaturas de agua	70
6.2 PUESTA EN MARCHA DE FORMA AUTOMATICA LA PLANTA DE CAL	74
6.3.1 Funcionamiento Planta de Cal n°2	74
6.3.2 Diagnostico Planta	75
6.3.3 Puesta en Marcha en forma automática Operación Slaker 4, planta de cal 2	77
CAPÍTULO VIII: CONCLUSIONES	82
RECOMENDACIONES	83
CAPÍTULO VII: BIBLIOGRAFIA.....	84
CAPITULO VIII: ANEXOS	85
ANEXO A: MEMORIA DE CÁLCULO	86
ANEXO B: PROCEDIMIENTOS DE LABORATORIO	88

Anexo B.1[12]: Índice de Reactividad o Apagado de Cal	88
Anexo B.2: Consumo de Cal.....	89
Anexo B.3: Cinética de Molienda.....	89
Anexo B.4: Flotación Rougher	91
Anexo B.5: Cinética de Flotación	92
ANEXO C: RESULTADOS TRABAJO EXPERIMENTAL.....	94
C.1: Cinética de Molienda.....	94
C.2: Flotación Rougher.....	96
C.3: Consumo de Cal durante la flotación Rougher.....	98
C.4: Cinética de Flotación	100
C.5: Perfil granulométrico muestra de cal.....	104
C.6: Reactividad según norma ASTM C-110	105
C.7: Perfil granulométrico lechada	106
C.8: Consumo de cal mineral SAG y convencional.....	107
C.9: Reactividad de Ca con agua fría	109
C.10: Reactividad de Cal con distintas leyes de Cal inicial.....	110
C.11: Reactividad de Cal con distintas leyes de Cal inicial.....	111
C.12: Reactividad de Cal con agua fría y precalentada.....	112

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1: Interacción entre la partícula y la burbuja en la flotación.....	7
Figura 3.2: Ángulo de contacto.....	8
Figura 3.3: Troncos de Quebracho.....	12
Figura 3.4: Extractos de Quebracho.....	14
Figura 3.5: Curvas de Solubilidad.....	16
Figura 3.6: Esquema de los ciclos de preparación de la Cal; la distribución y el consumo de la lechada de cal en DAND.....	20
Figura 3.7: Recuperación de Pirita vs pH.....	21
Figura 3.8: Influencia de la oxidación superficial sobre el efecto depresor del calcio a pH 9.....	21
Figura 3.9: Recuperación de pirita con cal y soda caustica.....	22
Figura 3.10: Comportamiento de pirita en presencia de grupos hidroxilos.....	22
Figura 3.11: Reactivación de la pirita al disminuir el pH.....	23
Figura 3.12: Comportamiento de la pirita, oxidada y no oxidada, con cal y con soda caustica.....	23
Figura 3.13: Comportamiento de la pirita oxidada.....	24
Figura 3.14: Recuperación de pirita y Molibdenita según pH.....	25
Figura 3.15: Gráfico de reactividad en agua.....	28
Figura 4.1: Diagrama de Flujos Flotación Colectiva Cu- Mo.....	31
Figura 4.2: Diagrama de procesos planta de cal 2.....	32
Figura 4.3: Control de pH Molienda SAG y Unitaria 2 y propuesta de adición de Quebracho.....	33

Figura 4.4: Diagrama de adición de lechada de cal en la molienda Convencional y propuesta de adición de Quebracho.....	34
Figura 4.5: Diagrama de adición de lechada de cal en molienda unitaria una y propuesta de adición de Quebracho.....	35
Figura 4.6: Diagrama de adición de lechada de cal en flotación colectiva.....	36
Figura 6.1: (A) Recuperación Cu, Mo y Fe con material proveniente de la línea SAG a diferentes pH. (B) Recuperación Cu, Mo y Fe con material proveniente de la línea convencional a diferentes pH.....	48
Figura 6.2: Perfiles granulométricos obtenidos para cada tiempo de molienda 0,15 y 16.....	50
Figura 6.3: P ₈₀ y %>65# versus tiempo de molienda.....	51
Figura 6.4: Consumo de cal a pH10.5 en kilogramos por toneladas de mineral.....	55
Figura 6.5: Recuperaciones Cinética de Flotación (A) Cu, (B) Mo, (C) Fe y (D) Insoluble.....	56-57
Figura 6.6: Perfil Granulométrico muestra Cal.....	60
Figura 6.7: Temperatura generada por la reactividad de la cal según norma ASTM C-110...	61
Figura 6.8: Diferencia de temperatura a los tres minutos de reacción.....	62
Figura 6.9: Granulometría lechada de cal.....	63
Figura 6.10: Efecto del volumen de agua versus la granulometría de la lechada.....	64
Figura 6.11: Consumo de Cal (A) proveniente de molienda convencional, (B) proveniente de molienda SAG.....	65
Figura 6.12: Temperatura generada por la reactividad de la cal a diferentes razones con agua fría.....	66
Figura 6.13: Diferencia de temperaturas a los tres minutos de reacción con agua fría.....	67
Figura 6.14: Comparación diferencias de temperatura con agua precalentada versus agua fría.....	67
Figura 6.15: Temperatura generada por la reactividad de las distintas leyes de cal.....	69
Figura 6.16: Leyes de lechada de cal con diferentes leyes iniciales.....	70
Figura 6.17: Perfil granulométrico nueva muestra de cal.....	71
Figura 6.18: Tiempo de reacción total para distintas razones y diferentes temperaturas de agua.....	71
Figura 6.19: Leyes de lechada de cal a diferentes temperatura.....	72
Figura 6.20: Polvo en suspensión, planta de cal 2.....	76

Figura 6.21: Filtraciones específicas en planta de cal número 2.....	76
Figura 6.22: Acumulación de rechazo en planta de cal número 2.....	77
Figura 6.23: Operación en forma automática Slaker 4 planta de cal 2.....	79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Características Físico- Químicas de Quebracho.....	15
Tabla 3.2: Kps de los compuestos de cal.....	17
Tabla 3.3: Propiedades químicas de la cal.....	18
Tabla 3.4: Normas y requisitos para realizar el ensayo de reactividad de la cal.....	26
Tabla 5.1: Dosis Quebracho.....	37
Tabla 5.2: Dosis Reactivos.....	38
Tabla 5.3: Parámetros apagado de cal.....	38
Tabla 5.4: Condiciones operacionales pruebas de flotación Rougher.....	41
Tabla 5.5: Condiciones operacionales pruebas cinética de flotación.....	42
Tabla 5.6: Programa experimental pruebas de reactividad según norma ASTM C-110.....	44
Tabla 5.7: Programa experimental pruebas de reactividad con agua a temperatura fría.....	45
Tabla 5.8: Programa experimental pruebas de reactividad con distintas leyes de cal.....	45
Tabla 5.9: Programa experimental pruebas reactividad misma ley, distintas temperaturas....	46
Tabla 6.1: Resultados recuperaciones Cu, Mo y Fe de las pruebas preliminares.....	49
Tabla 6.2: Análisis Mineralógico.....	52
Tabla 6.3: Análisis Químico.....	53
Tabla 6.4: Resultados recuperaciones prueba flotación Rougher.....	53
Tabla 6.5: Parámetros de balance y diseño de la planta de cal 2 de DAND.....	75

NOMENCLATURA

TMA: Toneladas métricas anuales

DAND: División Andina

SAG: Semiautogeno

ASTM: American Society for Testing and Materials, asociación internacional que define estándares de características de materiales

MIBC: Metil Isobutil Carbonil

RESUMEN

Esta propuesta se basa en la optimización del consumo de unos de los insumos más importante que necesita una planta concentradora de cobre; la cal, que se usa actualmente en División Andina de Codelco Chile. Esta propuesta surge debido a que los gastos en este insumo han aumentado considerablemente, se han visto con ello afectados los gastos operacionales de la planta. Pruebas realizadas con anterioridad demuestran que no ha variado el tipo de mineral entrante la planta, por lo tanto el problema está en el insumo. Para ello se realiza un estudio con el fin de detectar los principales fallas tanto en la calidad del insumo como en su preparación y así poder proponer un proyecto que busca como objetivo principal disminuir el consumo de cal y así poder operar de la mejor manera posible, sin tener gastos excesivos.

Para comenzar el desarrollo de esta propuesta, primero se entrega la información general de consumo de cal sobre los procesos involucrados en el tratamiento de minerales sulfurados en planta, como son las etapas de molienda y flotación. Luego se hizo un estudio en el proceso de flotación con un nuevo reactivo llamado quebracho, en donde su objetivo era disminuir el consumo de cal depresando pirita, entregando como resultados una disminución insignificante de cal. Posterior a estas pruebas se realizaron una serie de ensayos con muestras de cal a diferentes dosis para ver su reactividad y definir si es la calidad de esta la que afecta en el aumento de su consumo. Como resultado se observó que efectivamente fue la forma de preparación de la cal el motivo del incremento lo cual llevó a una lechada de cal mal preparada que no cumple con su objetivo de alcalinizar el sistema.

Luego se realizó una puesta en marcha de la actual planta preparadora de cal, pero con los parámetros que entregaron mejores resultados en la pruebas de laboratorio, el problema de DAND es que ellos tienen una planta preparadora de lechada de gran eficiencia y última tecnología pero opera erróneamente, trabajan con la planta en forma manual y no dejan que el equipo prepare lechada de forma automática, es por esto que se realizaron ensayo en planta de forma automática los que arrojaron excelentes resultados.

Las conclusiones obtenidas indican que no es necesario incorporar el reactivo quebracho a la etapa de flotación por que no entrega resultados positivos, con respecto a la cal, esta es de buena calidad pero para disminuir su consumo debe ser preparada de forma exacta para que

no hallan gastos excesivos, es necesario reinstruir a los operadores para que trabajen la planta preparadora de lechada de forma automática y así aprovechar al 100% este insumo.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

PROBLEMA

Codelco Chile División Andina, con su política de mejoramiento constante a sus procesos productivos entrega la misión de realizar un trabajo práctico de investigación a escala de laboratorio para conocer el efecto de nuevos reactivos en la etapa de flotación colectiva (Cu-Mo), con el propósito de una futura implementación a escala industrial, además de un mejoramiento en el funcionamiento de las actuales plantas productoras de lechada de cal. Este mejoramiento es debido a su paulatino aumento en el consumo de cal, principal insumo utilizado en la concentradora.

Además de utilizar la cal como reactivo alcalinizante de la solución, también es utilizado para depresar pirita, principal ganga en la flotación de minerales sulfurado, es por esto que para contrarrestar este efecto, se realizarán pruebas con un nuevo reactivo llamado Quebracho, una alternativa más económica que promete depresar pirita y con esto disminuir el consumo de cal.

El objetivo de estas pruebas es obtener los antecedentes necesarios para validar el uso de este reactivo en la flotación Rougher, de modo que entregue resultados para ver la factibilidad de ser usados bajo las condiciones operacionales que se manejan actualmente en la planta, de ser necesario se modificaran los actuales parámetros operacionales para obtener mejores resultados metalúrgicos.

Se evaluará, la calidad de la cal, esto debido al incremento en el gasto de cal viva por día, es decir en junio del 2012 se compraban 78 ton cal viva diaria, pero en febrero 2103 aumentó su consumo a 104 ton/día.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la calidad de la cal y el efecto de quebracho como depresor de pirita para la disminución del consumo de cal.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Realizar pruebas de flotación Rougher con reactivo Quebracho.
2. Evaluar metalúrgicamente la cal.
3. Optimización de preparación de la cal

CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE

2.1 QUEBRACHO

La flotación de sulfuros de cobre requiere de reactivos depresores específicos para la pirita. Hay estudios que muestran el efecto de depresores orgánicos sobre los sulfuros. Algunos muestran resultados interesantes, sobre todo cuando se trata de extractos naturales como el Quebracho que tienen bajo impacto en el medio ambiente; a continuación se muestran dos de ellos:

Ciribeni et. al.^[1] realizaron un estudio que tuvo como finalidad conocer las condiciones bajo las cuales los Extractos de Quebracho modificados, FLOATÁN® producidos por Unitán Saica, se comportan como depresores de Pirita. Para los ensayos de micro-flotación se utilizó cristales de pirita pura y la calcopirita se obtuvo realizando varias limpiezas sobre un concentrado de flotación; como reactivo colector se utilizó amil xantato de potasio, como modificador de pH se empleó carbonato de sodio. Se estableció la flotación estándar para el rango de pH de 8 a 11, utilizando agua corriente como medio. Los resultados de la flotación estándar mostraron una recuperación para ambos minerales entre 80 y 90 % para todo el rango de pH. Las pruebas realizadas con 17 mg/l del modificador FLOATÁN® T1 muestran que las curvas de flotación de ambos minerales son prácticamente coincidentes demostrando un fuerte efecto depresor. La presencia del ion cobre en el medio acuoso, inhibe el efecto depresor de FLOATÁN® T1 sobre la calcopirita. Al aumentar la dosis de FLOATÁN® T1 a 24 mg/l. se produce mayor activación de calcopirita mientras permanece deprimida la pirita. La presencia de iones calcio colabora con la depresión de pirita por el modificador FLOATÁN® T1 en concentración de 17 mg/l, aún en presencia de iones de cobre en los pH 9 y 10. La depresión de pirita con 17 mg/l de FLOATÁN® T1, depende en cada caso del pH del medio.

Por otro lado, Sarquís et. al.^[2] estudiaron la recuperación de molibdenita desde concentrados globales de Cu-Mo usando extracto de quebracho como depresor. Los resultados de las flotación estándar con reactivos colectores y espumantes para sulfuros de cobre, versus una con acondicionamiento previo con 300 g/ton de extracto de quebracho, fueron bastantes similares, en el rango ácido hay una ligera disminución en la flotabilidad del cobre y cuando el pH es mayor que 9.5 no se determinaron cambios en la recuperación de cobre, lo que indicaría que en el medio alcalino el quebracho no se adsorbe sobre los sulfuros de cobre y no

modifica su hidrofobicidad. La Molibdenita, en cambio, muestra una baja en la recuperación utilizando extractos de quebracho especialmente a pH ácido, sin este reactivo es casi invariable en un valor de 90% salvo una ligera disminución a pH de 10.5, lo que es una consecuencia de la menor flotabilidad de este sulfuro a pH demasiado alcalino. Los siguientes ensayos fueron de cinética de flotación entre 1 y 8 minutos a pH 4.5, lo que arrojó como resultado que la recuperación de cobre tiene un rápido aumento, en el primer minuto se flotó el 80%, en cambio solo el 4.6% del Molibdenita fue flotado. Los resultados siguientes muestran que cuando el consumo de extracto de quebracho es mayor a 500 g/ton se produce una caída en la recuperación del cobre del orden del 3 al 5%. Se concluyó que un gasto de quebracho del orden de los 400 g/ton es satisfactorio, con este consumo la recuperación de Mo es superior al 80%. El efecto depresor del quebracho sobre los sulfuros de cobre es limitado cuando el mineral de cobre mayoritario es la calcopirita y si además hay una reducida presencia de minerales secundarios.

2.2 CAL

En División Andina se tiene un estudio sobre la evaluación metalúrgica de diferentes tipos de cal pero de data desconocida. A continuación se presenta un resumen de tal trabajo:

Con el propósito de evaluar metalúrgicamente el comportamiento de diferentes muestras de cal (CAL SOPROCAL – CAL IMPORT – CAL BRASILEÑA ITAU), se realizaron pruebas de flotación Rougher estándar y pruebas de flotación en test de ciclo abierto. Se realizó un test de reactividad, que permite analizar el nivel de reactividad que presenta cada muestra procesada. El procedimiento consistió en mezclar diferentes proporciones de cal viva en un volumen fijo de agua (20, 40, 60, 80, 100 gr de cal en 100 ml agua y 100 gr cal en 500 ml agua) y registrar la temperatura en lapsos de tiempo predeterminados (30 segundos a 20 minutos) donde se anota la temperatura obtenida para ese instante.

Las pruebas demostraron que todos los tipos de cal evaluadas no presentan variaciones en los resultados metalúrgicos, es decir, son comparativas en cuanto a recuperación de Cu, Mo, Fe. Se apreció una diferencia en el consumo de cal apagada para lograr los pH establecidos en la flotación, en la cual la cal Brasileña ITAU presentó el menor consumo de cal. Sin embargo, y en base a las conclusiones obtenidas en el trabajo, no se consideró el consumo efectivo de cal como CaO, pues las leyes de CaO activo fueron diferentes (88.37%; 90.95%; 88.09%) para los tipos de cal evaluados, 88.37%; 90.95%; 88.09% respectivamente. En cuanto a la reactividad falta establecer una comparación más afinada entre la cal SOPROCAL v/s cal ITAU. Esto debido a que en algunos resultados comparativos de reactividad de Cal ITAU presentaría una reactividad menor.

CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO

3.1 FLOTACIÓN

La flotación³ es un proceso fisicoquímico usado para separar minerales finamente divididos en líquidos, adhiriéndolos a burbujas de gas para proveer la flotación selectiva de partículas sólidas. Es el proceso más económico y utilizado extensivamente para separar minerales químicamente similares y para concentrarlos con el propósito de llevarlos a una fundición.

Las burbujas de aire actúan como globos y poseen el empuje suficiente para llevar ciertas partículas del mineral a la superficie donde una espuma estable retiene el mineral y permite retirarlo como concentrado.

3.1.1. Mecanismos de Flotación.

El proceso de flotación está basado en las propiedades hidrofílicas e hidrofóbicas de los sólidos a separar. Se trata fundamentalmente de un fenómeno de comportamiento de sólido frente al agua, o sea, de la mojabilidad de los sólidos. Los metales nativos, sulfuros de metales o especies tales como grafito, carbón bituminoso, talco y otros, son poco mojables por el agua y se llaman minerales hidrofóbicos. Por otra parte, los minerales como óxidos, sulfatos, silicatos, carbonatos y otros son hidrofílicos, es decir, mojables con el agua.

Las burbujas de aire se pegan a las partículas si éstas desplazan el agua de su superficie, (comportamiento hidrofóbico), siempre y cuando el conjunto de partículas adheridas a las burbujas de aire tenga una densidad global inferior a la del medio de separación, estas podrán viajar junto con las burbujas hacia la superficie, no obstante se requiere que la burbuja tenga la resistencia suficiente para llegar a la superficie sin romperse. Una vez que las burbujas de aire alcanzan la superficie, se requiere que se forme una espuma que mantenga retenida las partículas, porque de lo contrario las burbujas se reventarán y las partículas flotadas viajarán de nuevo hacia el fondo de la celda de separación.

Por otra parte las partículas no hidrofóbicas que tengan una densidad superior a la del medio en el que ocurre la separación se hundirán. El proceso de separación se puede observar en la Fig. 3.1.

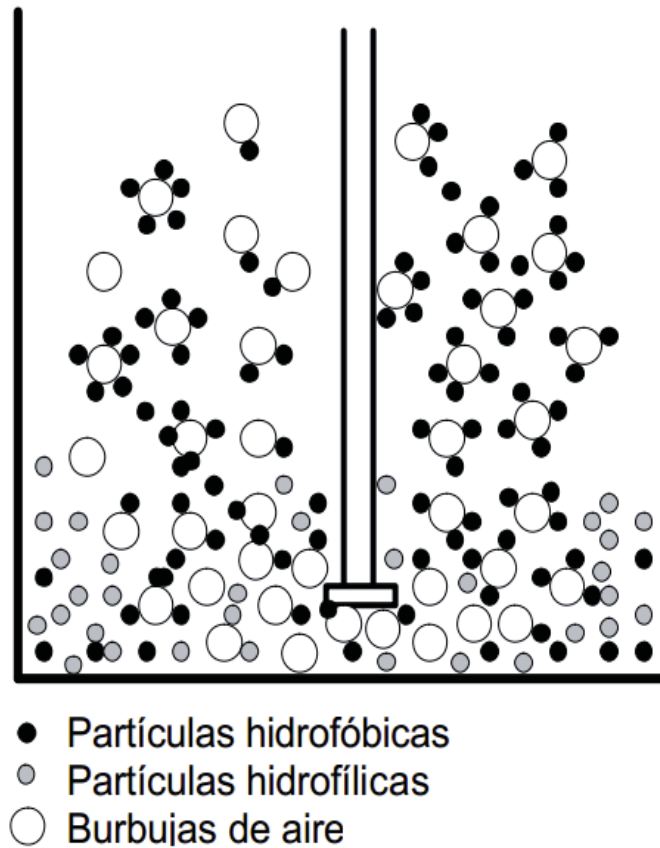


Figura 3.1: Interacción entre la partícula y la burbuja en la flotación.

La recuperación de la especie valiosa depende de la cantidad de partículas transportadas a la superficie (flotadas), por lo tanto, la estabilidad y el tamaño de las burbujas de aire que las transporta influyen directamente en la recuperación.

El proceso de flotación se lleva a cabo en celdas que poseen mecanismos de agitación y dispositivos de inclusión de aire a la pulpa o al líquido de separación. La agitación favorece la separación y suspensión de las partículas, mientras que la inclusión de aire promueve la formación de burbujas. La estabilidad de las burbujas de aire, necesarias para evitar que estas se destruyan antes de llegar a la superficie del medio de separación, se logra mediante la adición de espumantes. La adecuada selección del espumante utilizado para estabilizar las burbujas de aire es uno de los parámetros que controlan la recuperación.

El enriquecimiento que se puede lograr a través de la flotación depende de la selectividad de los reactivos colectores, depresores y activadores estos se encargan de convertir la superficie de las partículas en hidrofóbicas, por lo tanto se requiere de la selección de un colector que

tenga la capacidad de modificar superficialmente tan sólo las partículas de la especie de interés.

La actividad de la superficie de una partícula respecto a los reactivos de flotación en el agua, depende de las fuerzas que actúan en su superficie. Las fuerzas de tensión generan un ángulo entre la superficie de la partícula y la superficie de la burbuja (Fig. 3.2), de tal forma que:

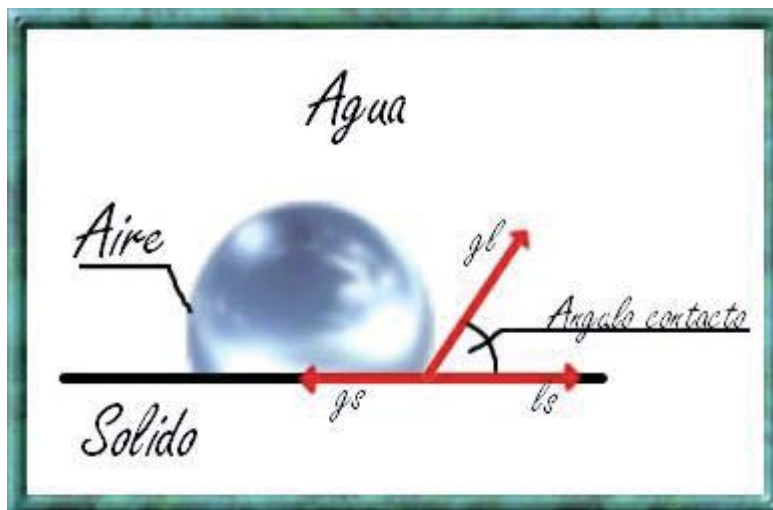


Figura 3.2: Ángulo de contacto

Para romper la interfaz partícula - burbuja es necesario aplicar una fuerza, conocida como trabajo de adhesión (W_{gs}), el cual es igual al trabajo necesario para separar la interfaz sólido aire y producir las interfaz separadas aire – agua y sólido agua, es decir:

$$W_{gs} = F_{ls} + F_{gl} - F_{gs} \quad (1)$$

Por lo tanto,

$$W_{gs} = F_{gl}(1 - \cos(\alpha)) \quad (2)$$

Mientras mayor sea el ángulo de contacto mayor será el trabajo de adhesión entre la partícula y la burbuja y mayor será la elasticidad del sistema ante las fuerzas de rompimiento, por lo tanto la flotabilidad del sistema aumenta con el ángulo de contacto.

Un mineral con un ángulo de contacto grande tiene un comportamiento aerofílico (mayor afinidad con el aire que con el agua), a pesar de que la mayor parte de los minerales son

aerofílicos, es necesario agregar un colector para mejorar su hidrofobicidad (haciéndolos aún más aerofílicos), para que el proceso de separación sea más efectivo.

3.1.2 Reactivos utilizados en flotación

Es necesario incrementar la propiedad hidrofóbica en las partículas minerales de una pulpa para facilitar la flotabilidad. Esto se efectúa con los reactivos llamados colectores. La partícula queda cubierta por el colector que se adhiere a su superficie por medio de su parte polar, proporcionándole con la parte polar propiedades hidrofóbicas.

La adición de espumante, permite la formación de burbujas de tamaño y calidad adecuada para el proceso. El contacto partícula-burbuja se acerca hasta el punto en que la película de agua que las separa.

Los reactivos son sustancias que promueven, intensifican y modifican las condiciones óptimas del mecanismo físico-químico del proceso. Estos pueden clasificarse en: Colectores, Espumantes y Modificadores

Los colectores son sustancias orgánicas que se adsorben en la superficie del mineral, confiriéndole características de repelencia al agua (hidrofobicidad), por sus condiciones físicas y químicas, hacen que las partículas mineralizadas se adhieran a las burbujas formadas por el espumante, esto hace que la fuerza de atracción sólido-gas se anteponga por sobre la fuerza del sólido- líquido. Los siguientes son los principales colectores utilizados en flotación en División Andina.

- Tionocarbamato X-23^[4]: Dosis en planta: 22 g/ton mineral. Composición química, Alquilitiocarbaminato, es usado como colector primario de sulfuros de cobre, es líquido de color amarillento claro a rojizo, temperatura de ebullición 217°C, densidad 0.98 g/cm³, pH aproximadamente 5.2 (20°C)
- Diesel^[4]: Dosis en planta: 10 g/ton mineral .Composición química Hidrocarburo. El aceite diesel se usa en la flotación como agente colector de Molibdenita. Es un líquido tornasolado, oleoso, inflamable. El producto que se emplea en el concentrador tiene una densidad de 0.85 g/cm³ a 15.6 °C. Peso específico 0.85 g/cm³. Punto de inflamación sobre 51.7 °C

Los espumantes son agentes tensoactivos que se adicionan para formar y estabilizar la espuma, para la adherencia y levantamiento de la partícula. Esto se logra impartiendo cierta dureza temporal a la película que cubre la burbuja. Su principal función es disminuir la tensión superficial del agua, mejorar la cinética de interacción burbuja - partícula y disminuye el fenómeno de unión de dos o más burbujas (coalescencia), este reactivo permite que la burbujas mantengan su forma sin deshacerse por efecto de las presiones. Los siguientes son los principales espumantes utilizados en División Andina.

- Metil Isobutil Carbonil^[4] (MIBC): Dosis en planta: 14.7 g/ton minera. Es usado ampliamente en la flotación de minerales sulfurados. La espuma producida por el MIBC se quiebra más rápido que la obtenida con otro espumante, esta menor persistencia es ventajosa en aquellos casos en que se desea recuperar molibdenita de minerales de Cobre o cuando se desea obtener un manejo adecuado de los concentrados en las instalaciones en las cuales un exceso de espumación no es recomendable. Es incoloro, insoluble en agua, no presenta propiedades corrosivas, de olor dulce y picante, tiene un peso molecular de 102 g/mol, una densidad de 0.807 g/cm³, punto de ebullición 130°C, punto de inflamación 41°C.

Los modificadores son reactivos tales como activadores, depresores o modificadores de pH, se usan para intensificar o reducir la acción de los colectores sobre la superficie del mineral. Los siguientes son los principales modificadores utilizados en División Andina.

- Hidróxido de Calcio (Ca(OH)₂): La lechada de Cal es usada ampliamente en el proceso de flotación, para regular la alcalinidad o pH de la pulpa. Se produce cuando la cal viva reacciona energéticamente con el agua produciéndose cal apagada y con un respectivo desprendimiento de calor. El apagado de Cal produce, además de calor, aumento de volumen del sólido por efecto de la hidratación. Esta cal apagada es adicionada al proceso de flotación como agente regulador de pH, este reactivo se adiciona principalmente en la molienda y en la flotación selectiva.
- Silicato de Sodio^[4] (Na₂SiO₃): Es usado en los procesos de flotación de minerales como desfloculante en minerales tales como la calcita, fluorita, baritina, cobre, cuarzos y otros silicatos. En las operaciones de flotación, el silicato mantiene las partículas indeseables de la ganga en la fase del agua, mientras que las partículas de menas son

llevadas a la superficie por las burbujas de aire. Los silicatos aumentan la flotabilidad del mineral, actuando además como depresor de gangas, además disminuye la superficie de contacto entre el mineral y el líquido, favoreciendo la aireación del agua por la formación de burbujas más pequeñas. Tiene una densidad 1.36 g/cm^3 a $20 \text{ }^\circ\text{C}$, pH 12.

3.2. QUEBRACHO

Los extractos de quebracho^[5] son usados en diferentes procesos mineros. Han sido utilizados desde la década de 1930 para la depresión de carbonatos minerales y como depresor de pirita en la flotación de zinc. Existe una nueva familia de extractos de quebracho modificados y desarrollados para aplicarlos en procesos de flotación como depresores y dispersantes.

Son reactivos orgánicos naturales, extraídos del quebracho. Se aplican en bajos consumos y por tratarse de productos de origen natural, se presentan como una alternativa limpia con relación a los reactivos tradicionales. Su aplicación no sólo permite mejorar la selectividad sino, en algunos casos, mejorar la recuperación de los minerales valiosos.

El quebracho proviene de extractos vegetales, son mezclas complejas de taninos, polímeros y polifenoles de origen natural, que se obtienen por tratamiento con agua caliente de tejidos de ciertos árboles que crecen en el norte de Argentina y Paraguay (Fig 3.3). El extracto obtenido de cada planta es típico de esa especie. Por esa razón, uno no puede reemplazar un extracto con otro y esperar conseguir los resultados idénticos en la aplicación.



Figura 3.3: Troncos de Quebracho

Es utilizado como depresor selectivo de los sulfuros de hierro en relación a los minerales de cobre, en particular la Pirita. Sus ventajas son que es un reactivo no tóxico y biodegradable, buena recuperación, reduce la cantidad de reactivos, buena solubilidad, mayor selectividad, son bastante estables tanto en el medio ácido como alcalino, excepto en los valores extremos

del pH y a temperaturas altas. La dosis a utilizar varía de acuerdo al tipo de mineral tratado y en las etapas en que se adiciona.

Las moléculas poli-funcionales de estos reactivos tienen una importante capacidad de adsorción en la superficie de los minerales, además de la presencia de grupos hidroxilos en los principales núcleos fenólicos que la forman. La adsorción puede ser el resultado de la unión tipo puente de hidrógeno con el oxígeno accesible de la superficie.

La empresa Unitan SAICA fabrica extractos de quebracho (Fig. 3.4) adaptados para aplicaciones específicas^[6]. Estos son:

- Floatan T0: Deprime carbonatos en flotaciones de minerales no metalíferos también actúa sobre las partículas finas presentes en áreas de alteraciones argílicas, mejora la flotación de fluoritas. Su dosis varía en el rango de 50-500 g/ton mineral.
- Floatan T1: Depresor de los carbonatos y silicatos y se usa en la flotación de Fluorita y de otros minerales de tipo sales polares además de depresar partículas finas y optimiza la acción de los reactivos de flotación. En combinación con Floatan M3 incrementa significativamente la recuperación de oro y cobre de menas de sulfuros. Su dosis varía en el rango de 50-200 g/ton mineral.
- Floatan T5: Depresor de minerales de ganga y de pirita sobre todo en la flotación de minerales de cobre, tiene acción efectiva sobre sercicita y clorita, minerales que aparecen en la periferia de los yacimientos diseminados consumiendo reactivos debido a su alta superficie específica. Su dosis varía en el rango de 40-100 g/ton mineral
- Floatan M3: Dispersante, evita la adsorción de partículas finas de ganga sobre la partícula de sulfuros, optimizando la acción del colector. Dispersa significativamente partículas finas, alcanzando una velocidad de sedimentación de 0.6 cm/min. Su dosis varía en el rango de 40-100 g/ton mineral



Figura 3.4: Extractos de Quebracho

3.2.1 Mecanismo depresor sobre pirita

Las moléculas de los polímeros orgánicos contienen un gran número de grupos con fuerte afinidad por el agua (OH, COOH, CO, COH, NH₂, NH, SO₃H y otros). Existe alguna imprecisión en cuanto al carácter aniónico o catiónico de estos reactivos, muchos de estos agentes cambian su carácter cuando reciben algún tratamiento previo a su utilización.

El mecanismo de depresión de los polímeros orgánicos con la superficie de la pirita, depende del carácter del grupo funcional. El grado de afinidad de estos grupos varía para los distintos minerales y condiciones del medio, por ello, aunque son menos específicos que los reactivos inorgánicos, los depresores orgánicos son particulares para cada mineral.

La interacción y por lo tanto la acción depresora de los polisacáridos es atribuida a uniones de los grupos hidroxilos de los reactivos con cationes en la superficie del mineral. Respecto de las reacciones superficiales se señala la existencia de uniones de tipo puente de hidrógeno.

La falta de un conocimiento acabado sobre el mecanismo de interacción entre los depresores orgánicos y la pirita, llevó a realizar estudios donde se encontró que las reacciones entre la dextrina y los cationes metálicos son dependientes del pH.

3.2.2 Características físico- químicas del Quebracho

La Tabla 3.1 contiene las características físico- químicas de los tres tipos de quebracho utilizados en las pruebas de flotación.

Tabla 3.1: Características Físico- Químicas de Quebracho

Identificación	FLOATAN T5	FLOATAN T1	FLOATAN M3
Composición	Mezcla Compleja de Polifenoles	Mezcla Compleja de Polifenoles	Mezcla Compleja de Polifenoles
Estado Físico	Polvo	Polvo	Polvo
Color	Marrón Rojizo	Marrón	Marrón Rojizo
Olor	Agradable	Agradable	Agradable
Punto Ebullición	170 °C	170 °C	170 °C
pH	6.5-6.8	4.0-4.6	8.0-10
Estabilidad	Estable en condiciones normales	Estable en condiciones normales	Estable en condiciones normales
Inflamable	No	No	No

Los extractos de quebracho son una mezcla de Polifenoles naturales extraídos mediante agua caliente del árbol del quebracho, es un polvo de color rojizo, estable, no tóxico y biodegradable, no inflamable y estable a condiciones de presión y temperaturas normales, estos son:

3.4. CAL

3.4.1. Curvas de solubilidad y Kps de la cal

La Fig. 3.5 ilustra la solubilidad del Óxido e Hidróxido de calcio con respecto a la temperatura en °C. Los datos de solubilidad fueron obtenidos del libro La Cal: ¡En un reactivo químico!^[7]

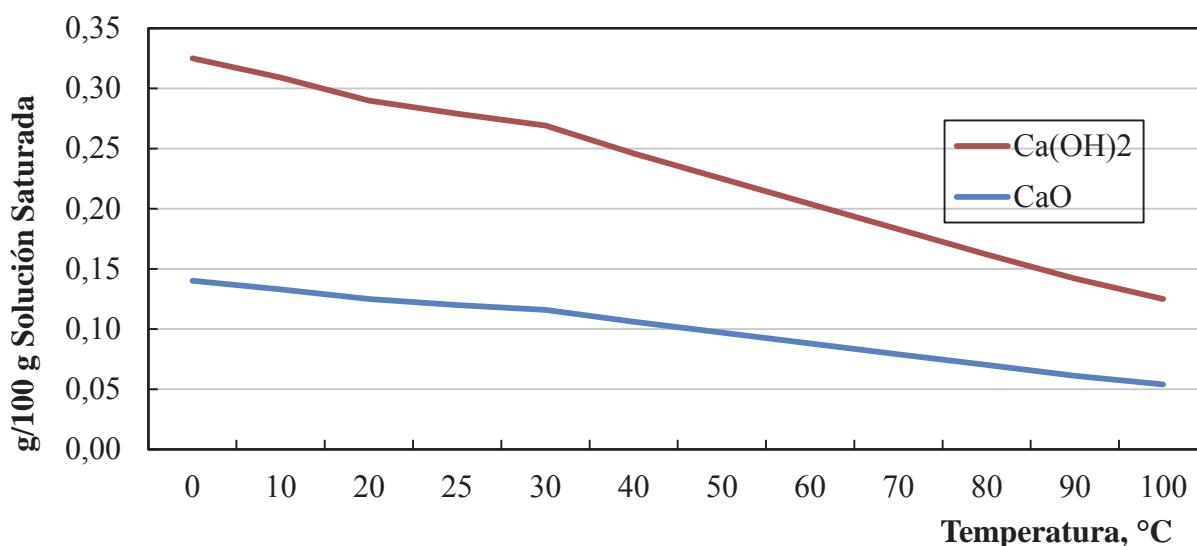


Figura 3.5: Curvas de Solubilidad

La solubilidad de la cal industrial en agua, no varía más de un 7% que la solubilidad de la cal teóricamente pura. Estas diferencias se deben probablemente a la presencia de trazas de hidróxidos de sodio y potasio, en cambio el magnesio, sílice y carbonatos no tienen efectos sobre la solubilidad de la cal, pero sí en la razón de solución y su alcalinidad.

El tamaño de partículas (que es analizado en el tema lechada de cal) tiene una considerable influencia sobre la solubilidad. La cal recién apagada, cuyo tamaño de partícula es pequeño, es alrededor de un 10% más soluble que la partícula gruesa de la cal apagada y envejecida. Este efecto se debe al crecimiento de las partículas secas de cal durante su envejecimiento.^[z]

La Tabla 3.2 muestra el Kps de los compuestos químicos formados por la cal, a 18 y 25 °C cada uno, el que indica la solubilidad de un compuesto, cuanto menor sea su valor menos soluble será el compuesto.

Tabla 3.2: Kps de los compuestos de cal

Compuesto	Nombre	Kps	Temperatura (°C)
CaCO ₃	Carbonato de Calcio	0.99x10 ⁻⁸	18
CaCO ₃	Carbonato de Calcio	4.8x10 ⁻⁹	25
CaC ₂ O ₄	Oxalato de Calcio	2.6x10 ⁻⁹	18
CaC ₂ O ₄	Oxalato de Calcio	1.78x10 ⁻⁹	25
CaCrO ₄	Cromato de Calcio	2.3x10 ⁻²	18
CaCrO ₄	Cromato de Calcio	7. .x10 ⁻⁴	25
CaF ₂	Fluoruro de Calcio	4.0x10 ⁻¹¹	18
CaF ₂	Fluoruro de Calcio	3.4x10 ⁻¹¹	25
Ca(OH) ₂	Hidroxido de Calcio	8.0x10 ⁻⁶	18
Ca(OH) ₂	Hidroxido de Calcio	5.5x10 ⁻⁶	25
Ca ₃ (PO ₄) ₂	Fosfato de Calcio	2.0x10 ⁻²⁹	18
Ca ₃ (PO ₄) ₂	Fosfato de Calcio	2.0x10 ⁻³³	25
CaSO ₄	Sulfato de Calcio	2.0x10 ⁻⁴	18
CaSO ₄	Sulfato de Calcio	6.1x10 ⁻⁵	25
CaC ₄ H ₄ O ₆	Tartrato de Calcio	7.7x10 ⁻⁷	18
Ca(IO ₃) ₂	Iodato de Calcio	6.44x10 ⁻⁷	18

3.4.2. Formación de Cal

Para la obtención de la cal viva, ya sea calcítica o carbonato de calcio (CaCO₃), dolomítica (CaCO₃*MgCO₃), es necesario sobrepasar la presión de disociación que ejerce el carbonato correspondiente, mediante reacción endotérmica (calcinación), para liberar el anhídrido carbónico (CO₂)y lograr el monóxido metálico correspondiente. La Tabla 3.3 muestra las propiedades químicas de los distintos tipos de cal viva.

Tabla 3.3: Propiedades químicas de la cal

Carbonato de Calcio	Calcítica	Dolomítica
Fórmula	CaCO ₃	CaCO ₃ *MgCO ₃
Gravedad Específica	2.65-2.75	2.75-2.9
Densidad (g/cm ³)	1.39-1.52	1.39-1-52
Cal Viva	Calcítica	Dolomítica
Fórmula	CaO	CaO*MgO
Gravedad Específica	3.2-3.4	3.25-3.45
Densidad (g/cm ³)	0.88-0.96	0.88-0.96
Cal Apagada	Calcítica	Dolomítica
Fórmula	Ca(OH) ₂	Ca(OH) ₂ *Mg(OH) ₂
Gravedad Específica	2.3-2.4	2.4-2.6
Densidad (g/cm ³)	0.4-0.56	0.4-0.56

La cal se obtiene por calcinación del mineral primario carbonato de calcio, a partir de la siguiente reacción:



Es posible calentar el carbonato de calcio a presión atmosférica hasta temperaturas algo mayor de 500°C., sin que llegue a disociarse; se ha comprobado experimentalmente, que por sobre los 550°C, éste comienza a perder CO₂ (dióxido de carbono) y sobre los 882°C, se descompone totalmente en CaO (cal viva), siempre y cuando se elimine el CO₂, el cual tiene una presión definida.

En los procesos de concentración de minerales sulfurados de cobre, la cal se utiliza para modificar el pH de la pulpa de flotación, de manera de alcanzar la selectividad necesaria para el proceso mediante una mejor acción de los reactivos espumantes y colectores sobre la superficie mineral.

La cal apagada se produce por la reacción de la cal viva con agua, con formación del hidróxido de calcio y liberación de calor al ambiente (reacción exotérmica):



La lechada de cal se produce al poner en contacto la cal viva con un exceso de agua en los reactores y estanques de apagado, los que sirven de almacenamiento y de traspaso a los sistemas de transporte hidráulico de lechada que dispone la planta concentradora, a través de

los denominados loop de cal. Es la lechada de cal en definitiva, el reactivo que se utiliza para controlar el pH en los procesos de concentración de minerales sulfurados de cobre y molibdeno.

La Planta Concentradora de DAND cuenta con cuatro lazos de control “loop” para la distribución de lechada de cal y así satisfacer los requerimientos de consumos en cada una de las unidades de procesamiento de la pulpa mineral, estos son:

- Loop de Cal para Molienda Unitaria 1
- Loop de Cal para Molienda Convencional
- Loop de Cal para Molienda SAG y Sub Loop Molienda Unitaria 2

En la Fig 3.6 el esquema de lo descrito anteriormente

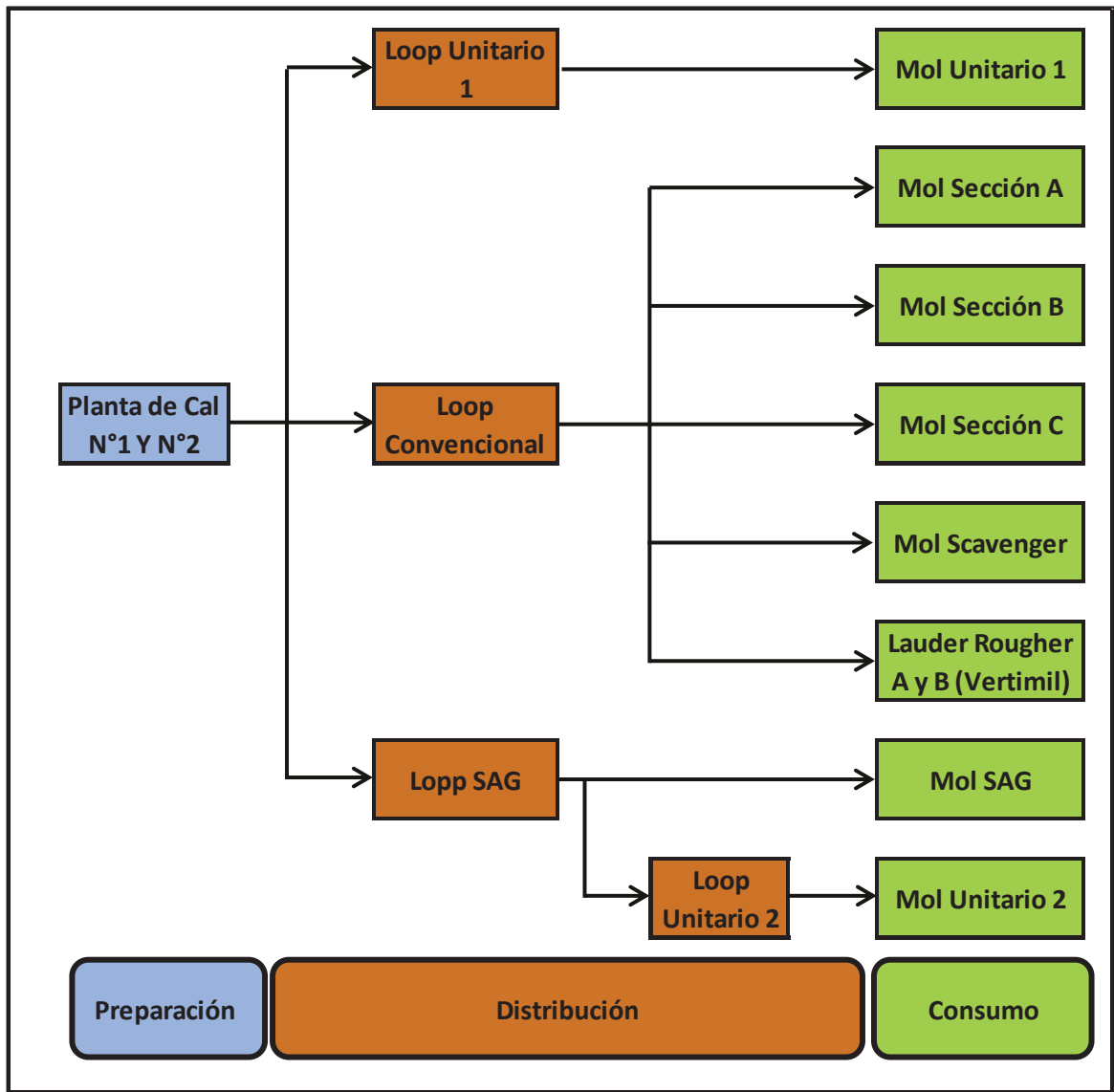


Figura 3.6: Esquema de los ciclos de preparación, la distribución y el consumo de la lechada de cal en DAND.

3.4.3. Depresión de Pirita por la cal

La pirita se depresiona con cal en las etapas de limpieza donde se usa pH entre 11 - 12, que es una forma indirecta de regular el agregado de cal. La Fig. 3.7 ilustra el efecto del pH en la recuperación de pirita, calcocita y calcopirita.

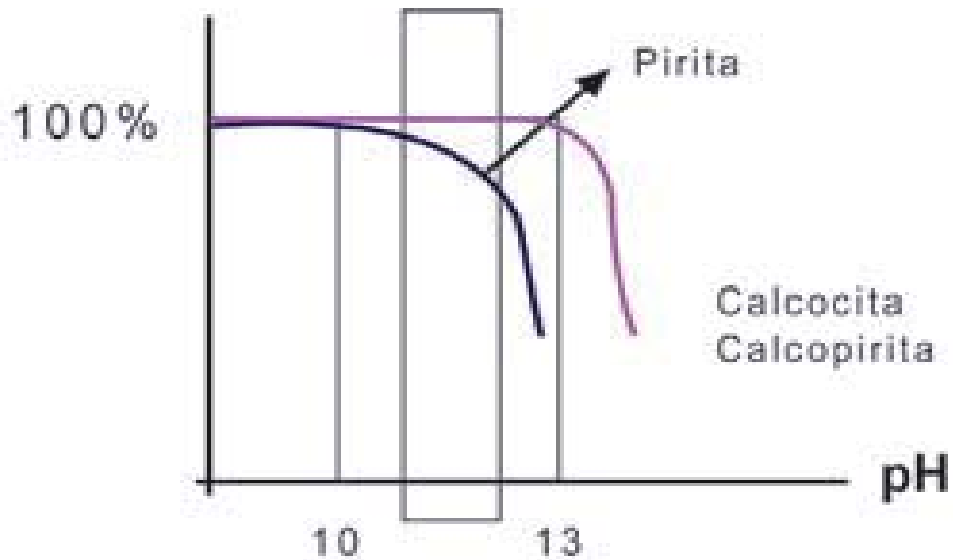


Figura 3.7: Recuperación de Pirita vs pH

El grado de oxidación superficial también es importante en determinar el efecto depresor de la cal, como se aprecia en las curvas de la Fig.3.8

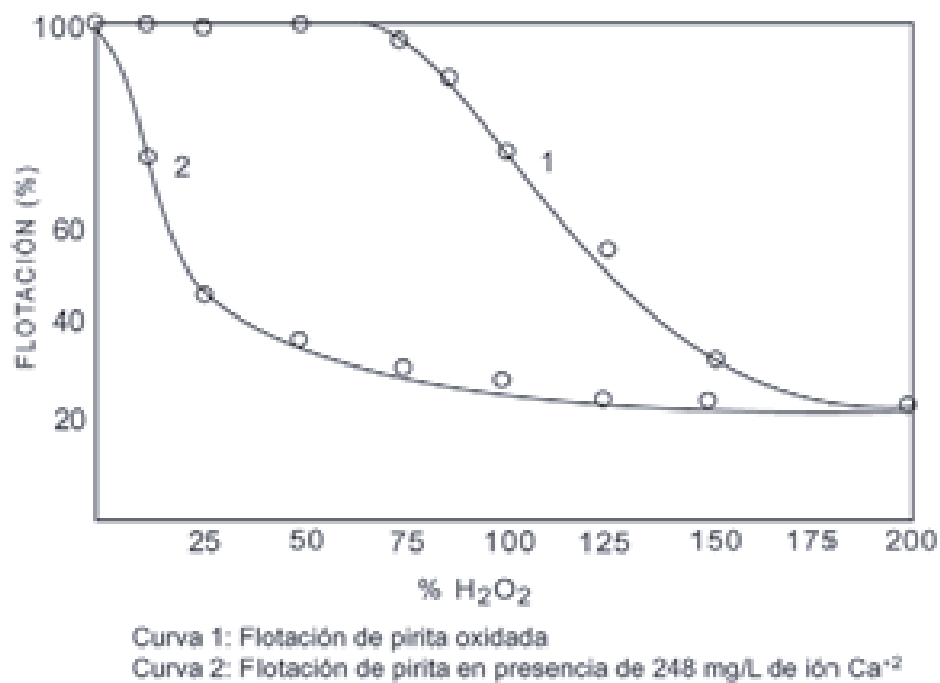


Figura 3.8: Influencia de la oxidación superficial sobre el efecto depresor del calcio a pH 9

Una pirita oxidada superficialmente mediante agua oxigenada (peróxido de hidrógeno) se hace más sensible a la depresión con cal. En cambio, una pirita a la cual se le restituye una superficie sulfurada mediante pretratamiento con sulfuro de sodio, se hace más resistente a la

depresión con cal. Por lo tanto, para separar la pirita de la calcocita y calcopirita, se debe regular el pH según lo indicado en la Fig.3.7

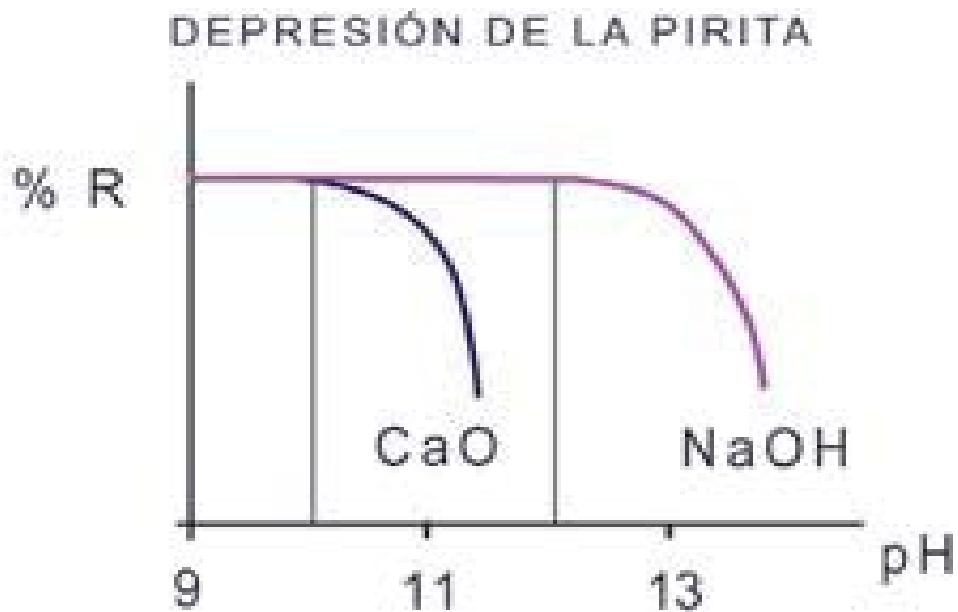


Figura 3.9: Recuperación de pirita con cal y soda caustica

En realidad, la depresión no es por pH, sino por la cal, según lo muestra la Fig. 3.9.

Los iones Ca^{+2} se adsorben sobre la superficie de la pirita y generan un cambio superficial que depresiona la pirita, tal como se ilustra en las Fig. 3.10.

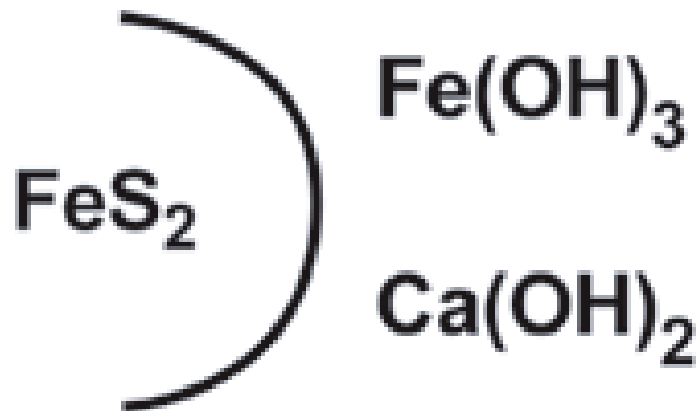


Figura 3.10: Comportamiento de pirita en presencia de grupos hidroxilos

Estos hidróxidos forman una capa superficial con propiedades hidrofílicas, por lo que el colector no es adsorbido, pues no se forma dixantógeno X₂. El X₂ le confiere flotabilidad a la pirita. Si la pirita es depresada con cal, se puede reactivar bajando el pH. Al disminuir el pH se disuelven los hidróxidos, según se aprecia en la Fig. 3.11

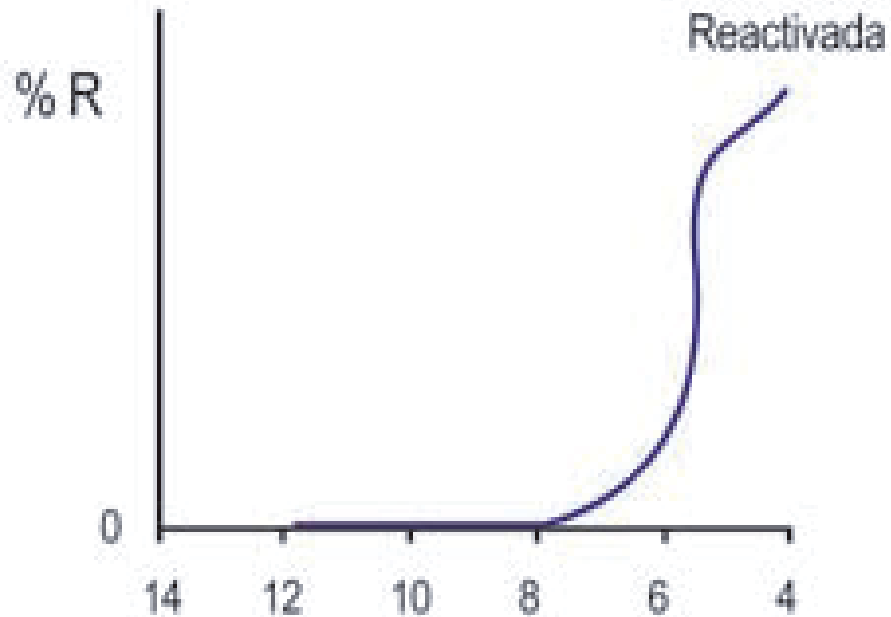


Figura 3.11: Reactivación de la pirita al disminuir el pH

Por otra parte, la pirita es muy sensible a la oxidación, tal como se ilustra en la Fig. 3.12

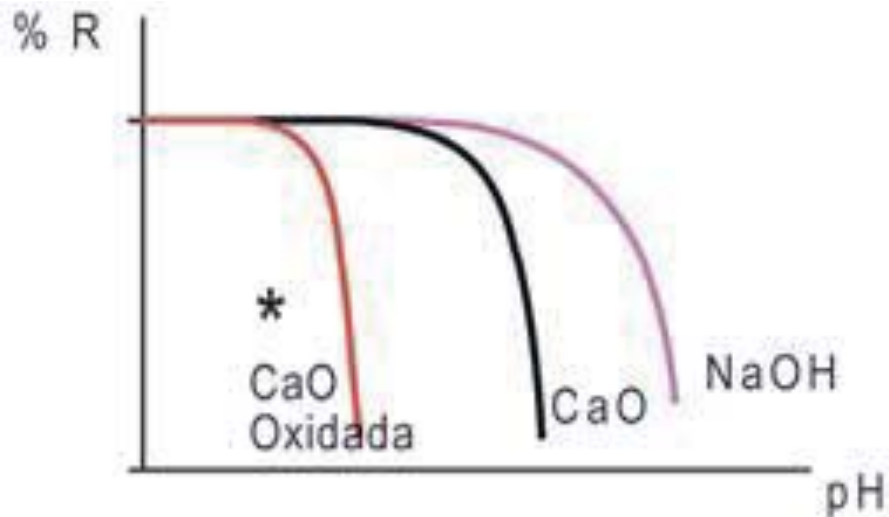


Figura 3.12: Comportamiento de la pirita, oxidada y no oxidada, con cal y con soda caustica

La cal depresa a un pH más bajo, pero si la pirita es previamente oxidada en forma leve, la cal es un depresante mucho más poderoso. La oxidación superficial de la pirita se consigue mediante:

- a) Simple aireación de la pulpa: da menor consumo de cal, la calcopirita y la molibdenita son más difíciles de oxidar, se puede trabajar a pH más bajos.
- b) Envejecimiento de pulpa: se deja un día antes de flotar, lo que produce una pérdida de flotabilidad de la pirita. Del mismo modo ocurre, si los minerales están almacenados, por lo que deben quedar sellados e insuflar nitrógeno. El envejecimiento de pulpas se hace en espesadores para oxidar la pirita de un turno a otro turno.
- c) Adición de reactivos químicos, tales como peróxido de hidrógeno (H_2O_2); $NaClO$ (oxidantes) u otros. Una vez que se oxida la pirita, el óxido superficial se hidrata inmediatamente generando una capa de hidróxido que hidrofaliza la superficie (Fig. 3.13) y por lo tanto inhibe la flotabilidad.

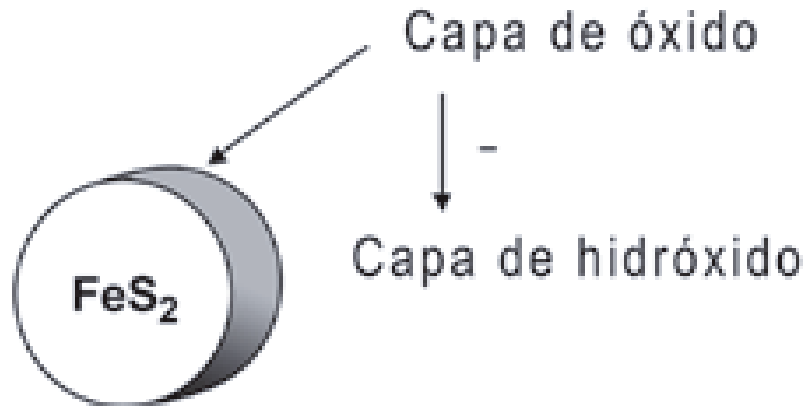


Figura 3.13: Comportamiento de la pirita oxidada

Por otra parte, es importante destacar que la molibdenita también se depresa con cal (pH: 12), tal como se muestra en la Fig. 3.14

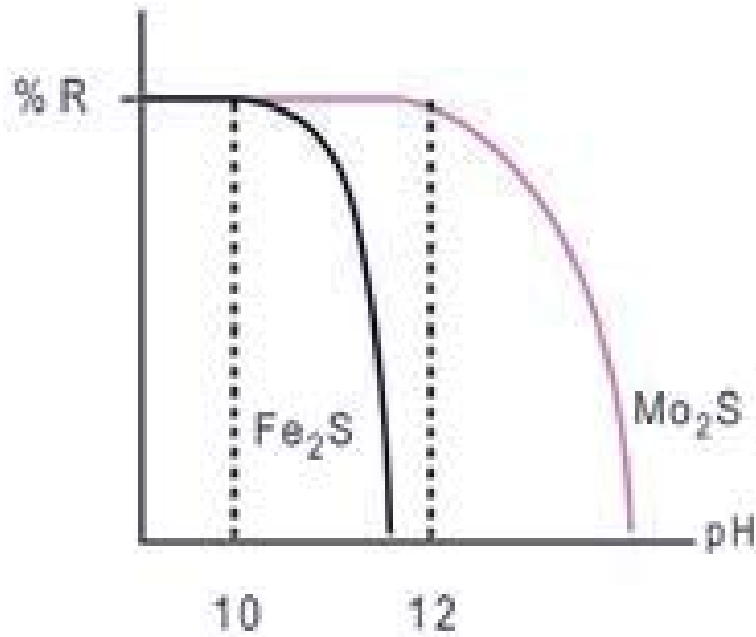


Figura 3.14: Recuperación de pirita y Molibdenita según pH

3.4.5. Impurezas contenidas en la cal

El contenido de impurezas en los distintos tipos de cal, va a depender de las que se encuentren en la materia prima, entre las más comunes están principalmente: el silicio, el aluminio, el hierro, el azufre, el magnesio y los metales alcalinos, entre otras. En algunos casos hay trazas de fundentes y pigmentos, tales como: el manganeso y el flúor, que le otorgan al producto distintas tonalidades en su color, fluctuando desde el blanco, al beige, e incluso algunas alcanzan el negro, siendo esta última característica una propiedad física, que no altera sus propiedades de alcalinización ni su calidad en la capacidad o valor alcalinizante. La presencia de estos elementos, puede ser muy importante en algunos usos o aplicaciones de la cal donde tanto el manganeso, como el flúor, afectan o perjudican el proceso en la cual la cal es adicionada o, quedan asociados en el residuo final que se genere.

3.4.6. Estabilidad de la cal en el tiempo

La cal viva es un material anhidro, y tiene una gran afinidad con el agua, por lo que la absorbe a una velocidad bastante alta, expandiendo su tamaño 2.5 veces, generándose el rompimiento de la partícula en varias partículas más pequeñas en un tiempo que depende del grado de reactividad de ésta, por lo que si no se protege de la humedad ambiental, ocurre la siguiente reacción química:



Seguramente este es el motivo para que no se encuentre cal viva ni cal apagada en forma natural. Sin embargo, es común encontrar en la bibliografía y en algunas faenas mineras llamarle cal a la caliza.

3.4.7. Reactividad de Cal

La reactividad de la cal^[8] en agua, es un ensayo que sirve para medir la liberación o descarga del calor de hidratación, esto mide la cinética necesaria para hidratarla. También sirve para medir la velocidad en que una suspensión acuosa (lechada) produce iones hidroxilos al ser neutralizada con ácido clorhídrico a pH 9.2. En el primer caso, se utiliza para dimensionar los equipos hidratadores que permiten obtener, a partir de la cal viva, un polvo fino y seco de cal hidratada, y la segunda para conocer la capacidad de la cal viva para neutralizar una solución ácida.

Existen varias técnicas similares y que son aceptadas en la industria de la cal para medir la hidratación. Varias miden la diferencia de la temperatura que se produce en un tiempo definido, al preparar una lechada a partir de cal viva y que se mantiene con agitación constante en un recipiente adiabático, térmicamente aislado; tanto las cantidades de cal viva, de agua y de la temperatura inicial, varían por lo que, los resultados obtenidos no afectan al valor final para su clasificación posterior en la norma que corresponda. La Tabla 3.4 muestra las normas existentes para medir la reactividad de la cal.

Tabla 3.4: Normas y requisitos para realizar el ensayo de reactividad de la cal

NORMAS	Temperatura del agua (°C)	Cantidad de Cal (g)	Cantidad de agua (cm³)
ASTM C-110 (U.S.A.)	25	100	400
AWWA (American Water Wks Assoc.)	25	100	400
NKL (valor R)Asoc.Alemana de Cal	20	150	600

En general, la reactividad puede verse afectada tanto por la densidad aparente de la cal como por las impurezas que pueda contener el agua utilizada en el ensayo. Del mismo modo puede ocurrir por la absorción de humedad y/o anhídrido carbónico desde la atmósfera durante el

almacenamiento o preparación de las muestras, por ello el cuidado de esta operación debe ser extremo.

Cales vivas con pequeñas cantidades de apagado aéreo (cal viva expuesta al ambiente) puede reducir significativamente la reactividad. Hay pruebas que muestran que 1.5% de agua absorbida o combinada, acompañada con una pequeña cantidad de anhídrido carbónico puede reducir en unos 10° C la reactividad. Como regla general, muestras de cal viva que contengan 1.0 % o más, de agua absorbida o combinada, no puede ser sometida a ensayo o análisis de reactividad.

3.4.8 Reactividad de Cal según norma Reactividad ASTM C-110

El incremento de temperatura en 30 segundos, es una medida de reactividad de la porción reconocida como cal viva quemada blanda. El tiempo total de apagado, suministra un medida sobre el grado de reactividad del material. La elevación final de la temperatura es totalmente dependiente del contenido de la cal libre de la muestra.

- La cal de alta reactividad se define como aquella que genera una diferencia de temperatura de 40°C en 3 minutos o menos y la reacción se completa en 10 minutos.
- La cal de mediana reactividad se aplicara cuando esta diferencia de 40°C en la temperatura ocurre entre 3 a 6 minutos y la reacción completa entre los 10 y 20 minutos.
- La cal de baja reactividad es cuando la diferencia de temperatura de 40°C ocurre sobre los 6 minutos y la reacción se complete sobre los 20 minutos.

La Figura 3.15 muestra los resultados de reactividad, según norma ASTM C-110, para tres muestras de cal con distinto comportamiento en la reacción con el agua, pero con igual valor de alcalinidad en la solución formada, (pH 12.6).

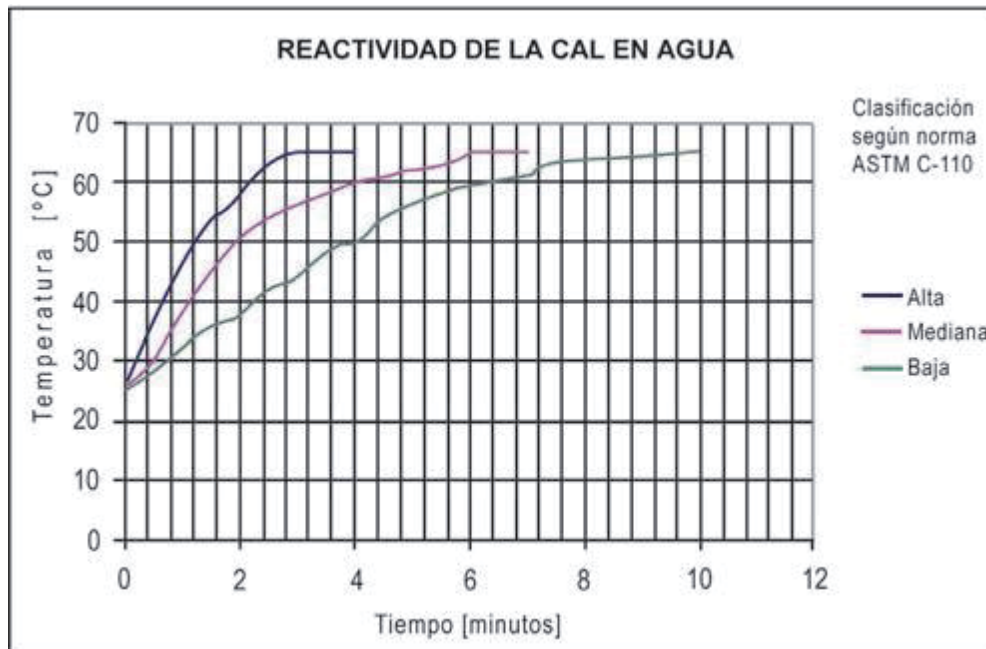


Figura 3.15: Gráfico de reactividad en agua

Se observa que con una cal de baja reactividad el tiempo total de apagado es el doble que utilizando una cal de alta reactividad, este parámetro es totalmente dependiente del contenido de cal libre de la muestra y proporciona una indicación del comportamiento de la cal viva en procesos que involucren sistema de hidratación de cal..

3.4.9 Lechada de Cal

La forma más común y generalizada de agregar la cal en los diversos procesos en que se utiliza, es adicionarla en disolución, pulpa, o suspensión, donde es mezclada con agua. Mientras más pequeña es la granulometría de la cal, mayor es el grado de hidratación y más fino es el grano obtenido. El objetivo de preparar y adicionar la Cal en forma de lechada es la de aprovechar al máximo sus propiedades físicas y químicas, ya que como lechada sedimenta mucho más lento que como cal adicionada directamente y además es casi dos veces más rápida en reaccionar. Debe prepararse en exceso de agua, ayudando de esta manera a minimizar los problemas de incrustaciones en las líneas y estanques.

El proceso de apagado^[9] de cal es muy complejo y hay factores que afectan directa o indirectamente su eficiencia, estos son: Pureza de la cal, proceso de calcinación usado para fabricar CaO, temperatura de hidratación o apagado, razón o proporción agua cal, grado de

agitación durante la hidratación, viscosidad de la pulpa, tiempo de hidratación, composición del agua utilizada, temperatura del agua.

Entre los más importantes se encuentra la relación Agua – Cal, esto afecta directamente al tiempo de apagado, es decir, mientras más alta la temperatura del apagado, más corto es el tiempo de la reacción además disminuye la solubilidad de la cal. Este factor no garantiza una temperatura constante ya que la temperatura variara de acuerdo a la reactividad de la cal, y es inversamente al tiempo de hidratación al igual que la temperatura del agua

Otro factor importante que afecta la eficiencia en el sistema de apagado es el área superficial específica de las partículas del hidróxido de calcio. Mientras mayor sea el tamaño del área superficial específica de hidratación, una mayor superficie estará disponible para la reacción, por lo tanto, una mayor eficiencia de reacción y menor consumo, es por esto que se realizaran pruebas de consumo utilizando la cal apagada de las pruebas de reactividad anteriores, y así determinar el consumo de cal por cada tonelada de mineral tratado

La preparación de lechada de cal es un proceso crítico y no basta que el operador conozca como manipular el equipo y el proceso donde se va aplicar la cal. El método y tipo de control utilizado para la preparación de ésta pueden afectar fuertemente la eficiencia del proceso posterior. Una correcta instrumentación es esencial para controlar la temperatura correcta de apagado y mantener en un cierto rango la proporción de agua: cal.

CAPÍTULO IV: EMPRESA

División Andina es una de las Divisiones de Codelco Chile que opera en el cajón del Río Blanco, extrayendo concentrados de Cobre y Molibdeno de dos sectores: la mina subterránea del mismo nombre y la mina a rajo abierto Sur-Sur y Don Luis. Está ubicada a 50 Kilómetros al noroeste de Santiago entre los 3700 y 4200 metros de altura sobre el nivel del mar, a unos 30 kilómetros de la carretera internacional a Mendoza (Argentina) desde el poblado de Río Blanco y a 50 kilómetros de la ciudad de Los Andes, provincia de Aconcagua.

Andina produce unas 250000 TMA de concentrados de Cobre que son materia prima fundamental para obtener el metal refinado y aproximadamente 4500 TMA de concentrado de Molibdeno. La planta Concentradora División Andina, cuenta con los siguientes procesos productivos: Chancado, Molienda, Flotación Colectiva, Flotación Selectiva, Filtrado Cobre y Molibdeno.

La etapa de molienda cuenta con tres tipos de circuitos; molienda convencional compuesto por tres molinos de barras y cada molino cuenta con tres molinos de bolas con hidrociclones en circuito inverso, molienda unitaria y molienda SAG, compuesta por un molino SAG, dos harneros vibradores, dos chancadores de Pebbles y dos molinos de bolas.

La Flotación Colectiva (Cobre- Molibdeno), cuenta con 40 celdas Rougher, divididas en tres secciones A, B y E, las dos primeras con celdas de 100 m^3 y la tercera sección con celdas de 130 m^3 , este concentrado pasa a la etapa de remolienda, compuesta por dos molinos Verticales (Vertimill) y un molino de Bolas de remolienda, posterior a esto pasa a la etapa de Flotación Columnar o de Limpieza, compuesto por 6 columnas, 4 de 13 m de altura y 2 de 16 m, el Concentrado Columnar pasa al esperador de concentrado y luego por gravedad llega a la planta de Flotación Selectiva ubicada en Saladillo; las colas de la etapa de limpieza pasan a la etapa de Flotación Scavenger o de barrido, compuesta por 32 celdas de 38 m^3 , el concentrado Scavenger vuelve a la etapa de remolienda y posterior Flotación Columnar, dejando un ciclo cerrado, las Colas Scavenger más las Colas Rougher A, B y E forman la cola Total, la cual es distribuida a los tres esperadores de relaves, lo anterior se puede observar en la Fig. 4.1.

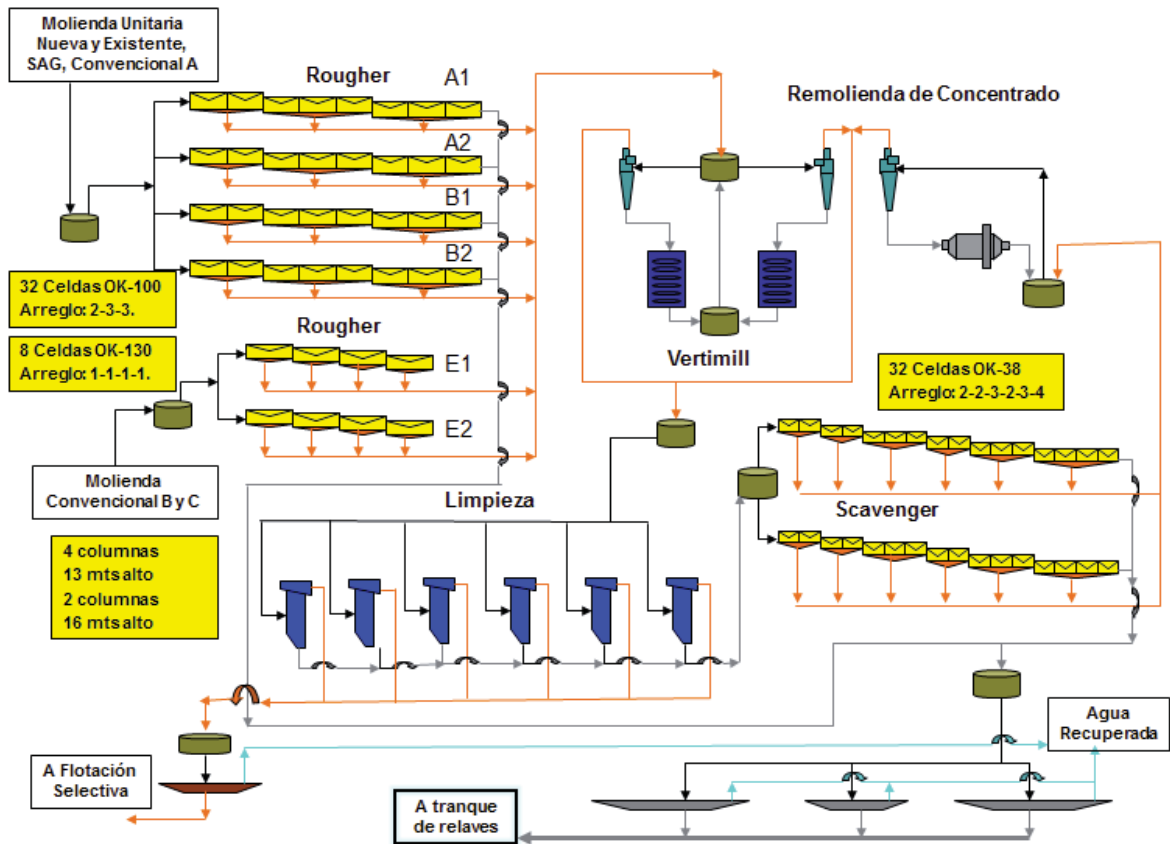


Figura 4.1: Diagrama de Flujos Flotación Colectiva Cu- Mo

Además se cuenta con dos plantas preparadoras de lechada de Cal, insumo indispensable para la etapa de flotación, la primera cuenta con dos apagadores, con agitador de paleta horizontal, tornillos alimentadores de cal y para la descargas de arenillas, harnero vibratorio, la segunda planta, cuenta con dos apagadores tipo Slaker, de alta eficiencia.

La Planta de Cal^[10] consta de un sistema neumático de alimentación de cal transportada por los camiones hacia el silo de alimentación y desde ahí a las tolvas. Las tolvas se descargan mediante un activador vibratorio y un alimentador rotatorio. El silo cuenta con un sistema de extracción de polvo, en base a filtros de cartucho. Los alimentadores transportan la cal hacia los estanques de hidratación de cal, por medio de transportadores de tornillo. Desde los hidratadores y por rebose y luego en forma gravitacional se conduce la cal apagada hasta el estanque de Transferencia. El apagador Slaker consta con dos cámaras, la primera llamada cámara de apagado donde la cal viva y el agua se mezclan y la segunda cámara es usada usualmente para remover la arenilla. Desde este estanque y mediante bombas centrífugas se

impulsa la lechada de cal al estanque de dilución existente y desde ahí, la impulsan al cajón distribuidor de lechada de cal.

La distribución como también las especificaciones de los equipos se encuentra en la Fig. 4.2.

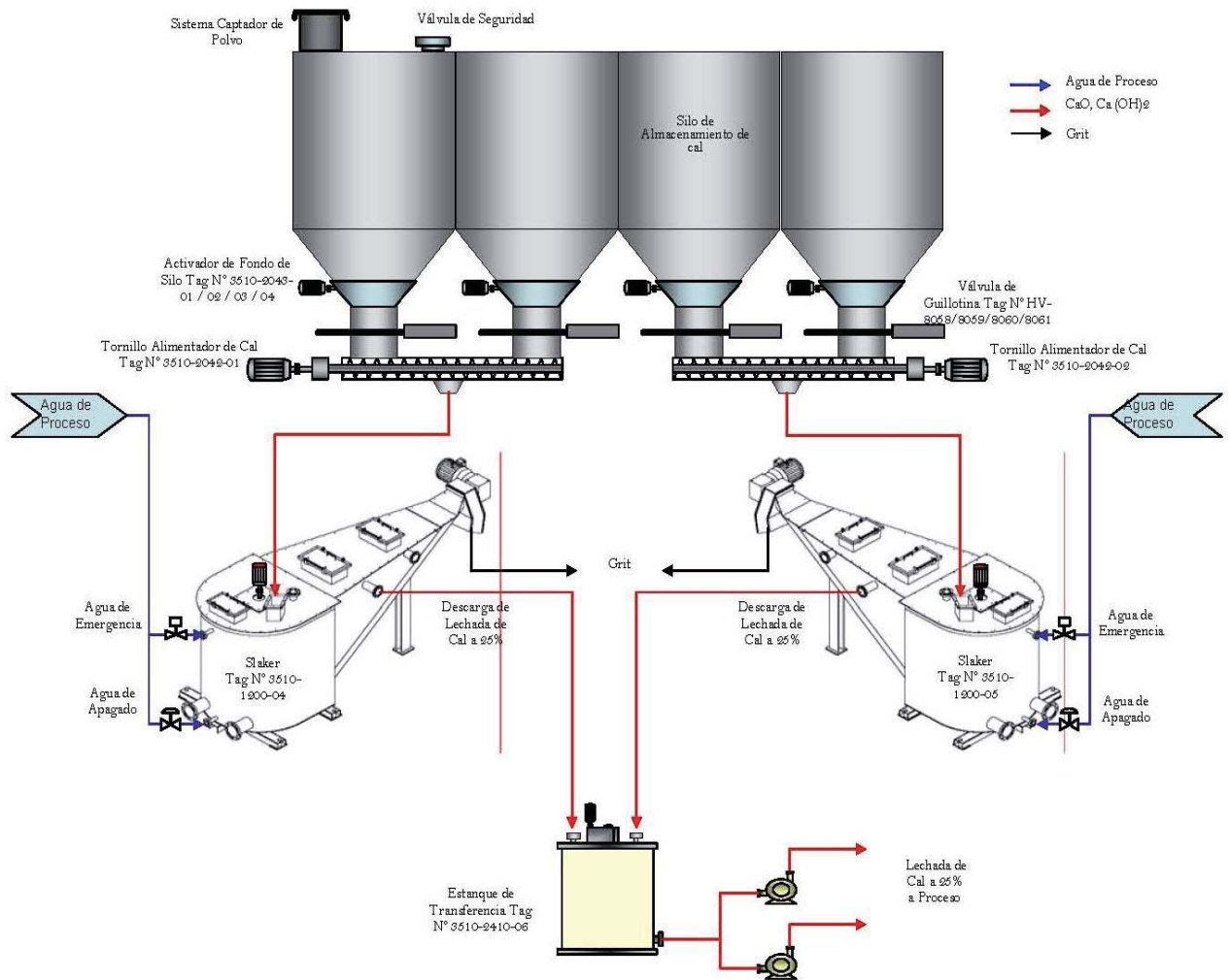


Figura 4.2: Diagrama de procesos planta de cal 2

A continuación el detalle de los lugares donde se adiciona la lechada de cal en cada área de la planta concentradora de DAND, además se indica donde se propone adicionar el nuevo reactivo Quebracho.

Actualmente el control de pH en el circuito de molienda SAG y de molienda unitaria 2 - flotación, se sustenta en la adición controlada de lechada de cal en el underflow de la batería de hidrociclones de la molienda unitaria 2 y en la alimentación del molino SAG, y en la medición del pH en el cajón centralizado. (Fig. 4.3).

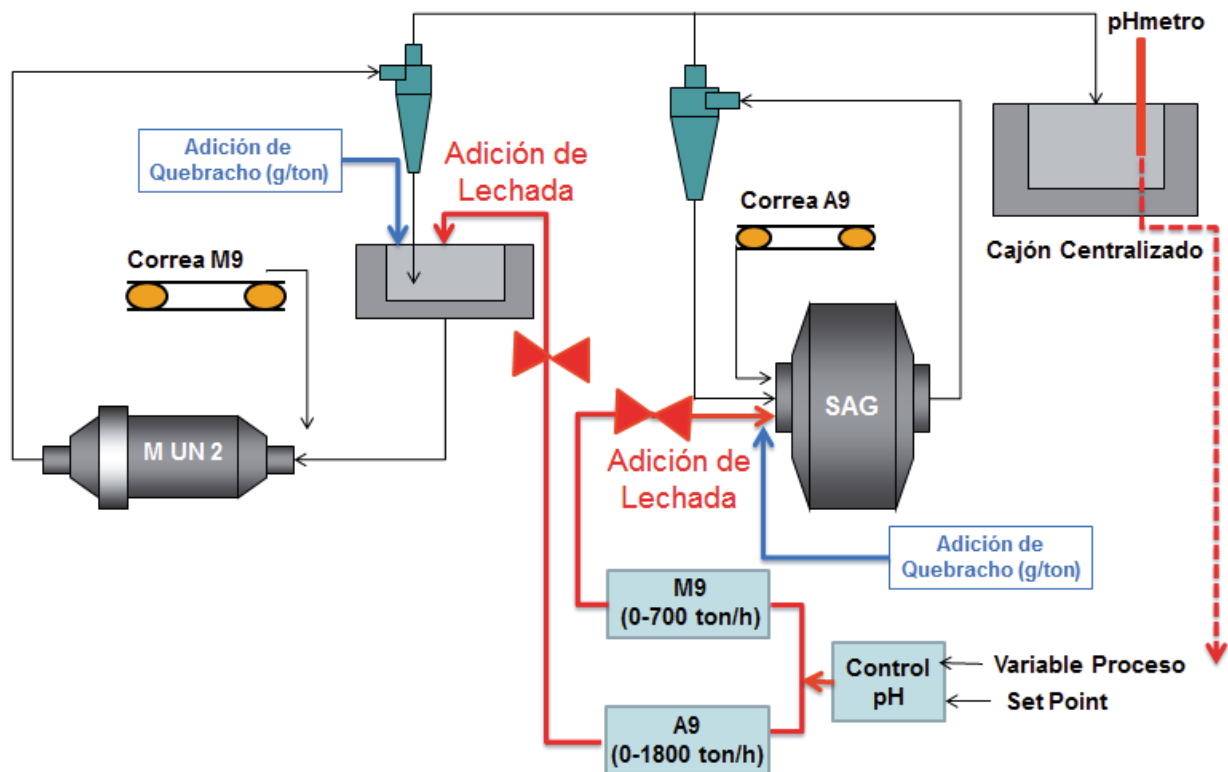


Figura 4.3: Control de pH Molienda SAG y Unitaria 2 y propuesta de adición de Quebracho

El lazo de control que rige a la variable de proceso pH, está en función proporcional con el tonelaje de alimentación de mineral (correas M9 (MUN2) y A9 (SAG)). Se pretende minimizar la diferencia entre la variable de proceso pH, medida en pHmetro SAG ubicado en el cajón centralizado y el set point dado.

El control de pH para molienda convencional (Fig. 4.4), se basa en la adición de lechada de cal en la alimentación a los molinos de barras 1-2-3, minimizando la diferencia entre la variable de proceso y el set point de pH indicado por los instrumentos que se encuentran ubicados en cada uno de los cajones recolectores de los overflow, de las secciones de molienda A, B y C.

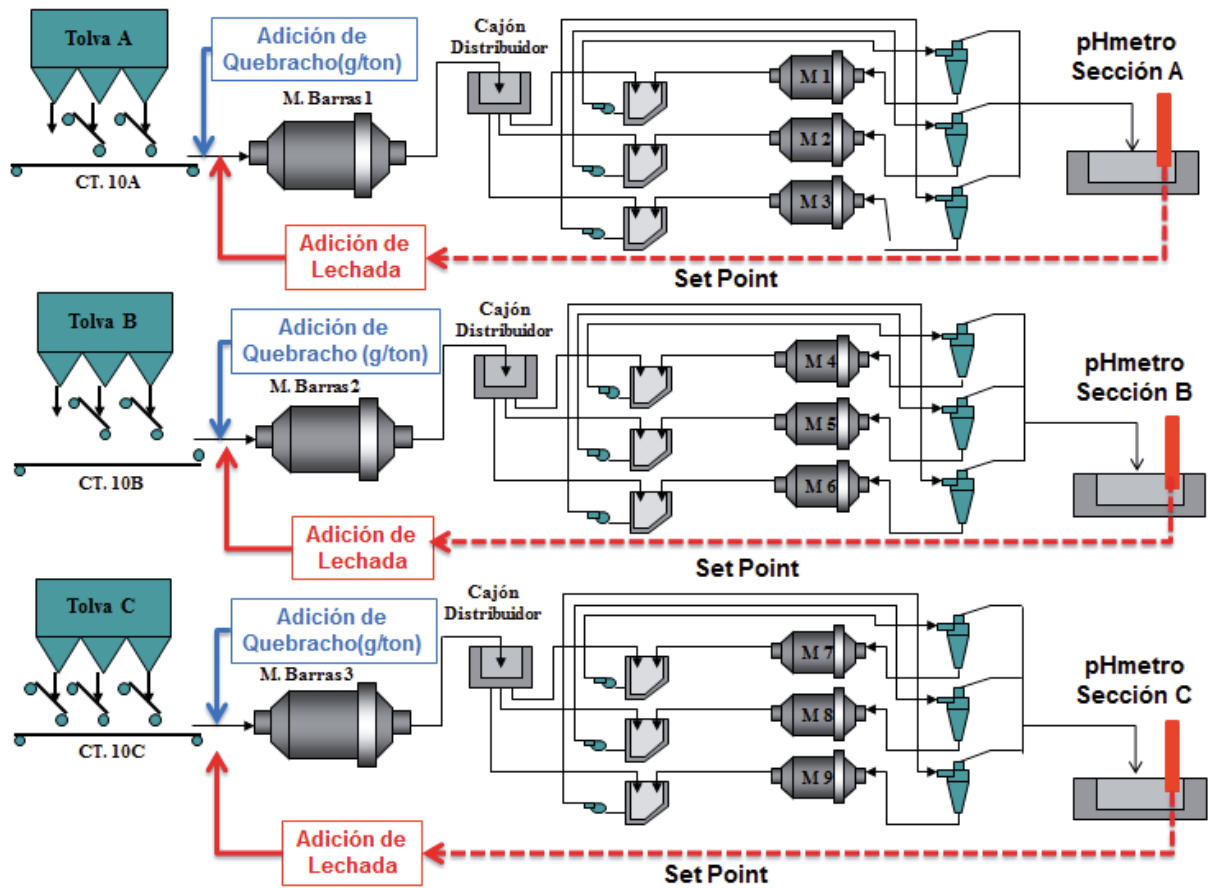


Figura 4.4: Diagrama de adición de lechada de cal en la molienda Convencional y propuesta de adición de Quebracho.

Al igual que la arquitectura de molienda convencional, el control de pH en la molienda unitaria se basa en la adición de lechada de cal en la alimentación del molino, cautelando minimizar la diferencia entre el set point y la variable medida por los instrumentos, ubicados en el cajón receptor del overflow de la batería de hidrociclones (Fig. 4.5).

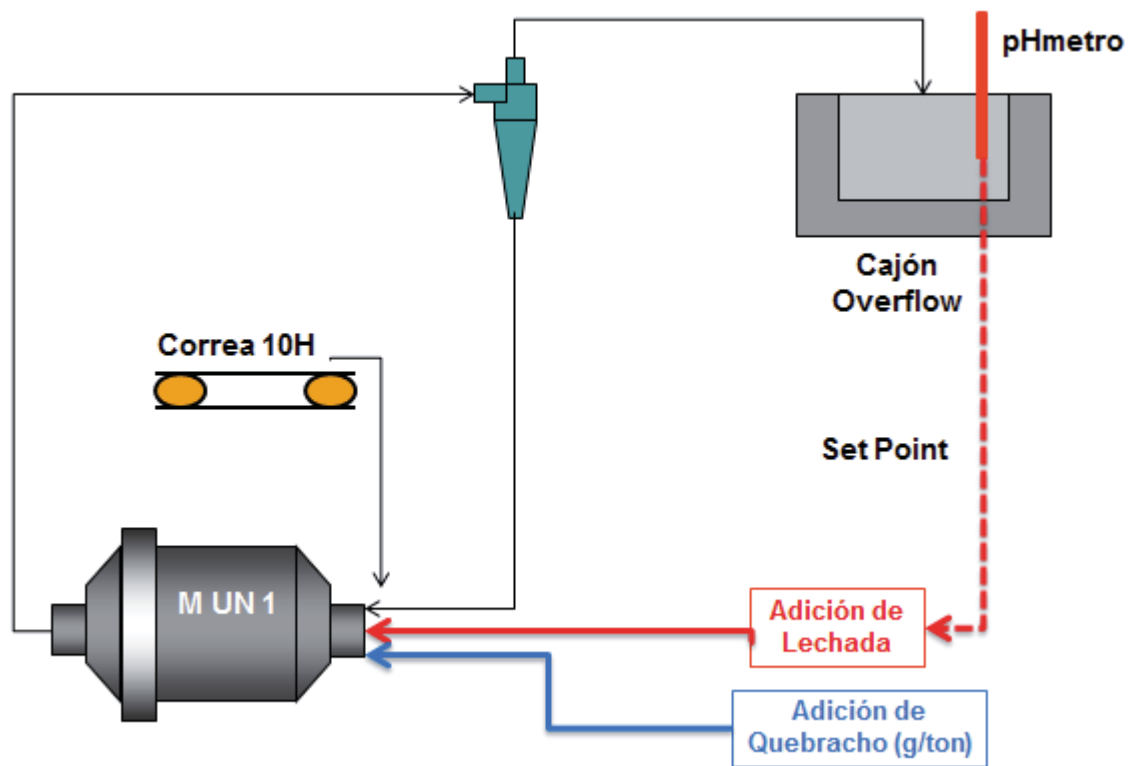


Figura 4.5: Diagrama de adición de lechada de cal en molinera unitaria una y propuesta de adición de Quebracho

El control de pH en la etapa de flotación de limpieza, (Fig. 4.6) se basa en la adición de lechada de cal en los “launders” de las celdas rougher A y B, en función del set point de pH establecido en el estanque de alimentación de los molinos verticales (estanque Vertimill). Adicionalmente, se dosifica lechada de cal en el cajón de concentrados de la flotación Scavenger, en función del set point del pHmetro de las celdas columnares 1 y 2, 3 y 4 o 5 y 6.

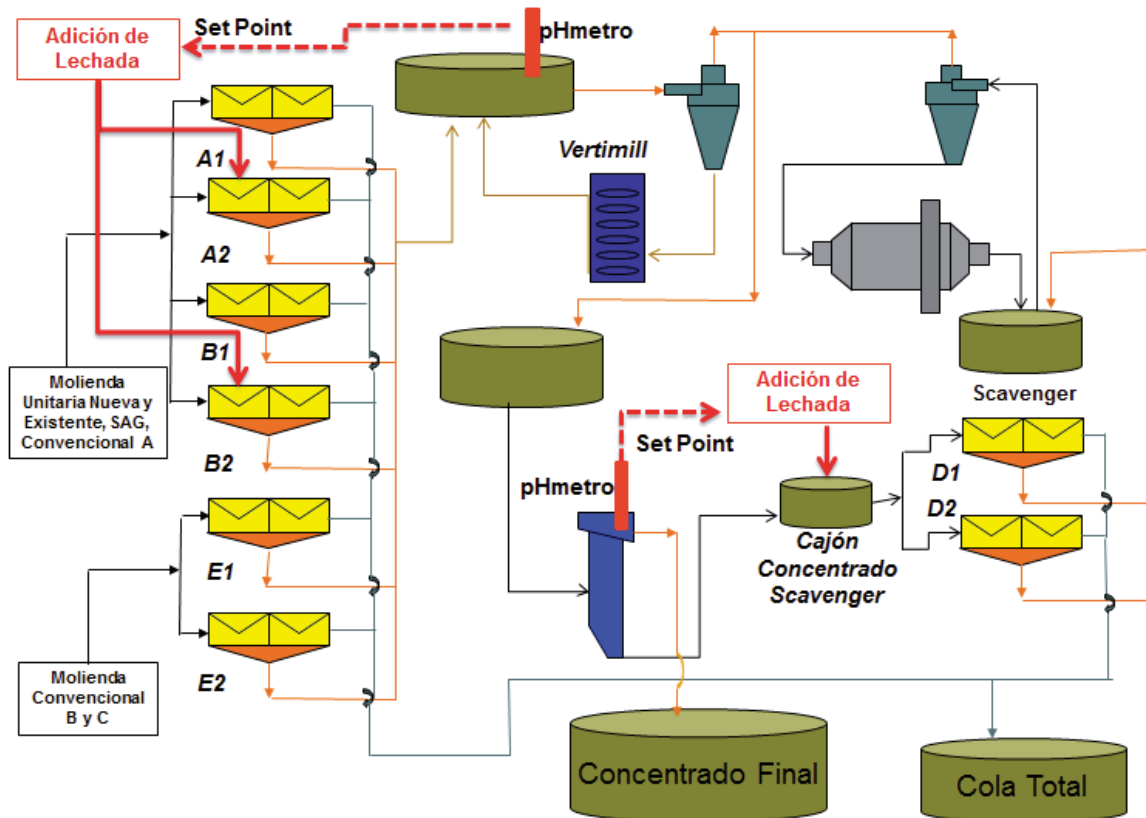


Figura 4.6: Diagrama de adición de lechada de cal en flotación colectiva.

La adición de quebracho se propone en la etapa de molienda tanto convencional, unitario 1 y 2 y molino SAG, al igual que los demás reactivos utilizados en la flotación, colector primario Tionocarbamato X-23 y colector secundario diesel, esto debido al tiempo de acondicionamiento que necesita el reactivo sobre la pulpa mineral.

CAPÍTULO V: TRABAJO EXPERIMENTAL

El trabajo experimental se dividió en tres partes, la primera corresponden a una serie de pruebas de flotación donde se estudió el efecto del quebracho como reactivo depresor de pirita, con diferentes tipos y dosis. Luego se analizó metalúrgicamente la cal utilizada en DAND para comprobar su calidad, finalmente se realizaron pruebas en la planta de cal, donde se puso nuevamente en marcha pero de forma automática.

El trabajo se desarrolló estrictamente, bajo los estándares de seguridad de División Andina, además del seguimiento de los procedimientos de la compañía, tanto en el laboratorio como en la planta.

5.1 PREPARACIÓN DE REACTIVOS

5.1.1 Preparación concentración Quebracho

El quebracho, como se mencionó en sus características físicas, es en polvo, por lo tanto para adicionarlo a la flotación debe ser preparado en gr/litros, la dosis sugerida para preparar la solución madre es de 10 gr/litros. Se prepararon 200 ml (ANEXO A.1) de cada tipo de Quebracho (T1, T5, M3). En la Tabla 5.1 se describe las dosis para las pruebas.

Tabla 5.1: Dosis Quebracho

QUEBRACHO			
Dosis (g/ton)	T1 (ml)	T5 (ml)	M3(ml)
30	3.54	3.54	3.54
60	7.08	7.08	7.08

5.1.2 Reactivos de Flotación

Los reactivos (X-23; Diesel, MIBC, Silicato de Sodio) son suministrados en forma líquida, pero para ser adicionadas a las pruebas de flotación en el laboratorio deben ser calculadas en microlitros (μlt), para el cálculo ver ANEXO A.2. En la Tabla 5.2 se detallan, las dosis por reactivo.

Tabla 5.2: Dosis de Reactivos

	X-23	Diesel	MIBC	Silicato de Sodio
Dosis Planta (g/ton)	19	8	12	30
Densidad (g/ml)	0.98	0.85	0.807	1.36
Dosis Laboratorio (μ lt)	26	11.1	22	26

5.1.3 Preparación Cal

Para controlar el pH durante las pruebas de flotación, se utilizó cal apagada, la preparación de esta se realizó utilizando el procedimiento de apagado de cal (ver ANEXO B.1). En la Tabla 5.3 se muestran las variables del proceso de apagado.

Tabla 5.3: Parámetros apagado de cal

Razón Cal: Agua	Cal (ml)	Agua (ml)	T° Agua (°C)
1:4	100	400	25

5.2 TRABAJO CON QUEBRACHO

En el presente trabajo se utilizaron diferentes extractos de quebracho modificados, dispersantes y depresores, en ensayos de flotación de sulfuros de cobre. Se presentan los resultados como depresor de pirita.

5.2.1 Trabajo Preliminar

Codelco División Andina solicitó a la empresa SGS-CIMM T&S, la ejecución de un programa de pruebas de flotación con el objetivo de evaluar el efecto de quebracho en la recuperación de cobre, molibdeno y hierro. Se utilizaron cuatro tipos de reactivos quebracho identificados Flotan T0; T1; T5 Y M3, para ser evaluados en tres niveles de pH: 8.9 y 10. Las pruebas fueron desarrolladas diferenciándose por tipo de mineral, SAG y CONVENCIONAL, a una dosis de 30 g/ton de quebracho, P_{80} de 210 μm , porcentaje de sólidos 38%, tiempo de flotación 7 minutos, la dosis de los reactivos X-23, diesel y MIBC son respectivamente 19, 8 y 12 g/ton y utilizando agua de proceso.

5.2.2 Pruebas asignadas

Para las pruebas definitivas se tomaron las condiciones de los mejores resultados obtenidos en el trabajo preliminar y se aumentó la dosis de quebracho de 30 a 60 g/ton, además se tomó la decisión de trabajar con un compuesto mixto, de ambas líneas de mineral, ya que en planta estos son flotados conjuntamente, 60% molienda SAG (mineral proveniente de la mina Sur-Sur) y 40% molienda convencional (mineral proveniente de la mina Subterránea). Se adicionaron los mismos reactivos X-23, MIBC y Diesel que las pruebas anteriores, además se adicionó Silicato de Sodio para ver el comportamiento de ambos. Las pruebas fueron desarrolladas en las dependencias del laboratorio metalúrgico de DAND.

5.2.3 Preparación de muestras

El punto de partida fue tomar muestra de mineral SAG y convencional, 25 y 20 kg respectivamente, ambas muestras fueron mezcladas en la proporción asignada (60% y 40%), se utilizó el homogenizador de tipo pantalón, ubicado en el laboratorio metalúrgico, y para división de muestras se utilizó el método del roleo y carteo para una correcta toma de cada muestra.

Una vez terminada la homogenización del mineral se tomó una muestra para realizar análisis granulométrico y otra para la determinación de la ley de cabeza, donde se cuantificó el CuT, FeT, MoT e Insoluble en porcentaje peso/peso.

5.2.4 Cinética de Molienda

La cinética de molienda tiene como objetivo obtener el tiempo óptimo para cierto P_{80} (Ver procedimiento en Anexo B.3), en el caso de estas pruebas el tamaño apropiado es un P_{80} cercano al 22% sobre #65 (212 μm).

La molienda previa a la flotación, se realizó en el molino batch del laboratorio metalúrgico, utilizando las muestras representativas de 1180 g cada una, para esta etapa, y simulando el proceso de planta, se adicionaron los reactivos para que tuviesen el tiempo de acondicionamiento necesario. Los reactivos fueron tionocarbamato x-23, diesel, silicato de sodio y quebracho. La concentración de cada uno de ellos vario según la prueba experimental.

5.2.5 Pruebas de Flotación Rougher

Las pruebas de flotación se realizaron en la celda Denver del laboratorio metalúrgico, las pruebas se llevaron a cabo con las muestras resultantes de la molienda, ver procedimiento en Anexo B.4, adicionando en esta etapa el espumante MIBC y acondicionándolo durante 3 minutos. En la Tabla 5.4 el resumen de las condiciones operacionales de las pruebas flotación.

Tabla 5.4 Condiciones Operacionales pruebas Flotación Rougher

Reactivos	Dosificación	Adición
Colector Primario: Tionocarbamato X-23, (g/ton)	19	Molienda
Colector Secundario: Diesel, (g/ton)	8	Molienda
Espumante: MIBC, (g/ton)	12	Acondicionamiento
Silicato de Sodio, (g/ton)	30	Molienda
Quebracho (T1, T5, M3), (g/ton)	30 ; 60	Molienda
Otras Condiciones		
Tipo Mineral		Mixto
Granulometría Alimentación (P80) (μm)		212
Tiempo Molienda, (min)		12:40
Tiempo Acondicionamiento, (min)		3
Tiempo Flotación, (min)		7
pH Flotación		9; 10
% Sólidos		38
Velocidad Agitación (RPM)		1500
Descarga espuma (seg)		c/ 10

5.2.6 Pruebas Cinética de Flotación

Con los mejores resultados de las pruebas preliminares y las de flotación Rougher se realizaron nuevas pruebas de flotación pero con dosis distintas de reactivos, para comprobar si el efecto obtenido anteriormente varía respecto a la dosis reales de planta, además se realizó una cinética de flotación para apreciar la eficiencia del proceso y determinar la velocidad y selectividad con que flotan las partículas minerales. Las condiciones operacionales se encuentran en la Tabla 5.5

Tabla 5.5: Condiciones operacionales pruebas de cinética de flotación.

Reactivos	Dosificación	Adición
Colector Primario: Tionocarbamato X-23, (g/ton)	22	Molienda
Colector Secundario: Diesel,(g/ton)	10	Molienda
Espumante: MIBC,(g/ton)	14.7	Acondicionamiento
Silicato de Sodio,(g/ton)	30	Molienda
Quebracho (T1, T5),(g/ton)	30;60	Molienda
Otras Condiciones		
Granulometría Alimentación (P80) (μm)		212
Tiempo Molienda, (min)		12:40
Tiempo Acondicionamiento, (min)		3
Tiempo Flotación,(min)		16
pH Flotación		9
% Sólidos		38
Velocidad Agitación (RPM)		1500
Descarga espuma (seg)		c/ 10
Colección de Concentrado (al min)		1-2-4-7-11-16

Las pruebas de cinética de flotación se realizaron a las mismas condiciones de las pruebas de flotación (dosis de reactivos, tiempo molienda, tipo de mineral, porcentajes de sólidos, tiempo de acondicionamiento), solo varía el tiempo de flotación. En esta etapa la recolección de concentrado se hace a los minutos 1-2-4-7-11-16, permitiendo obtener la recuperación a cada minuto (Ver procedimiento en Anexo B.5). Como resumen por cada prueba de cinética de flotación realizada se obtienen seis concentrados y una cola.

Durante el desarrollo de los dos set de pruebas el pH fue medido con el pHmetro Orion y controlado con la adición de cal apagada, se registró el gasto de cal para cada prueba y así obtener la relación, dosis de quebracho v/s consumo de cal.

Una vez que las muestras son secadas, estas fueron almacenadas y rotuladas en bolsas de papel, finalmente llevadas a las dependencias de CESMEC para el análisis de CuT, FeT, MoT e Insoluble. Con estos resultados se calcularon las recuperaciones de Cu, Fe, Mo e insoluble.

5.3 CAL

Analizar metalúrgicamente la cal, es una tarea necesaria para saber empíricamente su calidad. Actualmente el proveedor de cal en DAND es la empresa Unimin Chile minerales industriales Ltda. Según contrato entre ambas empresas, la ley del producto debe ser de 86% de CaO libre promedio quincenal, con un mínimo de 83% por lote, si la ley de cal es bajo el 76% esta se considera indeseable para proceso. La ley de CaO libre es medida de acuerdo a la norma ASTM. La especificación granulométrica de la cal es la siguiente: Mínimo 95% bajo la malla 2,79 mm, Máximo 5% entre las mallas 2,79 mm y 3,32 mm.

La cal es suministrada a granel en camiones silo, a la llegada a la división son pesados en una romana y se comparan los pesos con los que trae el distribuidor.

5.3.1 Índice de Reactividad según Norma ASTM-C110

Para las pruebas de reactividad se tomó una muestra de 3 kilos la que fue tomada en los camiones silo, no es posible tomar en los silos de cal instalados en las plantas, por seguridad, esta muestra fue llevada al laboratorio metalúrgico y preparada para su análisis.

La muestra fue homogenizada mediante el método del roleo y cuarteo, con mucho cuidado (ya que como fue descrito anteriormente la cal reacciona al tener contacto con aire). Las muestras fueron guardadas y rotuladas en bolsas plásticas y selladas para evitar su degradación, una de éstas se utilizó para realizar análisis granulométrico y otra para la determinación de la ley de cal.

El resto de las muestras se utilizaron en las pruebas de reactividad (ver Anexo B.1), cuyo objetivo era determinar el tiempo de reacción total de la cal en el proceso de apagado, y su nivel de reactividad, dejando como constante la masa de cal y variando el volumen agua (ver Tabla 5.6), según la razón asignada; a continuación el set de pruebas, todas por duplicado:

Tabla 5.6: Programa experimental pruebas de Reactividad según norma ASTM-C110

Test	Razón Cal: Agua	Cal (g)	Agua (ml)
1	1:1	100	100
2	1:2	100	200
3	1:3	100	300
4	1:4	100	400
5	1:5	100	500

Las muestras después de ser secadas y realizado el análisis granulométricos, son guardadas para su posterior uso en el cálculo de consumo de cal.

Se realizaron pruebas de consumo de cal utilizando las pruebas de reactividad anteriores y así determinar el consumo de cal por cada tonelada de mineral tratado. Las pruebas se realizaron con las muestras SAG y Convencional por separado, (ver procedimiento de trabajo en Anexo B.2.)

5.3.2 Índice de Reactividad utilizando agua de planta.

El efecto de la temperatura del agua es un factor preponderante, el agua fría no debe contactarse con la cal seca antes de ingresar en el apagador. El agua y la cal deben entrar al apagador en forma separada, de manera que disponga de tiempo para desarrollar la reacción de hidratación y la expansión natural al cambiar de óxido a hidróxido. Como consecuencia de esta reacción, hay un aumento en la temperatura por sobre los 65°C, lo que hay que controlar para evitar que ésta aumente indiscriminadamente generando una condición insegura de operación. Para ello, se recomienda utilizar agua a una temperatura de 25°C.

La temperatura de agua en DAND es un factor importante, la temperatura del agua no supera los 10 °C debido a que los calefactores no se encontraban en funcionamiento y es por ello que fue necesario realizar nuevas pruebas de reactividad pero con la temperatura real del agua que entra al apagador (10°C) y analizar el efecto que provoca este factor (agua fría) en la lechada producida.

El procedimiento y los materiales son los mismos que en las primeras pruebas de reactividad, a continuación el set de pruebas, todas por duplicado, se elimina la razón cal: agua 1:5, porque

según los resultados anteriores, esta última no alcanza la temperatura mínima de reacción. En la Tabla 5.7 se detallan las pruebas a realizar.

Tabla 5.7: Programa experimental pruebas de reactividad con agua fría

Test	Razón Cal: Agua	Cal (g)	Agua (ml)
1	1:1	100	100
2	1:2	100	200
3	1:3	100	300
4	1:4	100	400

5.3.3 Índice de Reactividad con distintas leyes de cal.

La calidad de cal o ley de cal, es otro factor que no se puede dejar de estudiar, para esto se pidió al laboratorio químico, que son quienes muestrean los camiones de cal que llegan a la división, que dispusieran de una serie de muestras de cal pero con distintas leyes cada una de ellas para evaluar su reactividad dejando como constante la relación agua: cal (1:4). En la Tabla 5.8 el set de pruebas, todas por duplicado:

Tabla 5.8: Programa experimental pruebas reactividad con distintas leyes de cal.

Test	Razón Cal: Agua	Cal (g)	Agua(ml)	Ley Cal (%)
1	1:4	100	400	87.8
2	1:4	100	400	92.5
3	1:4	100	400	89.8
4	1:4	100	400	76.7
5	1:4	100	400	86.9
6	1:4	100	400	82.7

5.3.4 Índice de Reactividad con distintas temperaturas de agua.

Finalmente se decide realizar un último set de pruebas (ver Tabla 5.9), el cual es comparar las reactividad de un tipo de cal, uno realizada con agua precalentada, llevada a 25 °C y otra con agua a temperatura normal (6°C) y ver el efecto que tiene en la ley; se elimina la razón 1:1, porque en planta es imposible utilizar esa proporción, porque se forma una pasta que sería muy difícil transportarla entre las cañerías.

Tabla 5.9: Programa experimental pruebas reactividad misma ley, distintas temperaturas.

Test	Razón Cal: Agua	Cal (g)	Agua(ml)	Temperatura Agua (°C)
1	1:2	100	200	25
2	1:2	100	200	6
3	1:3	100	300	25
4	1:3	100	300	6
5	1:4	100	400	25
6	1:4	100	400	6

CAPÍTULO VI: RESULTADOS Y DISCUSIONES

En este capítulo se presentan los resultados de cada una de las pruebas realizadas de Quebracho y Cal.

6.1 REACTIVO DEPRESOR DE FeS_2 , QUEBRACHO

6.1.1 Pruebas Preliminares

En la Fig. 6.1 (A) y (B) se presentan el resumen de los resultados metalúrgicos de las pruebas preliminares realizadas por la empresa SGS-CIMM T&S (pág. 45). En la Fig. 6.1(A) se puede ver la recuperación de Cu, Mo y Fe para una muestra mineral proveniente de la línea SAG, en función de diferentes reactivos de Quebracho para tres distintos pH. La Fig. 6.1 (B) se puede ver la recuperación de Cu, Mo y Fe para una muestra mineral proveniente de la línea convencional, en función de diferentes reactivos de Quebracho para tres distintos pH.

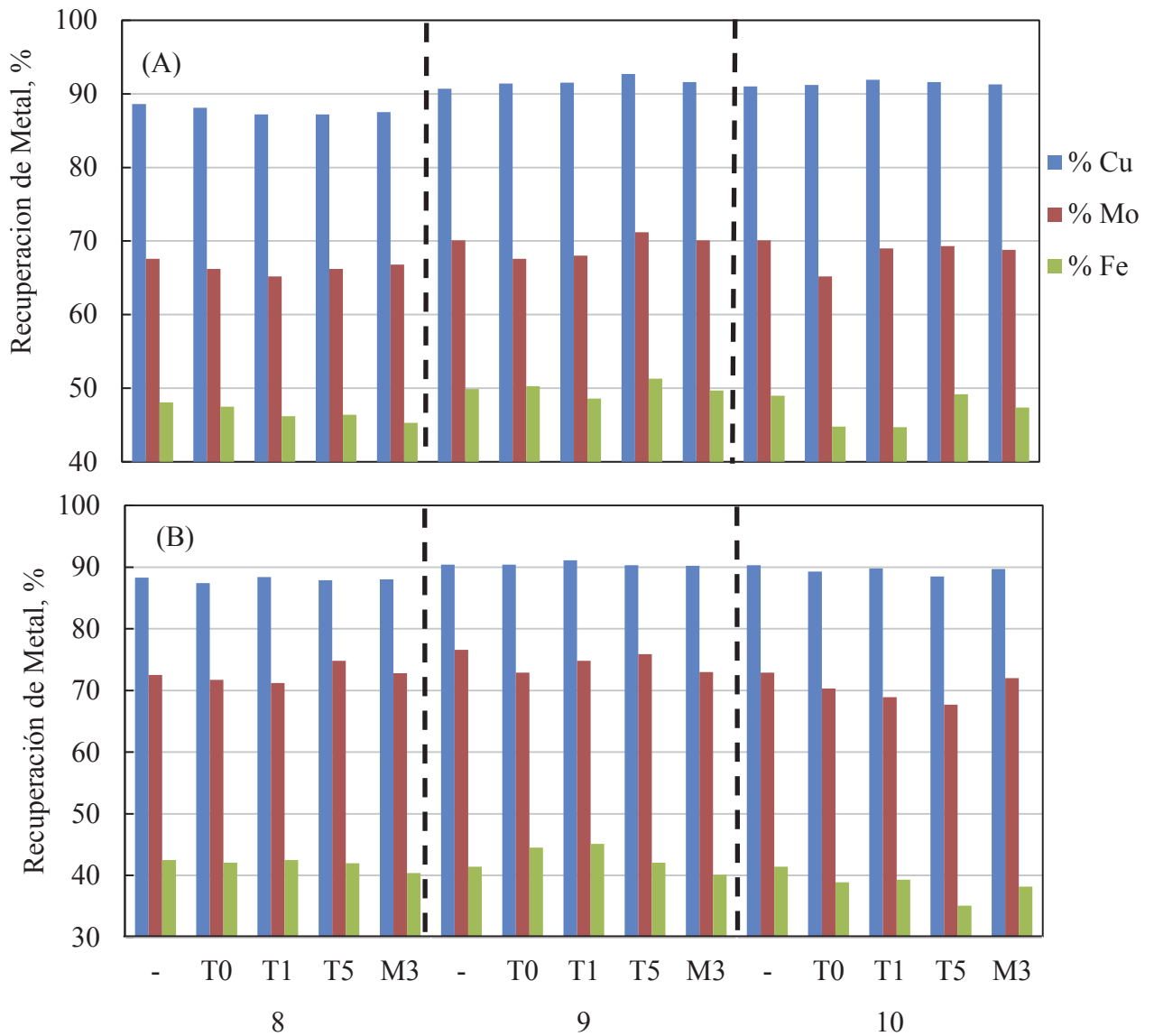


Figura 6.1: (A) Recuperaciones de Cu, Mo y Fe, con material proveniente de la línea SAG a distintos pH. (B) Recuperaciones de Cu, Mo y Fe, con material proveniente de la línea Convencional a distintos pH.

De las pruebas preliminares se aprecia que el quebracho tiene un efecto levemente positivo en la depresión de Fe para todos los valores de pH. Para los reactivos Flotan T1, T5 Y M3 mostraron mejores recuperaciones, especialmente a pH: 9 para los 2 tipos de mineral tratado, para mineral SAG la mejores recuperaciones fueron de 91.5% Cu y 48.6% para Fe Versus el estándar al mismo pH de 90.7 y 49.9 % Cu y Fe respectivamente, en tanto para la línea convencional, los mejores resultados son de 90.2% de Cu y 40.1% de Fe comparado a la estándar de 90.4 y 44.5 % de Cu y Fe respectivamente; es así como nace la nueva serie de

pruebas descritas en el trabajo experimental (pág. 45), con el fin de aprobar o descartar definitivamente el uso de este nuevo reactivo.

A continuación la Tabla 6.1 se observan los resultados de recuperaciones para Cu, Mo y Fe para las dos líneas de mineral SAG y convencional, en tres niveles de pH (8 ,9 y 10) de las pruebas preliminares.

Tabla 6.1: Resultados recuperaciones Cu, Mo y Fe para las pruebas preliminares

pH	QUEBRACHO FLOTAN	RECUPERACIÓN					
		SAG			CONVENCIONAL		
		Cu(%)	Mo(%)	Fe(%)	Cu(%)	Mo(%)	Fe(%)
8		88.6	67.6	48.1	88.3	72.5	42.5
	T0	88.1	66.2	47.5	87.4	71.7	42.1
	T1	87.2	65.2	46.2	88.4	71.2	42.5
	T5	87.2	66.2	46.4	87.9	74.8	42.0
	M3	87.5	66.8	45.3	88.0	72.8	40.4
9		90.7	70.1	49.9	90.4	76.6	41.4
	T0	91.4	67.6	50.3	90.4	72.9	44.5
	T1	91.5	68.0	48.6	91.1	74.8	45.1
	T5	92.7	71.2	51.3	90.3	75.9	42.1
	M3	91.6	70.1	49.7	90.2	73.0	40.1
10		91.0	70.1	49.0	90.3	72.9	41.4
	T0	91.2	65.2	44.8	89.3	70.3	38.9
	T1	91.9	69.0	44.7	89.8	68.9	39.3
	T5	91.6	69.3	49.2	88.5	67.7	35.1
	M3	91.3	68.8	47.4	89.7	72.0	38.2

En la Tabla 6.1 se puede ver lo descrito anteriormente donde los mejores resultados son a pH: 9 y el Quebracho tipo M3 y T5.

6.1.2 Preparación de muestras de mineral mixto

Para realizar las pruebas de flotación se hizo un composito mineral a diferencias de la pruebas preliminares las cuales fueron por líneas separadas de mineral, en este caso se juntaron ambas líneas, SAG y Convencional con una relación 60 y 40 % respectivamente, debido que al momento de la etapa de flotación ambos minerales ya están mezclados. Para esto se tomaron 25 kg de mineral SAG, proveniente de la mina Sur-Sur y 20 kg de mineral Convencional proveniente de la mina subterránea, los minerales fueron mezclados en el homogenizador tipo

pantalón del laboratorio metalúrgico de la planta concentradora de DAND, luego de tener el material homogenizado se hicieron las muestras de mineral mixto con 1180 g cada uno.

6.1.2.1 Cinética de Molienda

Para comenzar con la cinética de molienda es necesario buscar el P_{80} del mineral previo a la molienda, para esto se toma una muestra de mineral mixto y se realiza análisis granulométrico donde el mineral se pasa por una serie de tamices desde la malla 10 hasta la 400.

Para la etapa de flotación es necesario tener cierto tamaño de partícula (P_{80}), en este caso es de 212 μm , para llegar a ese tamaño fue necesario buscar el tiempo óptimo de molienda. Para esto se tomaron dos muestras de mineral y se molieron durante 15 y 16 minutos cada uno. Con los resultados de estas moliendas se calculó el tiempo necesario para llegar al P_{80} deseado. Finalmente se realizó la molienda con el tiempo calculado y se verifica si el P_{80} es el que se busca. En la Fig. 6.2 se observan los resultados de las cinéticas de molienda, para los minutos 0, 15, 16

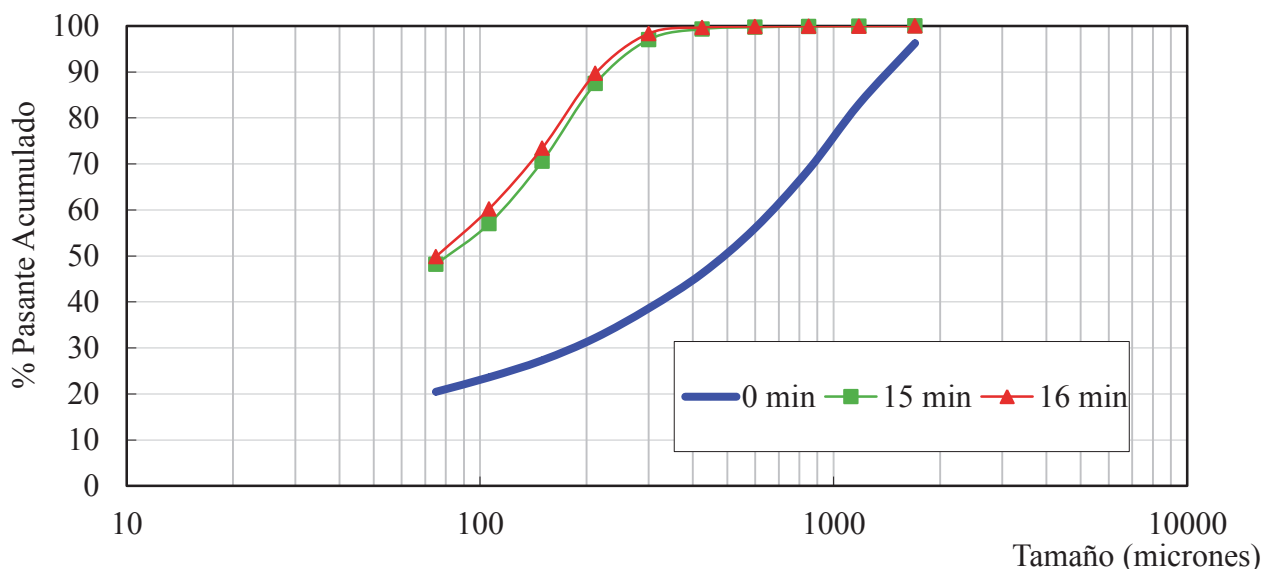


Figura 6.2: Perfiles granulométricos obtenidos para cada tiempo de molienda; 0, 15 y 16.

En la Fig. 6.2 se observan los perfiles granulométricos de la cinética de molienda, el tiempo cero es el mineral sin molienda. Se puede ver que los tiempos 15 y 16 muestran granulometrías muy similares pero más fina a la necesaria es por esto que se molió a menor

tiempo 12 minutos y 40 segundos y se obtuvo la granulometría deseada. A continuación en la Fig. 6.3 se pueden observar los P_{80} obtenidos para cada tiempo de molienda.

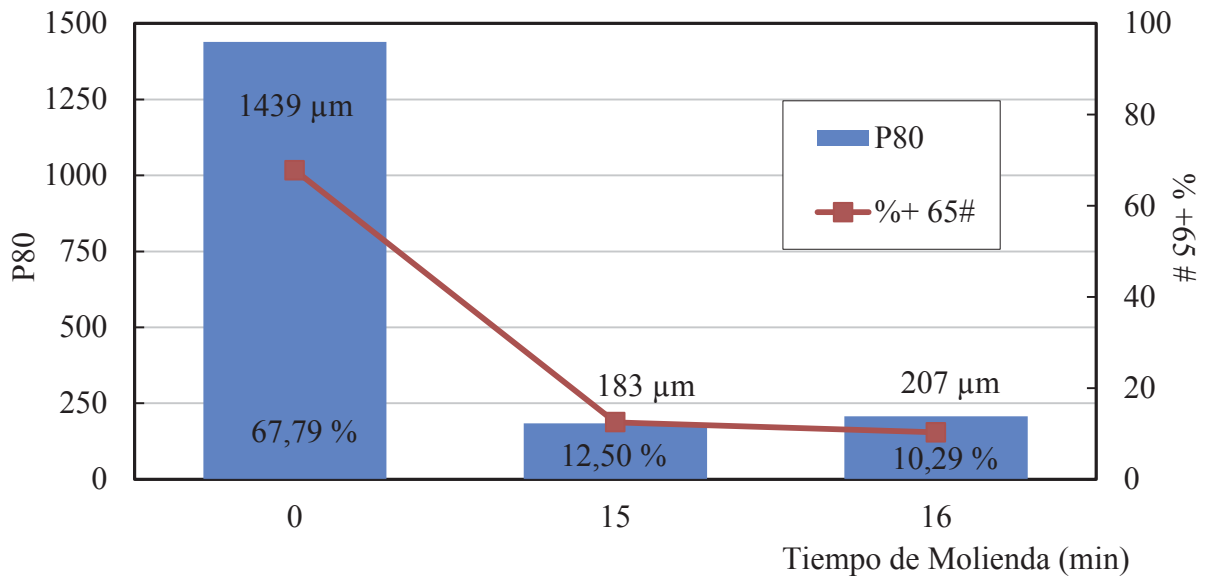


Figura 6.3: P_{80} y % +65# versus tiempo de molienda

Como se observa en la Fig. 6.3 se observan los P_{80} y +65# de cada tiempo de molienda 0, 15 y 16. Mediante interpolación se determinó el P_{80} para el mineral mixto en cada tiempo. El F_{80} de la muestra de mineral mixto fue de 1439 μm , al minuto 15 y 16 se obtuvo un P_{80} de 183 y 207 μm , respectivamente, ambos valores por debajo el tamaño deseado (212 μm), es por esto que mediante interpolación se calculó el tiempo necesario para obtener el tamaño deseado. Como resultado de esto se obtiene un tiempo de 12 minutos 40 segundos. Luego se realizó un nuevo test de molienda con el tiempo obtenido en al interpolación (12min 40 seg), esto es para validar el tamaño de partícula requerido. El resultado del test mostró que se obtuvo un tamaño de 212 μm con un 20.8% +65#, validando el tiempo obtenido. Los valores obtenidos para cada tiempo de molienda son detallados en el Anexo C.1.

6.1.2.2 Análisis Químico y Mineralógico

Se realizó un análisis mineralógico de la muestra proveniente del mineral mixto. Los resultados del análisis mineralógico se presentan en la Tabla 6.2 dado en % en peso de cada especie identificada.

Tabla 6.2: Análisis mineralógico

Especies	Fórmula Química	Composición Mineralógica
		% en Peso
Calcopirita	CuFeS_2	2.591
Calcosina	Cu_2S	0.003
Digenita	Cu_9S_5	0.000
Covelina	CuS	0.004
Bornita	Cu_5FeS_4	0.021
Enargita	Cu_3AsS_4	0.086
Cuprita	Cu_2O	0.000
Cobre Nativo	Cu	0.000
Molibdenita	MoS_2	0.062
Pirrotina	$\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}$	0.000
Pirita	FeS_2	2.464
Blenda	ZnS	0.044
Galena	PbS	0.000
Limonita	$\text{Fe}_2\text{O}_3\text{H}_2\text{O}$	0.017
Magnetita	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{FeO}$	0.861
Hematita	Fe_2O_3	0.000
Ilmenita	Fe_2TiO_3	0.027
Rutilo	TiO_2	0.779
Ganga	-	93.040

El mineral tratado contiene principalmente Calcopirita, Enargita, Pirita y ganga, en menor medida Covelina y Calcosina. Se destaca la alta presencia de Enargita introduciendo As al sistema y Magnetita incorporando gran cantidad de Fe.

Además las muestras fueron analizadas químicamente obteniendo los % de metales tales como Cu, Mo, Fe e insoluble. En la Tabla 6.3 se muestra la ley de cabeza de las muestras de mineral mixto que serán utilizadas en las pruebas de flotación.

Tabla 6.3: Análisis Químico

Muestra	Cu%	Mo%	Fe%	Insoluble
Mixto	0.74	0.022	4.5	75.5

Como se observa en la Tabla 6.3 el contenido de cobre total es más bajo que el promedio de ley de cabeza utilizado en DAND que es de 0.9% Cu, esto se debe a la mayor cantidad de ganga en la muestra.

6.1.3 Pruebas de Flotación Rougher.

En la tabla 6.4 se presenta el resumen de los resultados metalúrgicos obtenidos en las pruebas de flotación Rougher bajo las condiciones dada en la Tabla 6.4. En el Anexo C.2 se pueden ver los resultados específicos de cada prueba.

Tabla 6.4: Resultados recuperación pruebas Flotación Rougher

pH	Quebracho		Silicato (g/t)	Recuperación			
	Tipo	Dosis (g/t)		Cu(%)	Mo(%)	Fe(%)	Ins(%)
10				91.38	77.59	47.65	12.82
9			30	92.13	77.93	46.77	12.79
10			30	92.28	77.60	45.70	12.71
		30	30	91.32	77.12	47.12	12.68
	T1	60	30	91.16	75.17	46.28	12.63
		60		91.08	75.98	46.99	12.28
		30	30	91.72	77.07	45.22	12.61
9	T5	60	30	91.59	77.61	46.80	12.89
		60		91.38	77.79	46.56	12.72
		30	30	91.80	77.26	45.44	12.55
	M3	60	30	91.69	77.41	45.26	12.27
		60		91.58	76.20	45.81	12.83

Se puede ver que con una dosis de 30 g/ton de Quebracho se obtienen mejores resultados en todas las recuperación que al utilizar 60 g/ton, para el Cu la recuperación estándar es de

91.38%, de los tres tipos de quebracho el que da mejores resultados es el tipo M3 llegando al a los 91.80%, superando a la estándar en 0.42 puntos porcentuales, con una dosis de 30 g/ton y el de menor recuperación es del tipo T1 incluso por debajo de la estándar. Con respecto al molibdeno la de mejor resultado es el tipo T5 alcanzando los 77.79% de recuperación, para el quebracho tipo T1 se observa el mismo comportamiento anterior, disminuye las recuperaciones, el molibdeno muestra mínimos descensos en la recuperación comparado con la estándar a pH 10, esto debido a que la flotabilidad es mejor a pH más alcalinos.

Para el Fe se puede observar que nuevamente el quebracho tipo M3 muestra mejores resultados con 2.39 puntos porcentuales por debajo de la estándar y 0.55 puntos menos para el insoluble, esto se debe al efecto depresor de los reactivos Floatan . Los buenos resultados que entrega el quebracho tipo M3 se deben a que este además de ser un reactivo depresor de Fe se utiliza como dispersante de ganga. Se observa que en la prueba estándar, la recuperación de Insoluble es de 12.82%, esto se debe a que la ganga está constituida principalmente de carbonatos, silicatos y óxidos, los que están muy activados y flotan con facilidad, es por eso la necesidad de agrega algún depresor específico, como son los extractos de quebracho o silicato de sodio ya que depresan la mayor cantidad de insolubles presentes en el proceso y con esto permiten que los reactivos adicionados al proceso trabajen más libre.

Si hablamos respecto al uso del silicato de sodio las recuperaciones son más bajas sin el uso de este reactivo esto se debe a la propiedad dispersante del silicato de sodio que mantiene a las partículas indeseables de la ganga en la fase del agua mientras las partículas cobre son flotadas a la superficie por las burbujas de aire, mientras tanto la recuperación de molibdeno sigue en descenso, al utilizar solo este reactivo se observan mejores recuperaciones tanto en Cobre como en molibdeno incluso mayores que las obtenidas con los tres tipos de quebracho, la depresión de fierro también muestra resultados satisfactorios y el insoluble se mantiene, los mejores resultados a pH 10. Las mayores recuperaciones de Cu obtenidas en los análisis corresponden a las flotaciones realizadas con silicato de sodio sin adición de reactivo quebracho, con recuperaciones de 92.13% y 92.28% Cu para los pH 9 y 10, respectivamente, recuperaciones de Mo de 77.93% y 77.60% a pH 9 y 10 respectivamente, superando en ambos casos a las recuperaciones obtenidas con el estándar (sin adición de Silicato de Sodio) a pH: 10, con 91.38% Cu y 77.59% Mo. En cuanto al análisis realizado al Fe se observó una

disminución de la recuperación de 0,88% y 1,95% a pH 9 y 10, respectivamente, con respecto al estándar.

De los tres extractos de quebracho utilizados el de mejor resultados es el Floatan M3, esto se debe a que es un dispersante de lamas, sin embargo, se observa que tiene algún poder como depresor, probablemente, debido a la presencia de un sitio activo en el ciclo benceno de la molécula fenólica que caracteriza el poder de adsorción de los extractos de quebracho. Se debe considerar que todas las pruebas son a pH: 9, esto quiere, menor consumo de cal.

También se analizó en conjunto el consumo de cal, en la Fig. 6.4 se observa que entre todas la pruebas realizadas, el que muestra menor consumo de cal es al utilizar sólo quebracho tipo M3, esto quiere decir que con una menor cantidad de cal agregada a la flotación se llegará más rápido al pH deseado, en cambio el quebracho tipo T1 es que muestra el mayor consumo de cal.

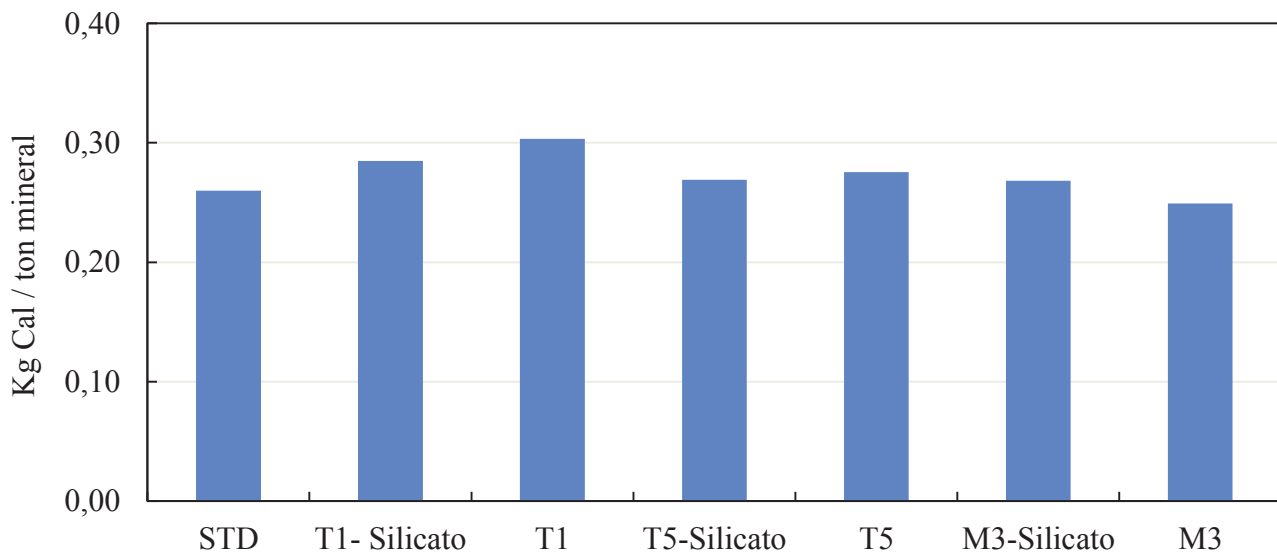


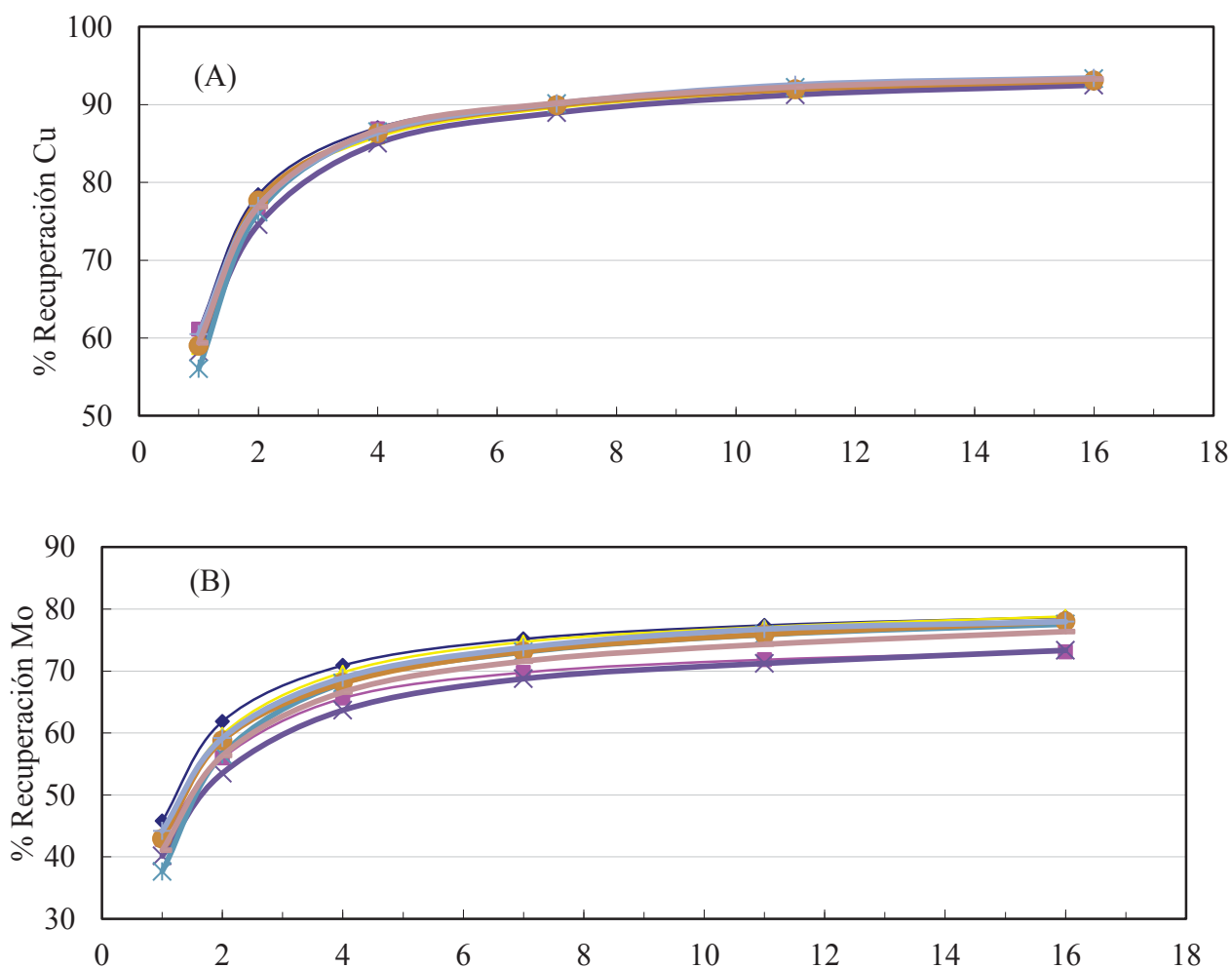
Figura 6.4: Grafico consumo de cal a pH 10.5 en Kg por tonelada de mineral

La Fig. 6.4 muestra claramente lo descrito anteriormente, el quebracho tipo M3 tiene un gasto de 0.25 kg de cal por tonelada de mineral en comparación al quebracho tipo T1 con un consumo de 0.30 kg de cal por tonelada de mineral. Se debe destacar que la disminución del consumo de cal no es significativo. Es importante recordar que el uso de cal para alcalinizar el sistema introduce el ion calcio en el medio de flotación, este tiene un efecto depresor sobre la pirita, esto a pH superior a 10. Los resultados se pueden ver en el Anexo C3

6.1.5 Cinética de Flotación

Para dar fin a las pruebas con extractos de quebracho se tomó la decisión de hacer pruebas de cinética de flotación. Como en los resultados anteriores no se observaron incrementos significativos en las recuperaciones tanto de Cobre como molibdeno, se realizaron pruebas cinéticas para ver si al utilizar este tipo de reactivos el tiempo de flotación puede ser menor y con esto poder pasar más tratamiento por la planta porque se reduciría el tiempo de residencia de la pulpa en las celdas. En el Anexo C.4 se puede ver el detalle de los resultados.

La Fig. 6.5 se pueden ver las recuperaciones de Cu, Mo, Fe e Insoluble de las pruebas de cinética de flotación.



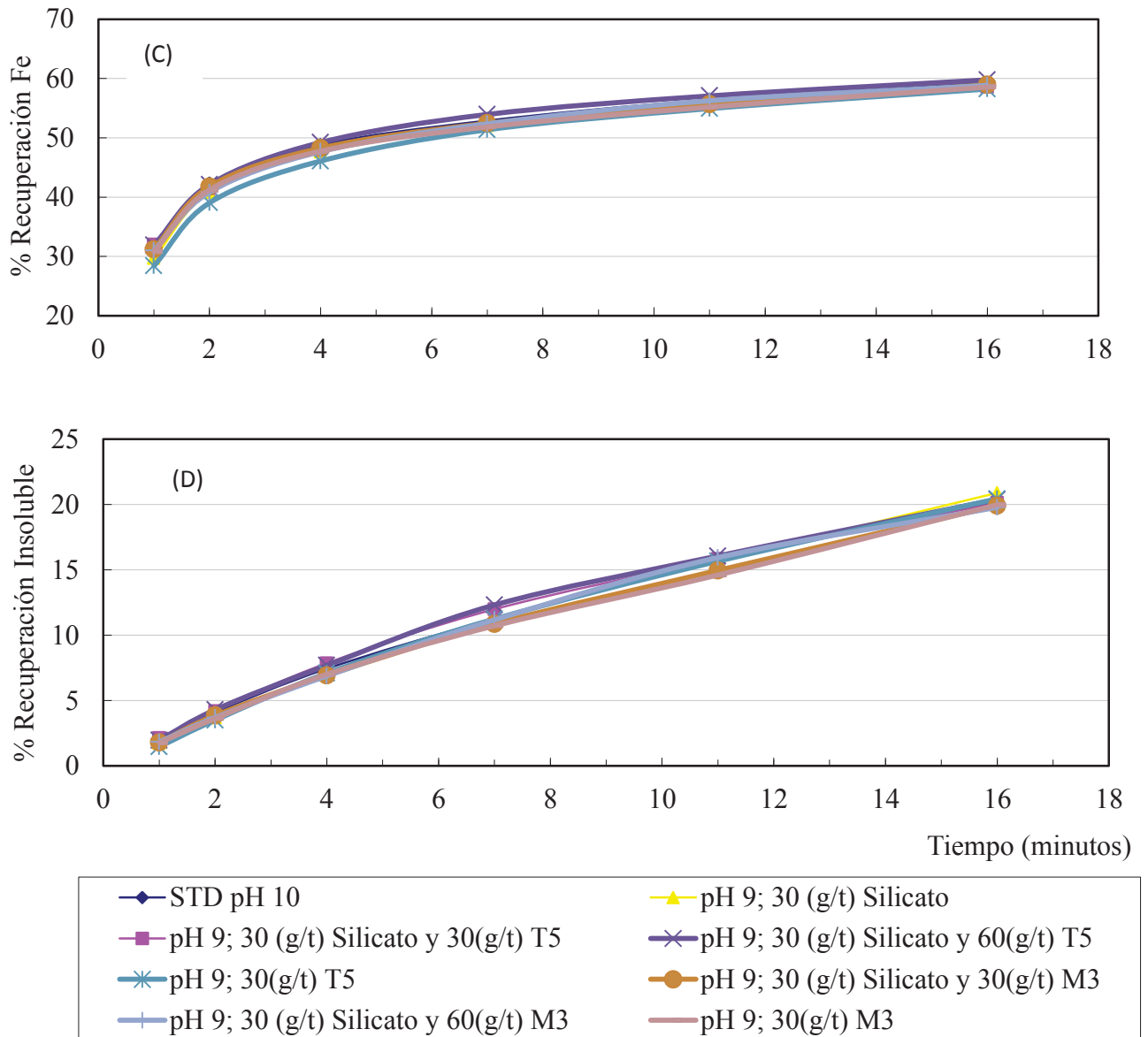


Figura 6.5: (A) Recuperaciones de Cu, (B) Recuperaciones Mo, (C) Recuperaciones Fe, (D) Recuperaciones Insoluble

De la Fig. 6.5 (A) se observa que para todas las pruebas realizadas las curvas de cinética para el cobre son similares esto quiere decir que independiente de la mezcla de reactivo que utilice, la influencia de los reactivos de quebracho no son significativos sobre la cinética de flotación.

La recuperación de cobre tiene un rápido aumento en los minutos iniciales, sobre todo en el primer minuto en donde flota el 80%. A partir del minuto 4 la velocidad específica de flotación del cobre tiende a atenuarse.

En la Fig. 6.5 (B) se observa que a medida que aumenta el tiempo de flotación se produce un aumento considerable hasta el minuto 4 luego se mantiene constante la recuperación en el tiempo. Como también se observa en las pruebas de flotación Rougher con el uso de los distintos tipos de quebracho la recuperación de Mo disminuye con respecto a la estándar. La recuperación de molibdeno en el concentrado aumenta en forma más lenta respecto de la recuperación de cobre

En la Fig. 6.5 (C) se puede ver que las curvas muestran comportamiento similar entre ellas es decir no se diferencia entre las que utilizaron reactivo quebracho y las que, además la curva de recuperación tiende a aumentar con el tiempo y si lo comparamos con la recuperación de cobre sus velocidades específicas de flotación son similares, es decir mientras más recuperemos Cu estaremos, al mismo tiempo, recuperando Fe. Como consecuencia la acción depresora del extracto de quebracho no atenúa la recuperación de Fe en el tiempo ni tampoco entrega resultados llamativos en la recuperación de Cu.

De la Fig. 6.5 (D) se observa que para todas las pruebas realizadas las curvas de cinética para el insoluble son prácticamente coincidentes, esto quiere decir que independiente de la mezcla de reactivo que utilice la recuperación será la misma para todas la pruebas, pero muy variable en el tiempo, el insoluble tiene una rápida recuperación, es decir, que el tiempo de flotación y la recuperación es en forma lineal. Las curvas de recuperación de insoluble indican que tiene una velocidad específica de flotación mucho más alta que el Cu y el Fe, este efecto hace que el insoluble se recupera más rápido en el tiempo que los demás metales

En general, las pruebas estándar (sin adición de reactivo Quebracho) presenta recuperaciones levemente menores para Cu, Mo y Fe con respecto a las realizadas con los distintos tipos de Quebracho, quedando la mayor variación en 0.34 puntos porcentuales al utilizar 30 g/ton de reactivo quebracho tipo M3 mezclado con la misma dosis de silicato de sodio. Se observa un efecto positivo en la depresión de Fe pero no relevante que era el objetivo principal su máxima variación respecto al estándar es de 2.39 puntos porcentuales menos; se debe considerar que las pruebas fueron realizadas a pH: 9, es decir, se reduce el consumo de cal.

En cuanto a la comparación entre los tipos de reactivo Quebracho Floatan utilizados estos no impiden totalmente la flotación de pirita, el tipo M3 es el que produce mayor recuperación de Cu y Mo y a la vez disminuye el Fe e insolubles.

Posiblemente el mecanismo de interacción entre los extractos de quebracho y los minerales hidrofóbicos, podría ocurrir por uniones entre los puentes hidrógenos de los grupos $-OH$ de las moléculas del quebracho sobre las caras hidrofóbicas de este mineral, por lo tanto el efecto depresor del quebracho sobre los sulfuros de cobre es limitado cuando el mineral de cobre mayoritario es la calcopirita y si además hay una reducida presencia de minerales secundarios.

Se debe destacar que se obtuvo máximo aumento de recuperación de Cu, Fe y Mo utilizando solo silicato de sodio, con un aumento de 0.9 puntos porcentuales a pH 10 con respecto a la prueba estándar. Los resultados de las pruebas con silicato de sodio son los más significativos, indican que podría esperarse un aumento en la recuperación de Cu y Mo, por lo tanto, es conveniente seguir evaluando sus propiedades dispersantes y depresantes en la flotación de sulfuros.

Finalmente al analizar estos resultados más los de las pruebas preliminares realizadas por SGS CIMM, se puede descartar el uso de este tipo de reactivo, por no cumplir con su objetivo de disminuir el consumo de cal.

6.2 EFECTO DE LA REACTIVIDAD DE CAL

6.2.1 Índice Reactividad a distintas razones agua: cal, según norma ASTM C-110

A continuación se presenta el efecto de la reactividad de la cal a diferentes condiciones de trabajo. Primeramente se presenta el análisis granulométrico de la cal el cual es mostrado en la Fig. .6.6

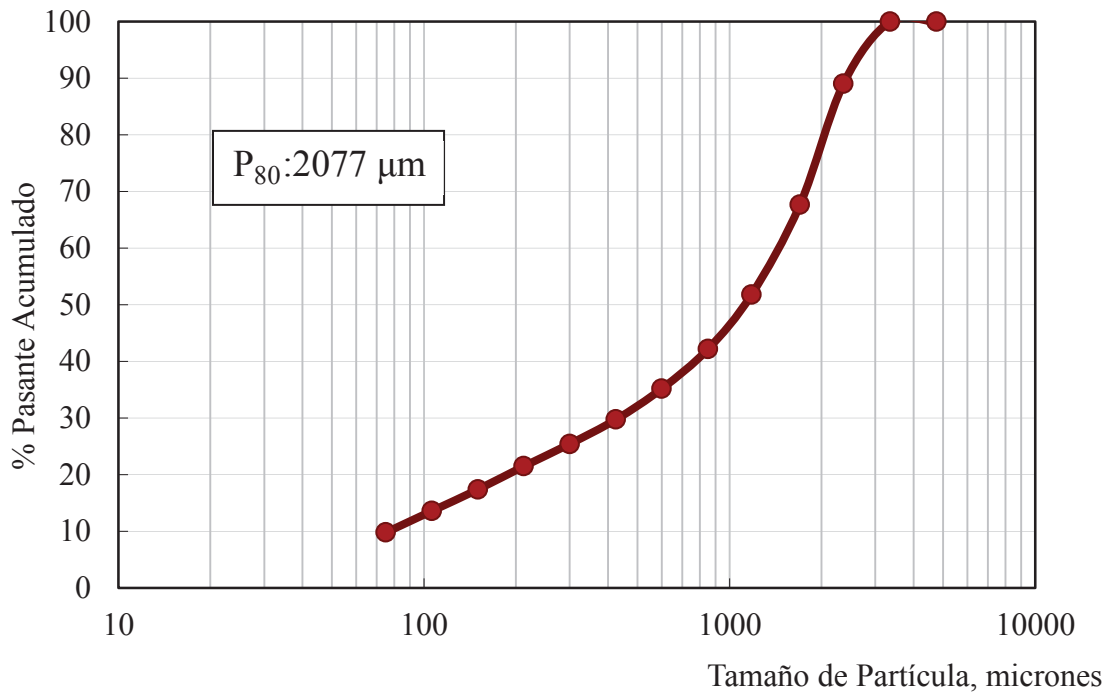


Figura 6.6: Perfil Granulométrico muestra de cal

En la Fig. 6.6 se observa el perfil granulométrico de la muestra de cal seleccionada para las pruebas, mediante una interpolación se pudo determinar que el P₈₀ de la muestra es 2077 μm, con una ley CaO: 81,6% (ver resultados en Anexo C5)

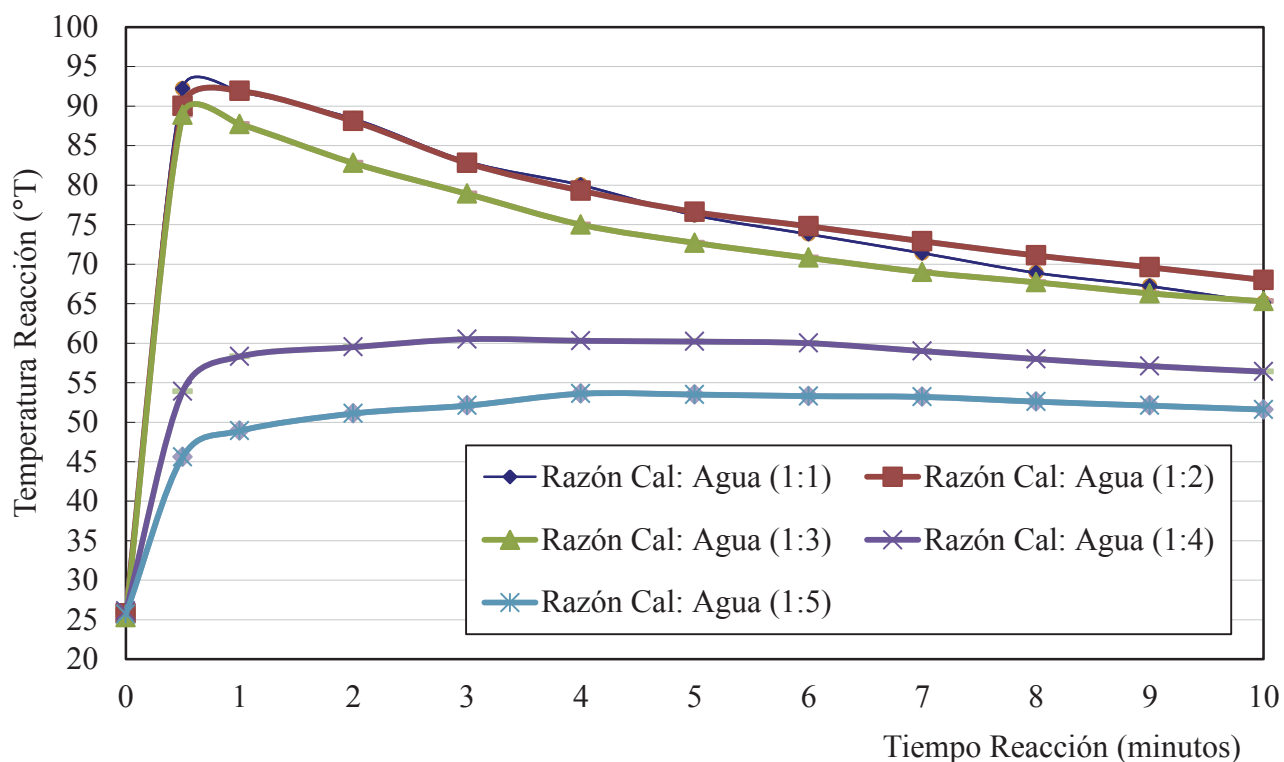


Figura 6.7: Temperatura generada por la reactividad de la Cal según norma ASTM C-110

En la Fig.6.7 se observa la reactividad de una muestra de cal según norma ASTM C-110 a diferentes razones de agua-cal, con una temperatura de agua de apagado de 25°C, 100 g de esta cal son apagados a diferentes volúmenes de agua, según lo indica la proporción. Las razones 1:1, 1:2 y 1:3 muestran curvas similares alcanzando a los tres minutos las temperaturas de 92, 78.5 y 69.5 °C, respectivamente, a diferencia de las pruebas con razones 1:4 y 1:5 que a los tres minutos son temperaturas son 60.4 y 40.1°C, respectivamente. Se observa que mientras más alta es la temperatura del proceso de apagado, más corto es el tiempo de apagado (Ver resultados en Anexo C6)

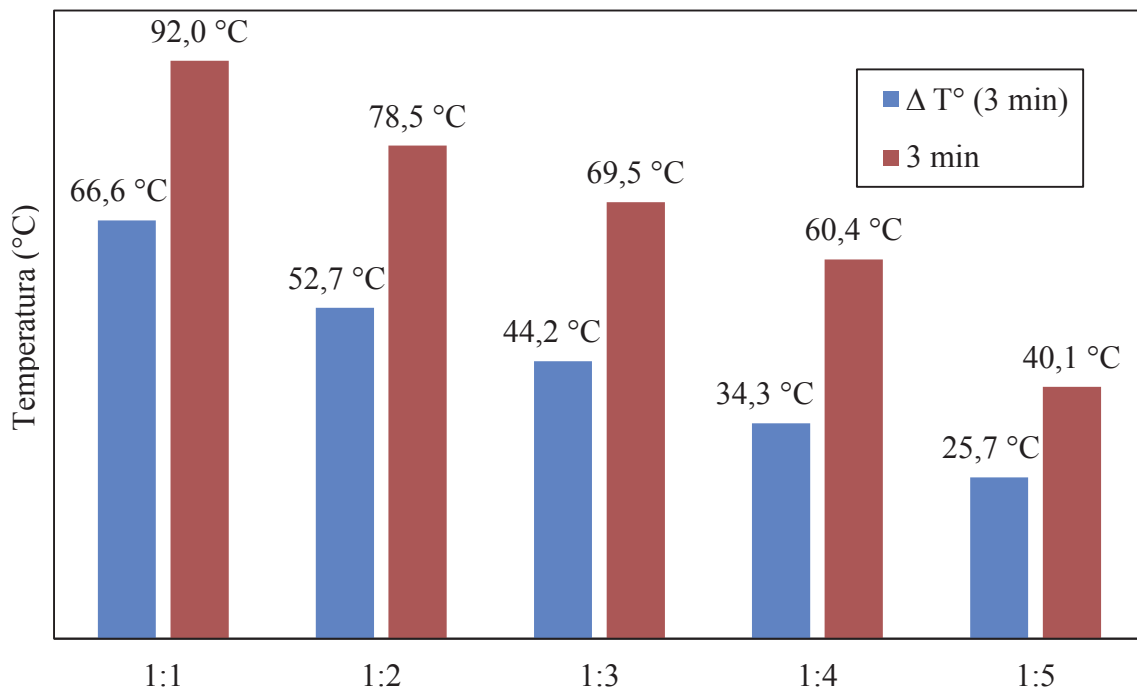


Figura 6.8: ΔT a los tres minutos de reacción

Según la norma ASTM una cal es altamente reactiva si utilizando una razón agua-cal de 1:4 se obtiene una ΔT a los tres minutos de 40°C, la Fig.6.8 muestra que a la misma razón se obtiene un ΔT de 34.3 °C, esto quiere decir que la cal utilizada no entra en el rango de alta reactividad, por lo tanto, se puede considerar de media reactividad completando su reacción con 56°C en 12 minutos.

Aunque desde un punto de vista teórico, una temperatura alrededor de 100 °C es deseable en el apagado de la cal, desde un punto de vista práctico es difícil obtener sin problemas tanto para la seguridad, como por un apagado alterado por la aglomeración, porque la cal a mayor temperatura es menos soluble por la cantidad de agua necesaria para la reacción.

En los laboratorio es factible preparar lechadas de cal a la temperatura de 99°C, lo que no es repetible en algunas faenas, en particular en aquellas a gran altura geográfica, como lo es en DAND donde la presión atmosférica es menor que la normal y el agua disminuye su punto de ebullición, por lo que la generación de vapor por un lado puede afectar en la operación de apagado y por otro, generar un aprovechamiento ineficiente del recurso hídrico, al aumentar la pérdida de éste.

Mantener constante la relación agua: cal no garantiza una temperatura constante de apagado, ya que esta variará dependiendo de la reactividad de la cal utilizada, es por esto que es necesario mantener el control de temperatura.

Pruebas de apagado ejecutadas con la misma cal pero con diferentes proporciones de agua, mostraron diferencias significativas en la tasa de sedimentación, esto se produce por que la granulometría de las lechadas es diferente para cada razón. En la Fig. 6.9 se observa el perfil granulométrico de cada prueba de reactividad. (Ver resultados en Anexo C7)

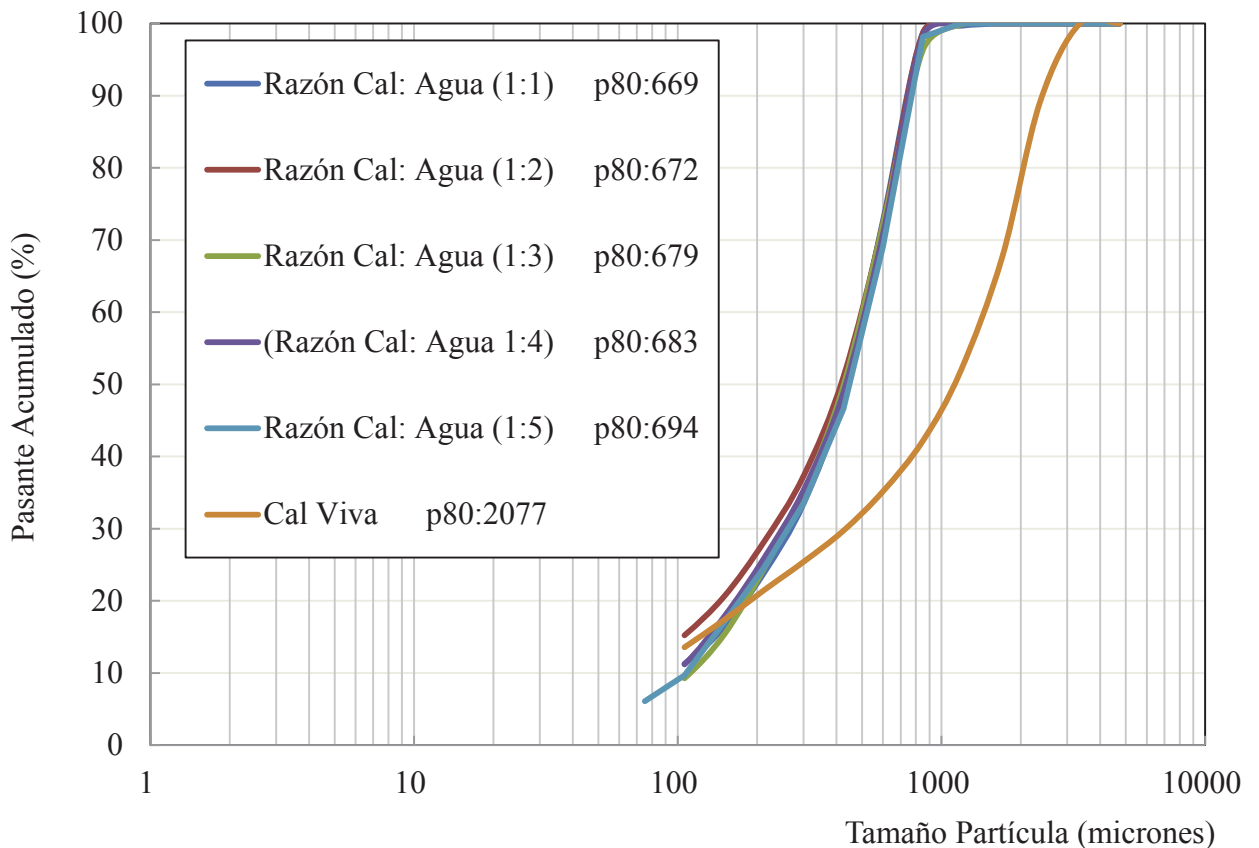


Figura 6.9: Perfiles granulométricos de Lechada de cal

A continuación en la Fig. 6.10 se observa la relación entre el volumen de agua durante el apagado y la granulometría de la lechada.

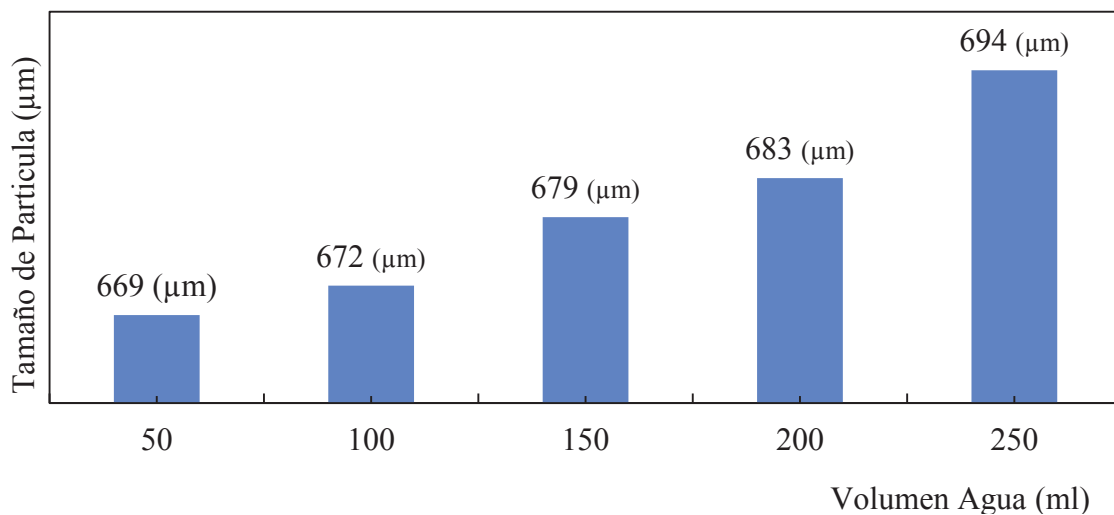


Figura 6.10: Efecto del volumen de agua versus granulometría de lechada

La Fig. 6.10 indica claramente que un exceso de agua utilizada en la hidratación dará por resultado partículas más gruesas esto se debe a que mientras mayor sea la temperatura de apagado, más fino será el tamaño de las partículas de la cal hidratada y esto afectará directamente en la sedimentación del proceso y puede provocar problemas de embanque en la líneas de transporte.

A continuación los resultados de consumo de cal, según la proporción agua: cal.

Las Fig. 6.11 (A) y (B) muestran los consumos de cal para distintas razones cal: agua para las dos líneas de mineral convencional y SAG respectivamente.

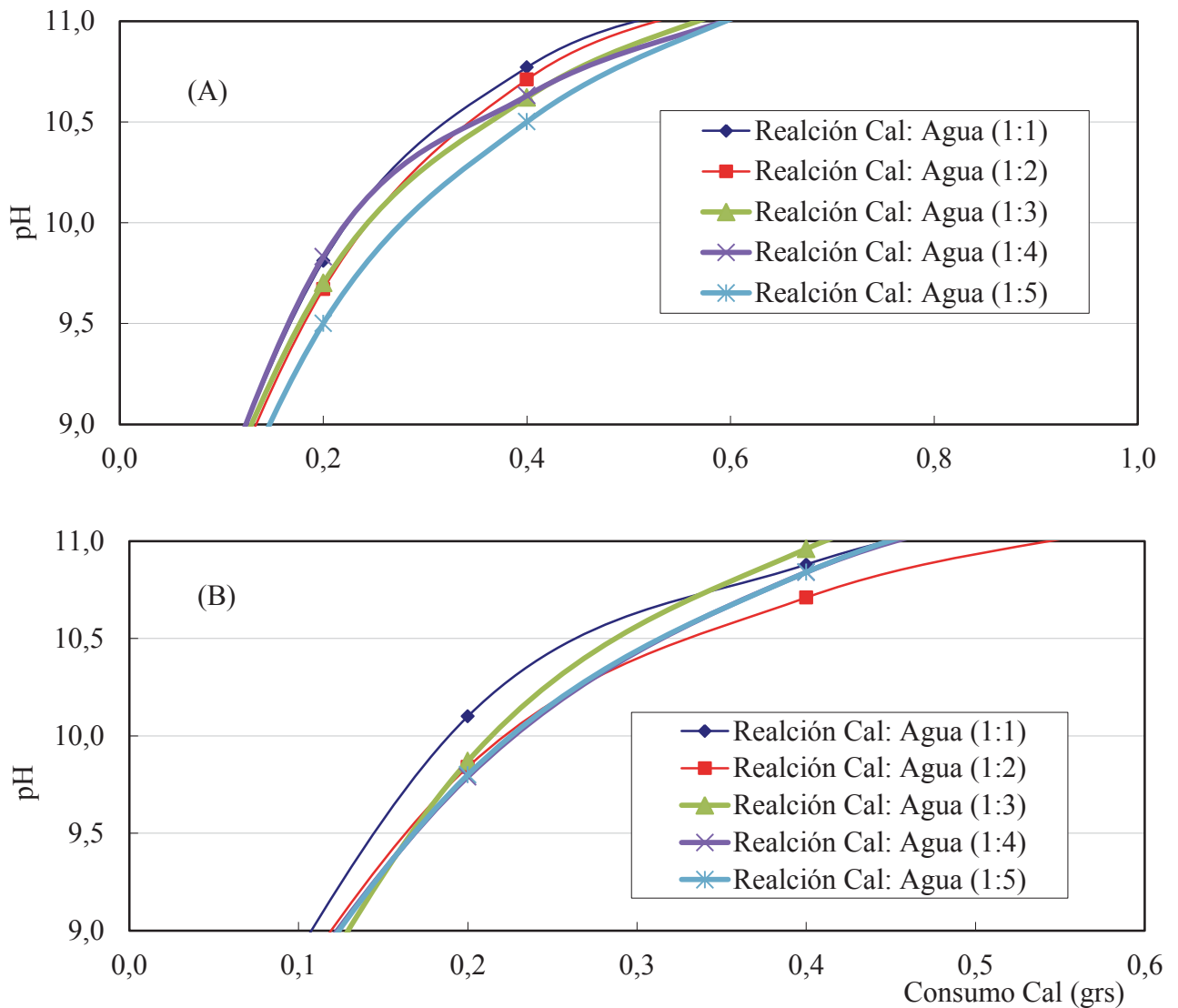


Figura 6.11: (A) Consumo de cal, mineral proveniente molienda Convencional;
(B) Consumo de cal, mineral proveniente molienda SAG

Las Fig. 6.11 (A) Y (B) muestran el comportamiento del consumo de cal con respecto a la proporción agua: cal según tipo de mineral, esto demuestra que el consumo es menor al utilizar una razón 1:1, esto quiere decir según la Fig. 6.9 (pág. 74) partículas más finas versus el de mayor consumo en la razón 1:5, el mismo comportamiento se puede observar por ambas líneas de mineral, esto se debe que las partículas pequeñas de cal hidratada producen mayor área superficial, y la mayor área superficial produce un menor consumo de cal, es por esto que se recomienda mantener la temperatura de apagado alrededor de 80°C, mediante el control de agua adicionada. Si bien esta medida causará una disminución en la solubilidad de la cal, esta puede ser obviada mediante un aumento de la capacidad de almacenamiento de lechada. (Ver resultados en Anexo C8)

6.2.1 Índice Reactividad a distintas razones agua: cal, con agua fría.

El punto anterior da a conocer los resultados de reactividad de cal con temperaturas inicial de agua a 25°C pero la realidad de DAND es que los calefactores de las plantas de cal están fuera de funcionamiento por estar en mal estado, lo que provoca que la temperatura de agua no supere los 10 °C, por tanto fue necesario realizar nuevas pruebas de reactividad pero con agua a temperatura normal (no precalentándola).

En la Fig. 6.12 se observan las curvas de reactividad para distintas razones cal: agua con una temperatura inicial de 6°C. Los resultados se pueden ver en Anexo C9:

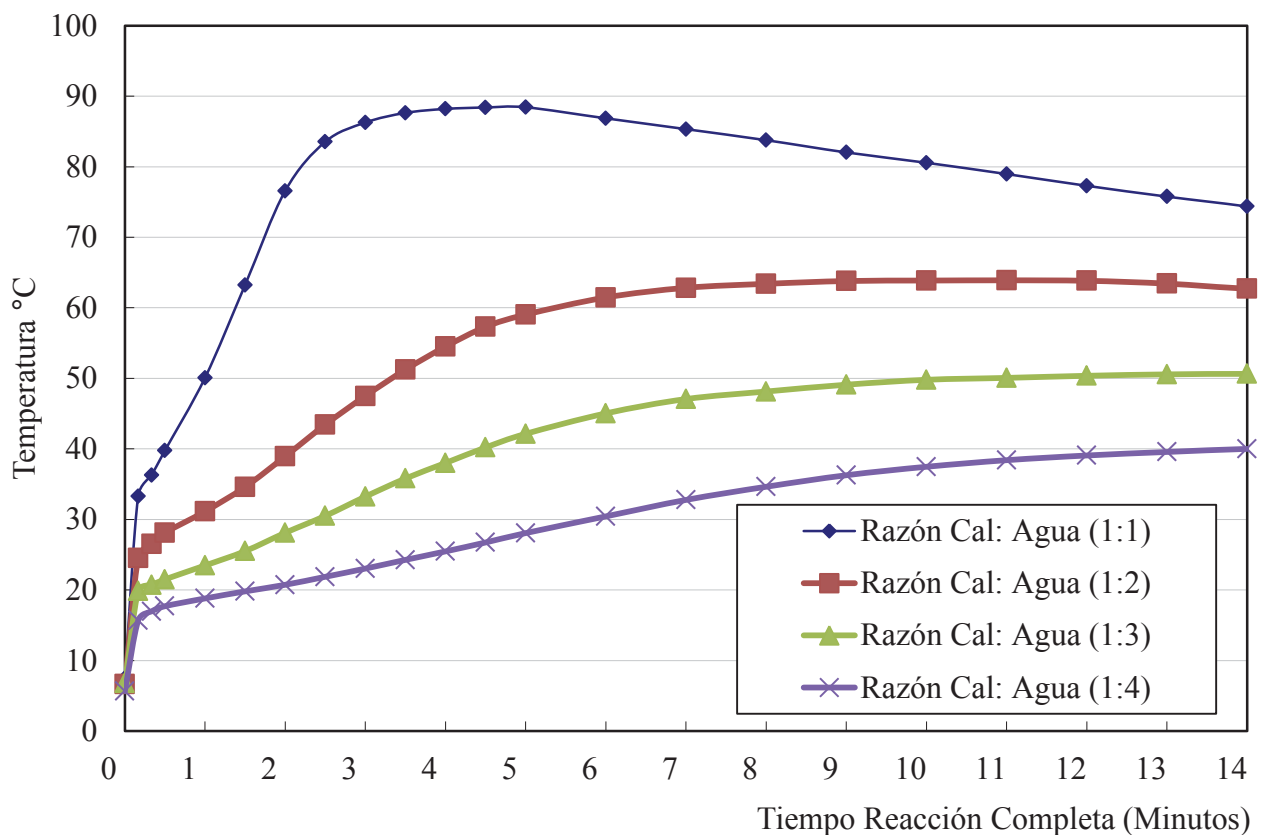


Figura 6.12: Temperatura generada por la reactividad de la cal a distintas razones, con agua fría

Se observa en la Fig. 6.12 que los máximos de temperaturas son mucho menores a los obtenidos de las pruebas anteriores. Se eliminó la razón 1:5 porque no es capaz de alcanzar la temperatura mínima de reacción.

A continuación en la Fig. 6.13 se observa la diferencia de temperatura a los tres minutos para cada razón cal: agua.

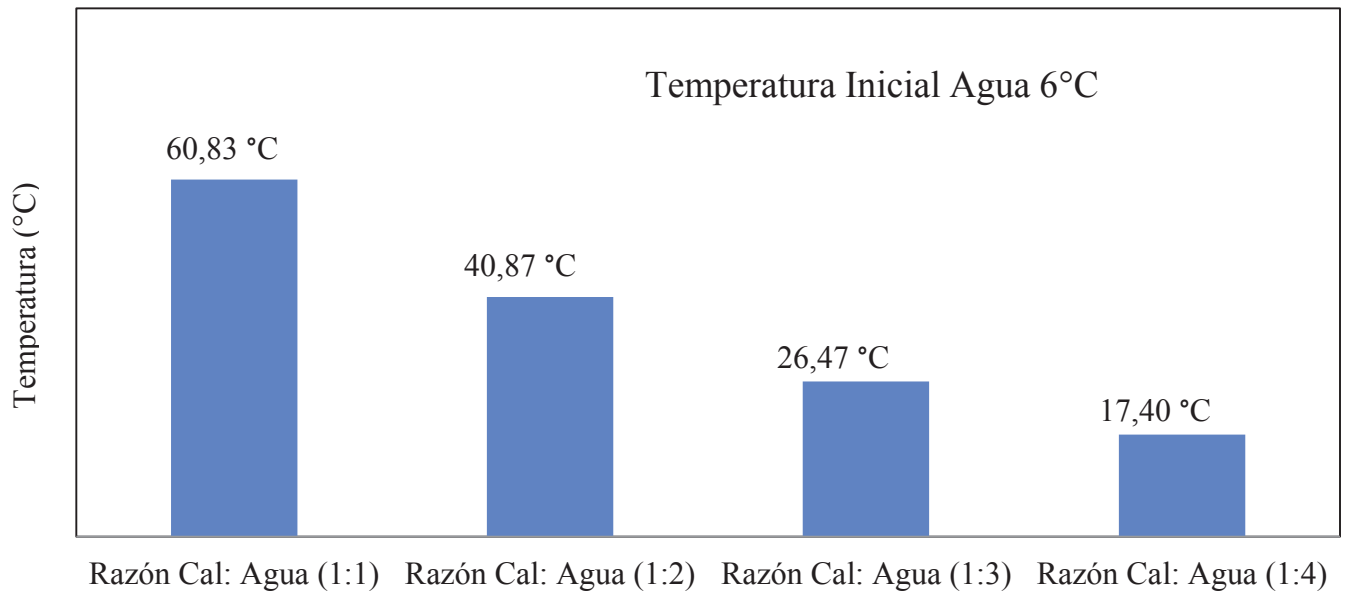


Figura 6.13: Diferencia de temperatura a los tres minutos con agua fría.

En la Fig. 6.13 se observa que las diferencias de temperatura disminuyen con respecto a los obtenidos precalentando el agua a 25°C pero no drásticamente como se pensaba, esto debido a la buena reactividad de la cal.

En la Fig. 6.14 se presenta la comparación de las diferencias de temperatura a los 3 minutos con agua precalentada (25°C) versus con agua fría (6°C).

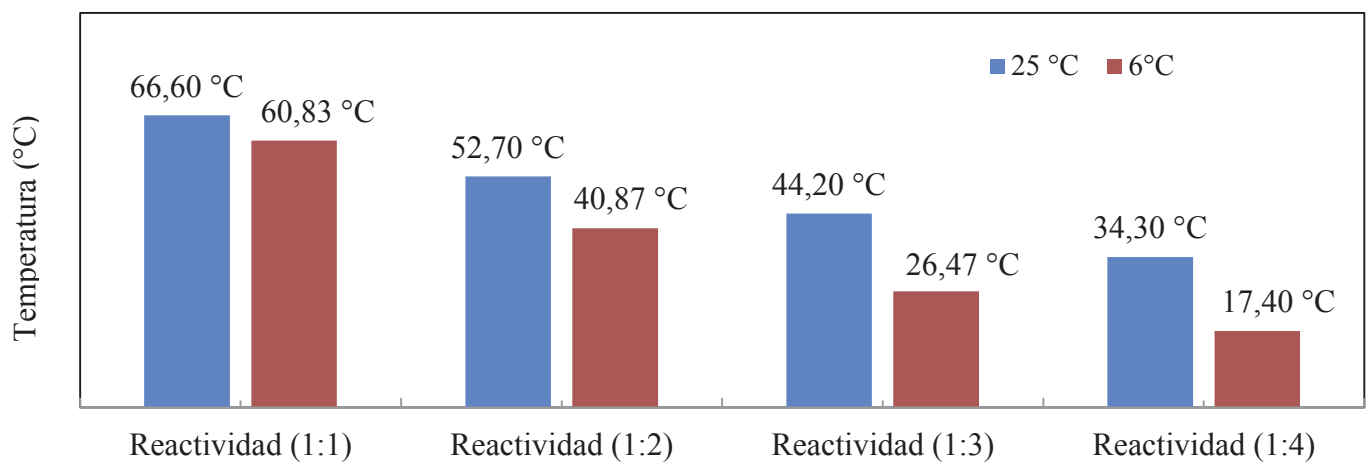


Figura 6.14: Comparación diferencias de temperaturas con agua precalentada v/s agua fría.

De la Fig. 6.14 se observa claramente la diferencia de temperaturas al utilizar agua precalentada versus agua fría, con agua precalentada a 25°C y al utilizar cualquier tipo de proporción agua: cal resultaría una buena lechada porque la temperatura son las esperadas, en cambio utilizando agua a 6° C las temperaturas están muy por debajo de las temperaturas de un buen apagado.

Esta condición (agua fría) no es muy favorable para el apagado de cal porque si el agua fría y la cal entran en contacto bruscamente, se produce la condición llamada “ahogamiento” no dejando que la cal se hidrate. Como resultado se forman partículas de hidrato de malas condiciones las que serán más gruesas y reaccionarán más tardía y lentamente con el agua. Sin embargo, en las plantas de lechada de cal, donde se requiere una suspensión de partículas hidratadas, dado el gran volumen de agua y los equipos de molienda utilizados, este fenómeno no ocurre, a causa del rompimiento mecánico de las partículas, que va exponiendo nuevas y más pequeñas partículas al agua, por lo que la reacción de hidratación va ocurriendo pero no en el apagador si no en el proceso donde es adicionada, provocando problema de alteración en los pH.

Pero si se quiere lograr una buena temperatura de apagado final independiente de la temperatura de reacción se podría incrementar la dosis de cal alimentada, asumiendo el riesgo que una mayor concentración de cal podría generar aglomeración de ésta.

6.2.2 Índice de Reactividad con diferentes leyes de cal

Otro factor importante de estudiar es la ley de cal, es por esto que se tomó una serie de muestras con distintas leyes para su análisis de reactividad, la proporción agua cal utilizada en estas pruebas es de 1:4 y la temperatura de agua es de 6°C, tratando de simular el proceso que ocurre en el apagador. En la Fig. 6.15 se observan las temperaturas resultantes para cada tipo de ley de cal. (Ver resultado en Anexo C10)

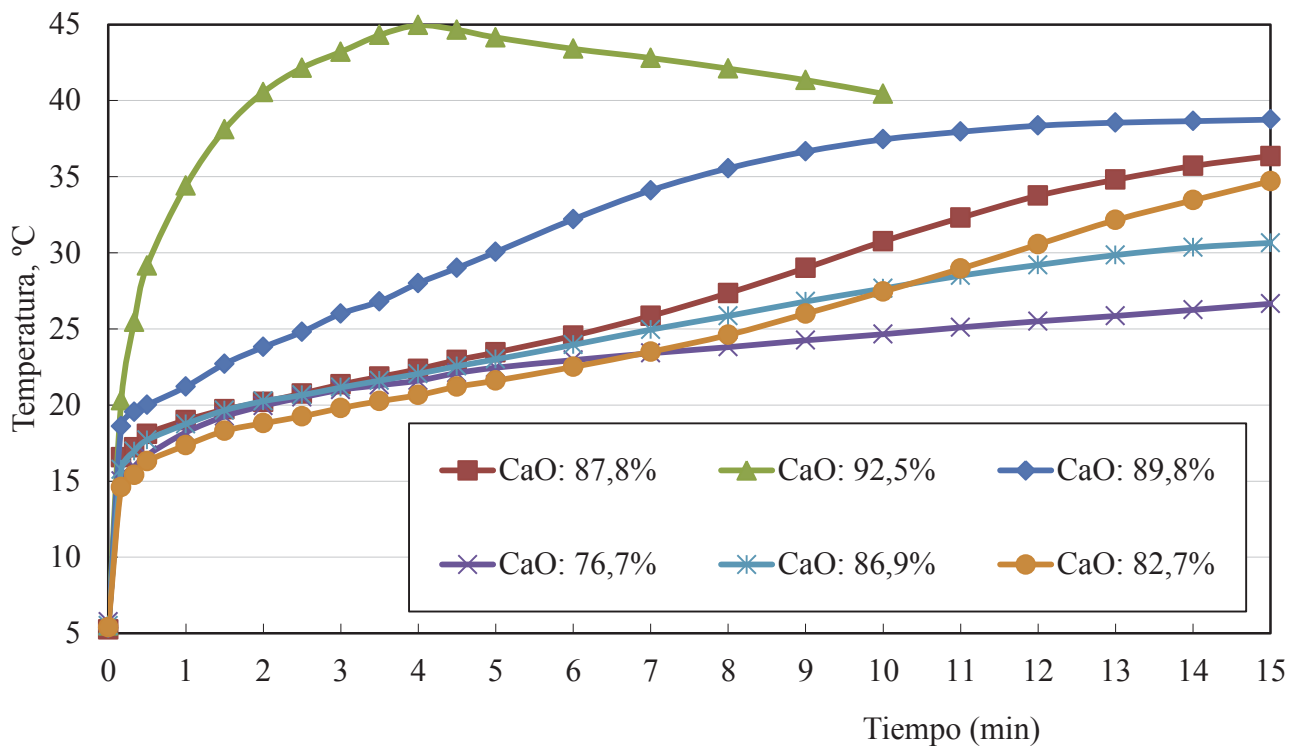


Figura 6.15: Temperatura generada por la reactividad de las distintas leyes de Cal

De la Fig.6.15 se observa la temperatura generada por la reactividad con respecto a la ley de cal, para la muestra con alta ley (92.5%) se ve que obtiene un máximo de 45 °C de temperatura, más alto que el resto y el tiempo completo de reacción es menor versus a la muestra con menor ley 76.7% que su temperatura máxima de reacción llego sólo hasta los 28°C y la reacción se completó a los 20 minutos.

A continuación la Fig. 6.16 muestra las leyes finales de cal, es decir después del apagado comparado con las que tenía cada muestra al inicio.

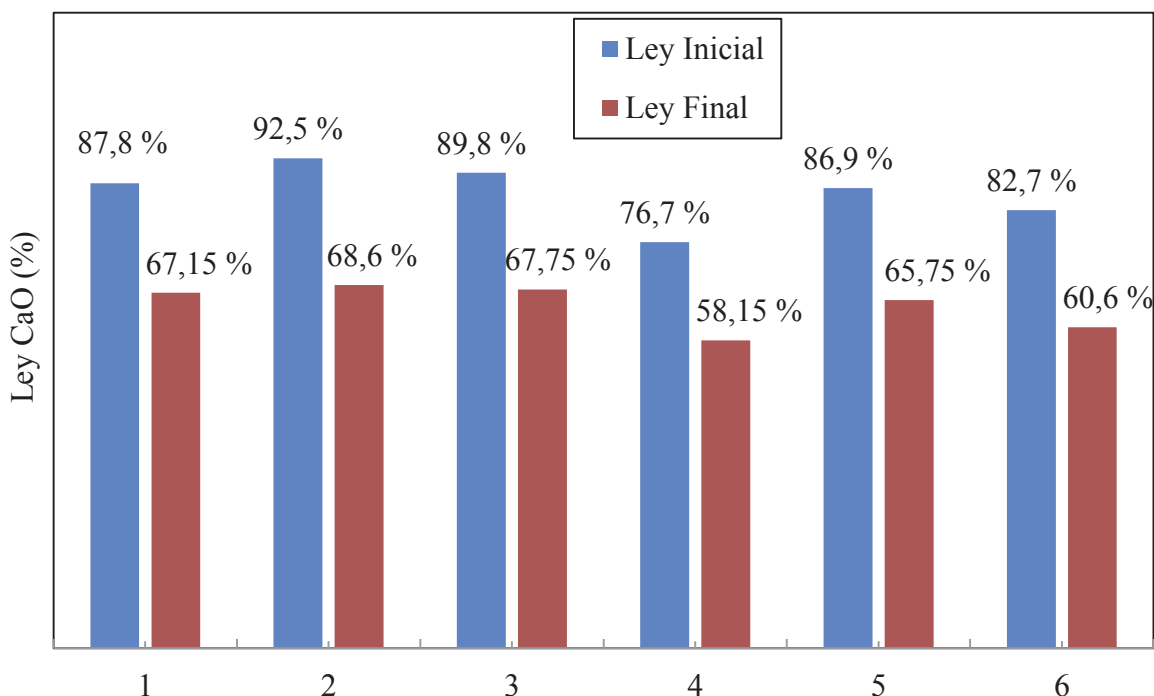


Figura 6.16: Leyes de lechada de cal con diferentes leyes iniciales.

Se observa en la Fig .6.16, las leyes de la lechada de cal producidas por cada muestra, se puede concluir que independiente de la ley de cal que contenga, la pérdida de ésta durante el proceso de pagado es la misma, este tipo de muestras tienen una pérdida aproximadamente de un 25%. Por lo tanto, se puede concluir que la ley de cal afecta en el tiempo de reacción, es decir, mientras menor la ley de cal más tiempo se demora en reaccionar completamente toda la muestra.

6.2.3 Índice de Reactividad con diferentes temperaturas de agua.

Para finalizar con las pruebas de reactividad, se tomó una nueva muestra de cal con ella se realizó pruebas de reactividad una con agua precalentada y otra con agua a temperatura fría variando el volumen de agua, y además de compararlas ver el efecto en la ley final de cal. A continuación se muestran los resultados.

En la Fig. 6.17 se observa el perfil granulométrico de la muestra de cal analizada indicando además la ley de cal que esta contiene.

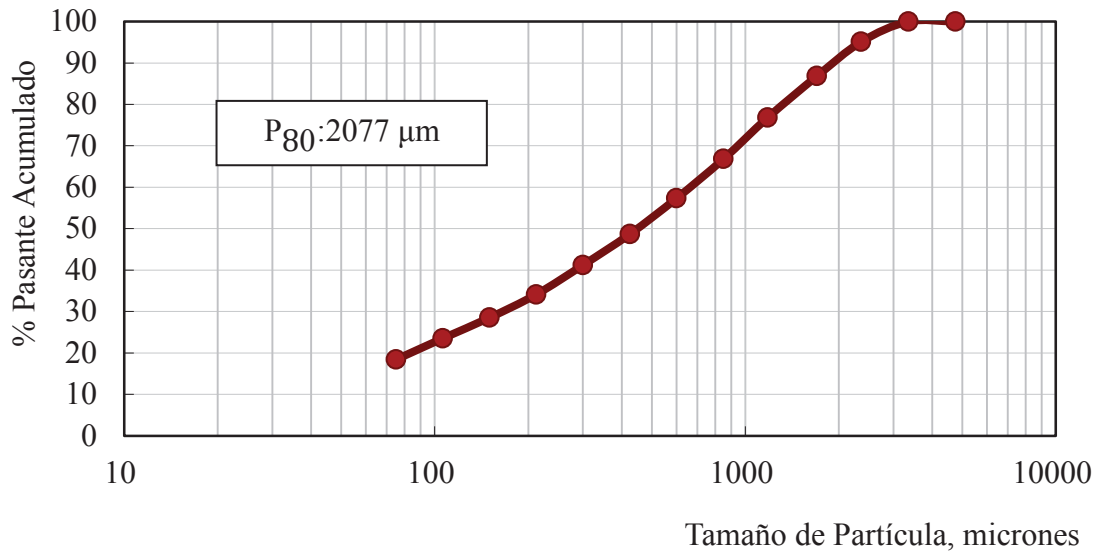


Figura 6.17: Perfil Granulométrico nueva muestra de cal

En la Fig. 6.17 se observa el perfil granulométrico de la muestra de cal seleccionada para las pruebas finales, mediante una interpolación se pudo determinar que el P₈₀ de la muestra este es de 2077 μm, con una ley CaO: 82.4%. (Ver resultados en Anexo C11)

A continuación la Fig. 6.18 muestra el tiempo que demora en reaccionar completamente la muestra de cal tanto con agua precalentada como con agua fría y a diferentes razones cal: agua.

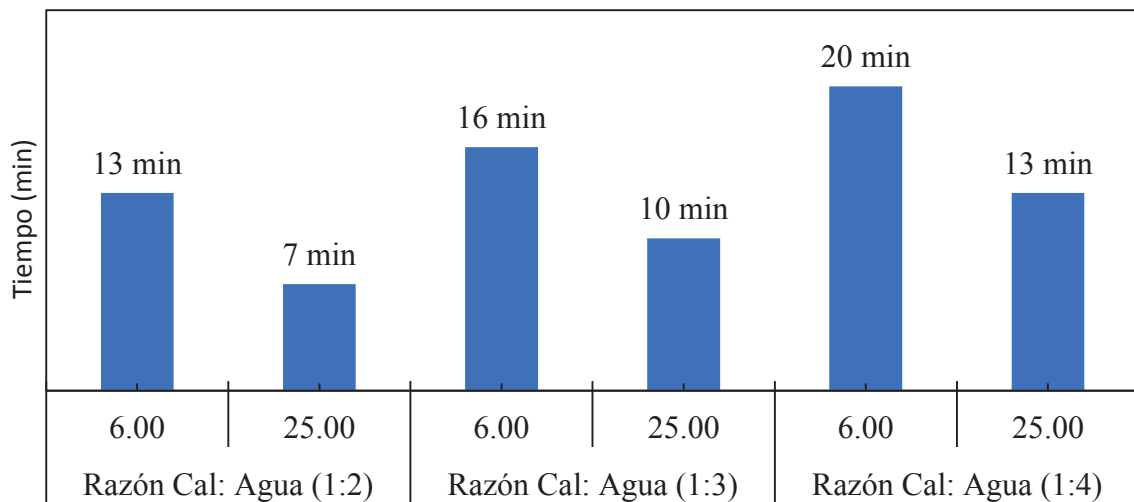


Figura 6.18: Tiempo de reacción total para distintas razones y distintas temperaturas de agua

En la Fig.6.18 se observa el tiempo de reacción total o de hidratación, tiempo requerido para completar el apagado el cual varía según el tipo cal, se observa claramente que al precalentar el agua el tiempo de hidratación es menor comparada con las pruebas con agua a temperatura fría, este efecto sería de gran interés ya que al tener una reacción completa en menos tiempo se podría preparar más lechada en la misma cantidad de tiempo. (Ver resultados en Anexo C12).

Pero no sólo es necesario disminuir el tiempo de reacción, porque no se obtiene nada preparando mucho volumen de lechada si es que ésta no es de buena calidad, en la Fig.6.19 se puede ver la ley de cal de cada muestra de lechada dependiendo de la razón agua: cal y de la temperatura inicial del agua.

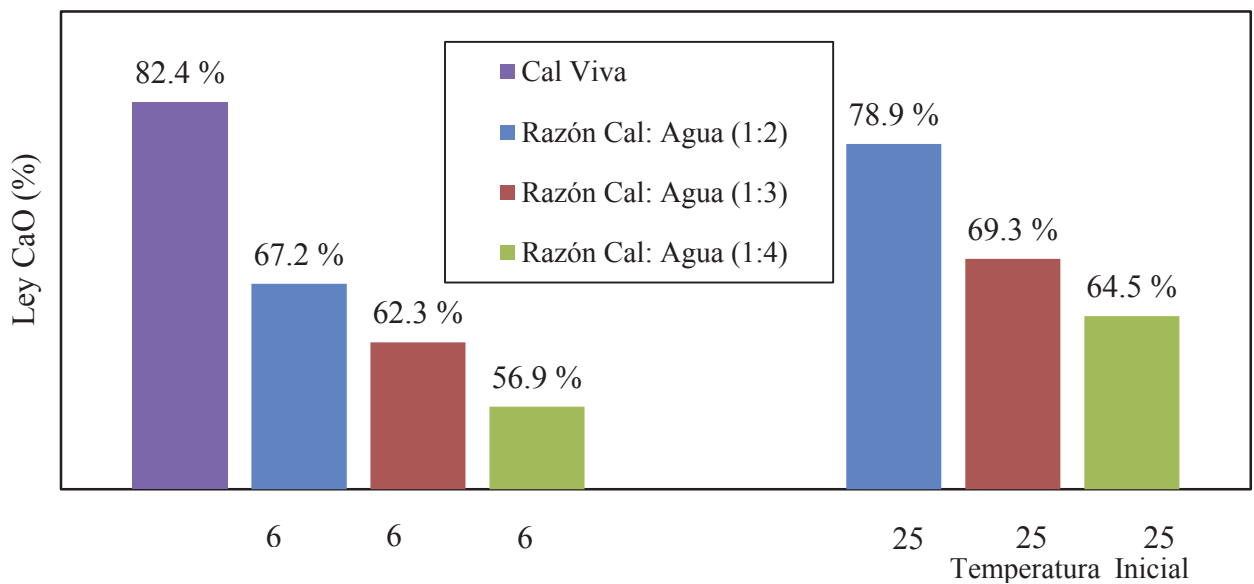


Figura 6.19: Leyes de lechada de cal a diferentes temperaturas

En la Fig.6.19 se observa el efecto que produce en la calidad de lechada la temperatura inicial de agua, si comparamos la reactividad de las razones 1:3 con temperatura normal de agua la ley final de la lechada es de 62.3% versus un 69.3% que da como resultado la prueba realizada con agua precalentada.

Las pruebas muestran que al agregar cal viva al agua caliente, comparado con el agua fría, se acelerará el apagado y se reducirá el tamaño de las partículas de cal hidratadas.

Se debe evitar que el agua fría y la cal se pongan en contacto porque se formarán bajo la condición de ahogamiento donde las partículas son más gruesas y menos reactivas.

De todas las pruebas anteriormente mencionadas se puede destacar que la granulometría de la cal es 100% -3 mm y su ley de cal en promedio es de 85%, parámetros que están dentro de los contratados por la empresa. Este estudio también dejó ver el escaso seguimiento en la calidad de cal que llega a la división, si bien las muestras tomadas para los análisis cumplen con los requisitos mínimos, esta no demuestra a la totalidad de las muestras, se debe ser más riguroso en la inspección de las muestras y muestrear cada camión que ingresa a la división.

Finalmente se puede concluir que precalentando el agua antes que ingrese al apagador, obtendremos una lechada de mejor calidad y la reacción se producirá en menor tiempo, por lo tanto se podrá preparar más volumen.

Para comenzar el proceso de apagado es necesario tener agua calentada, para llegar a la temperatura deseada, luego el control de temperatura se puede hacer con agua fría, ya que al momento de mezclarse con la lechada caliente se tiene como resultado una temperatura uniforme de lechada. Para lograr esto es necesario una agitación vigorosa en la cámara de apagado para alcanzar una mezcla homogénea y tibia donde la cal seca es añadida a la lechada. La cal apagada con una temperatura alta produce partículas del hidrato más pequeña y para evitar aglomeraciones la lechada debe ser enfriada al salir del apagador.

Finalmente, el factor más importante para reducir el consumo de cal, es el área superficial específica de las partículas de hidróxido de calcio, mientras menor es el tamaño de partícula, es decir, mayor el tamaño del área superficial específica de hidratación, una mayor superficie estará disponible para la reacción, por lo tanto una mayor eficiencia de reacción y menor consumo de Cal.

6.2 PUESTA EN MARCHA DE FORMA AUTOMATICA LA PLANTA DE CAL

Como un punto extra de este estudio, se realizó un diagnóstico y puesta en marcha del sistema de preparación en forma automática de lechada de cal en la planta de cal número 2. El diagnóstico se realizó a las etapas del proceso de producción, así como también de los equipos utilizados para el control y la medición del pH, con el fin de proponer mejoras operacionales en las etapas diagnosticadas

6.3.1 Funcionamiento Planta de Cal n°2

La planta de cal n°2 cuenta con dos apagadores^[11] tipo Slaker. El apagador tipo Slaker está compuesto por un estanque con un agitador para mezclar agua y cal y producir lechada, la agitación es vigorosa para evitar cualquier zona muerta dentro de la cámara de mezclado.

Para la operación de hidratación de la cal viva, la Planta de Cal N°2 cuenta por diseño con un lazo de control para el manejo de la temperatura de la lechada. El controlador ejecuta las siguientes acciones: Cuando se pone en funcionamiento el Slaker se conectan los calefactores para hacer un precalentamiento de la cámara hasta alcanzar los 20 °C. Luego temperatura comienza la adición de cal viva al apagador. La adición de agua a la cal viva es dada por el sistema de relación Agua: Cal, de tres partes de agua por una de cal viva en peso (1:3) hasta los 65°C, cuando se sobrepasa esa temperatura el control comienza a ser por temperatura, donde se agrega agua a la cal basado en la temperatura dentro del apagador, el controlador maneja la abertura de la válvula de agua a objeto de mantener un set point dentro del rango establecido (65 -80 °C) la cal es alimentada en una relación constante (asignada por el operador) y el agua es agregada en la cantidad necesaria para mantener la temperatura constante. Cuando el sistema alcance los 80°C, un controlador dará la orden para que se abra la válvula de la línea de adición de agua de emergencia con el objeto de bajar rápidamente la temperatura.

Cuando la temperatura alcance los 85°C, un controlador dará la orden para que se corte completamente la adición de la cal al hidratador, deteniendo completamente el motor del tornillo de alimentación de cal al sistema. La Tabla 6.5 muestra los parámetros de balance y diseño de la planta de cal 2 DAND.

Tabla 6.5: Parámetros de balance y diseño de la planta de cal 2 DAND

Cal	Unidad	Balance	Diseño
Preparación de lechada de cal			
Flujo	ton cal/h	2.7	3.1
Tipo Estanque	Estanque agitador		
Reactores (1 en op/1 std-by)	c/u		2
Concentración de sólidos en peso	%		25
Estanque de dilución			
Flujo	t cal/h	5.4	6.2
Tipo Estanque	Estanque agitador		
Estanques existentes	c/u		1
Concentración de sólidos en peso	%		14

6.3.2 Diagnostico Planta

Al realizar la primera inspección a la planta de cal número 2 se encontraron las siguientes dificultades operacionales:

- Planta con exceso de polvo en suspensión (Fig. 6.20). El operador requiere de uso de mascarilla de protección de rostro completo para trabajar en esta área de la planta, se recomienda mejorar el mantenimiento de los filtros de polvo.



Figura 6.20: Polvo en suspensión, planta de cal 2

- Ausencia de instrumentación de terreno, que permita visualizar las presiones en la línea de distribución de lechada de cal, además de sus flujos o consumos individuales.
- Planta con derrames específicos que faltan controlar y mitigar (Fig. 6.21), se recomienda sellar y mitigar todos y cada uno de ellos en planta.



Figura 6.21: Filtraciones específicas en la planta de cal N°2

- Por filosofía de operación, no puede funcionar el lazo de adición de cal hacia el estanque de alimentación del molino unitario 2, sin previo funcionamiento del lazo de control de la molienda SAG.
- Falta de cuantificación del flujo volumétrico y/o másico del rechazo o “gritt” que genera esta planta (Fig. 6.22), actualmente se hace mediante una bomba de impulsión hasta un cajón repulpeador que finalmente llega hasta el espesador de relave.



Figura 6.22: Acumulación de rechazo en la planta de cal N°2

6.3.3 Puesta en Marcha en forma automática Operación Slaker 4, planta de cal 2

Lunes 21 de octubre: Se realiza la primera prueba de operación en automático en el Slaker 4.

- Se encuentran fallas en la lógica de control, solucionadas en el momento.
- Se detecta falla en los selectores de válvulas de cuchillas.
- Se detecta falla en flujómetro de agua de dilución.
- Se detecta falla de sensor de nivel TK de Transferencia.
- Se realiza prueba de funcionamiento de válvulas: Se detiene la prueba por alto flujo de alimentación de agua ($30 \text{ m}^3/\text{h}$) producto de que válvula de emergencia se encuentra mala (razón detectada el martes).
- Se energizan los calefactores, quedando operativos.

- Existe un pasante de aprox. $2.5 \text{ m}^3/\text{h}$ de agua al Slaker (al estar todas las válvulas cerradas)

Martes 22 de octubre:

- Se realiza prueba de válvula automática ,resultados:
 - 0 % abertura $\rightarrow 0 \text{ m}^3/\text{h}$
 - 50 % abertura $\rightarrow 23 \text{ m}^3/\text{h}$
 - 75 % abertura $\rightarrow 26 \text{ m}^3/\text{h}$
 - 100% abertura $\rightarrow 27 \text{ m}^3/\text{h}$
- Se realiza prueba de funcionamiento en automático, según la lógica de control.
- Nivel apróx. de rebose Slaker 4 y 5 82% (sobre ese nivel, probable embanque).
- Prueba se realiza sin problemas hasta llegar a 63.3°C en Slaker (3 ton/h de alimentación de cal).
- Al llegar a 63.3°C la temperatura del Slaker (en control proporcional ($2.5 \text{ m}^3/\text{h}$ de agua por 1ton/h de cal) y antes de pasar a control por temperatura) se detiene operación, producto de falla en sensor de nivel, que conlleva a una parada de emergencia.
- Durante parada de emergencia se detecta falla en lógica de control (no abre válvula automática a 100% y no se detuvo tornillo de cal (se repara en el mismo momento).

Miércoles 23 de octubre: Se alcanza operación en control automático (hasta detención por corte de energía eléctrica)

- Se inicia operación con control normal:
- Se abre válvula de alimentación general de agua al Slaker 4 (en terreno).
- Se da partir a la secuencia de operación (alimentación inicial de cal = 3 ton/h, T° inicial Slaker= 36°C).
- Opera de manera normal hasta alcanzar los 70°C :
- Control proporcional hasta 65°C .
- Control por temperatura sobre 65°C (SP = 70°C).
- Luego de 30 min se pasa de control proporcional a automático, en 10 min se alcanza temperatura de $70^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$.

- Se controla durante 1 hora y se decide aumentar tonelaje de alimentación de cal a 4 ton/h (rechazo baja, lechada de cal buena calidad)
- A las 12.28, por seguridad, se decide detener prueba por corte de energía eléctrica en planta concentradora (planta de cal 2 no se detiene al estar en otra red de suministro). Condiciones en corte: Flujo de agua 12,65 m³/h, T° 75.22 °C.
- Se da inicio a secuencia detener y se detecta que no ocurre hasta que los vibradores son detenidos de manera local.
- Una vez detenidos los vibradores, la planta realiza secuencia de detención y lavado posterior según lógica de control.

Jueves 24 de octubre: Se opera planta en automático

A continuación en la Fig. 6.23 se observa el funcionamiento en forma automática del Slaker 4 de la planta de Cal 2.

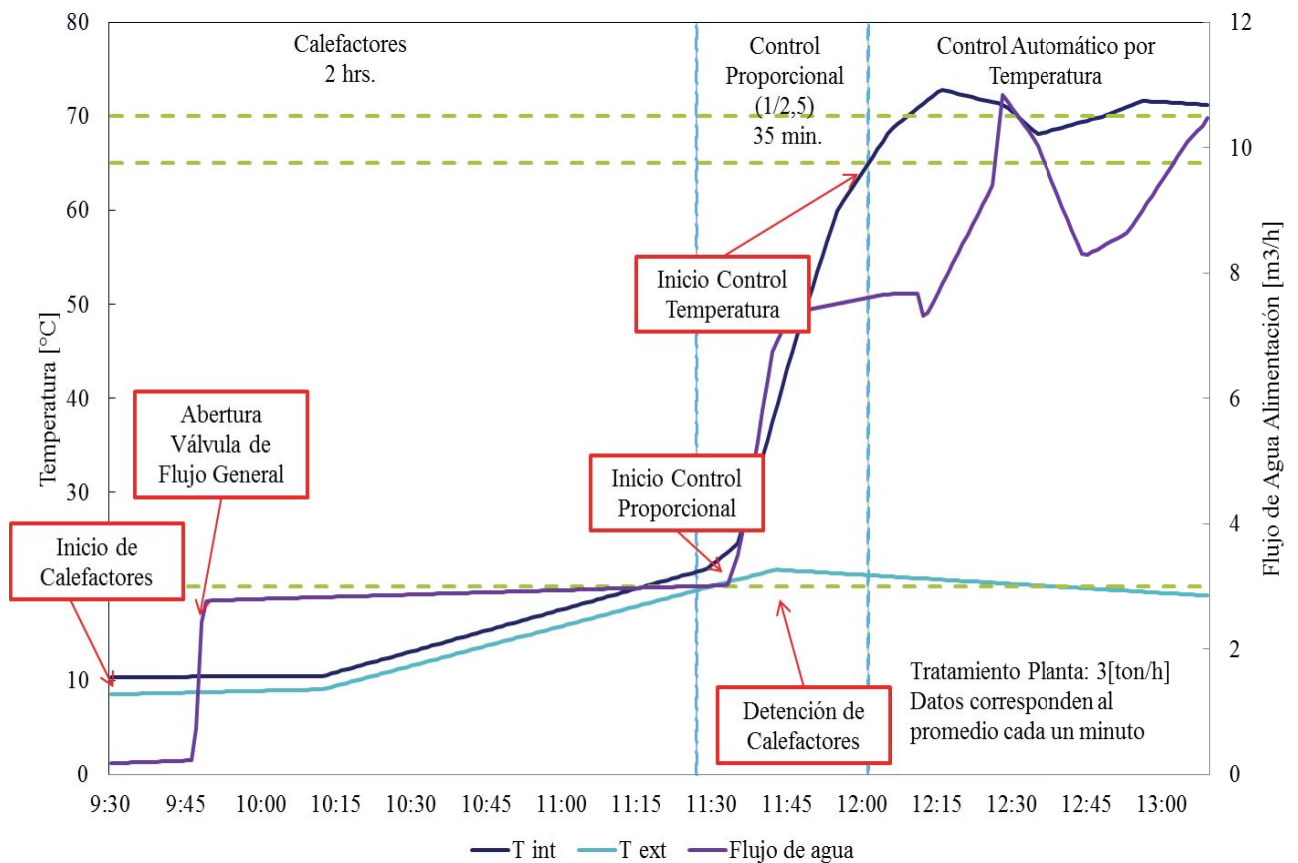


Figura 6.23: Operación en automática Slaker 4 planta de cal 2

En la Fig. 6.23 se puede ver que comienza la operación de la planta en forma automática donde la temperatura del agua de apagado (temperatura externa) es alrededor de los 8°C, se da partida al equipo y se encienden los calefactores, cuando la temperatura alcanza los 20 °C, se tardó 2 horas en alcanzar esa temperatura, luego comienza la alimentación de cal y con ello el control proporcional cal: agua (1:2.5), es decir, si la alimentación de cal es de 3 ton/hr la de agua es de 7.5 m³/hr, se observa también que comienza a aumentar el flujo de agua hasta llegar a los 65°C, el control por temperatura tarda 35 minutos, luego comienza el control por temperatura donde se agrega más agua para bajar y controlar la temperatura de la reacción que aumenta muy rápidamente con la alimentación de cal, hasta llegar a la temperatura deseada de 70°C la que se mantiene constante controlándola con agua.

6.3.4 Oportunidades de Mejoras Operacionales; Diseño e Ingeniería.

Una mejora que debe ser analizada es implementar la utilización de los rechazos para alcalinizar la remolienda de concentrados, en vez de servir de ayuda a la floculación o clarificación de los relaves. En el caso que no sea posible agregarla a la remolienda, puede ser derivada a cualquier punto del proceso donde exista una operación de molienda inmediatamente posterior.

Desde el punto de vista del proceso y como parte del mejoramiento continuo, es necesario optimizar el sistema de vaciado, almacenamiento y manejo de la cal viva, tendiendo a evitar la polución y derrames, por razones ambientales y de seguridad.

Dado que, el problema más importante en la distribución de la cal es la obstrucción de las cañerías, por depósito de cal o incrustaciones, lo recomendado es preparar la lechada a un porcentaje de sólidos entre 18% y 22 %. Lechadas más diluidas tienden a aumentar la velocidad de sedimentación causando embanque. Operar con sólidos cercanos o inferiores a 15% incrementa la posibilidad de causar obstrucciones.

Es necesario limpiar rutinariamente los depósitos de cal generados sobre el nivel de la lechada porque estos pueden formar puentes sólidos sobre la lechada y si estos se llagan a romper una cantidad de cal seca caerá sobre la lechada pudiendo causar una explosión, pudiendo ocasionar graves accidentes.

En el control de pH en el Circuito de Flotación Colectiva - Molienda SAG y molino unitario 2 se recomienda independizar los lazos de control de pH de ambas plantas y medirlo en los

overflow de las baterías, formando dos lazos separados de control, manteniendo la medición del pH en el cajón centralizado, sólo de modo referencial no para control y que el nuevo sistema de adición de lechada de cal al molino unitario 2 se base en el flujo de mineral alimentado. De esta manera se puede generar un mejor control y una mayor estabilidad de la variable de proceso.

La gran cantidad de material inerte (Grit), principalmente constituido por sílice o carbonato de calcio no calcinado, presentes en la cal viva es la que provoca innumerables problemas de atascamiento de tornillos alimentadores y embancamientos del cajón repulpeador de alimentación a las bombas de eliminación de grit.

Se recomienda además la instalación de flujómetros en cada arranque de lechada de cal, así será posible visualizar los consumos y gastos totales independientes de cada planta, para mejorar las estadísticas de los insumos para cada proceso, esto se recomienda porque el porcentaje de sólidos variará tanto como cambie la reactividad de la cal viva o la temperatura del agua.

Con la instrumentación propuesta, el jefe de turno o el operador de la planta, puede estimar y prever algún embanque que se pueda producir en la línea de lechada de cal que se encuentre en operación.

Con la calidad de la cal actualmente en uso, el proceso de pagado se realiza en alrededor 10 minutos o menos, sin embargo debiese analizarse la capacidad de los apagadores ante un eventual cambio en la calidad de la cal.

CAPÍTULO VIII: CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en las pruebas experimentales realizadas, arrojaron que el uso del reactivo quebracho en la etapa de flotación Rougher no genera cambios relevantes en las recuperaciones, la máxima recuperación que se obtuvo fue de 91.80% de Cu a pH: 9, 0.42 puntos porcentuales por sobre la estándar que resultó ser de 91.38% a pH: 10, utilizando quebracho tipo M3, si bien se disminuye el rango de pH de 10 a 9, que es el objetivo principal de este reactivo, este no es significativo, porque solo disminuye en 0.01 kg por tonelada de mineral.

El estudio y la bibliografía han demostrado que no está claro el mecanismo por el que los extractos de quebracho se adsorben sobre la superficie de los sulfuros, y como las pruebas no entregan cambios significativos en recuperación y disminución de consumo de cal se descarta su posible uso en la etapa de flotación Rougher como un depresor de pirita.

Con respecto a la cal se ha demostrado que al realizar el apagado con agua precalentada aumenta más rápidamente la temperatura, con agua precalentada (25°C) se obtiene una diferencia de temperatura a los tres minutos de 44.20°C a diferencia de los 26.47°C que se obtiene con agua fría (6°C), a una razón cal: agua 1:3, con respecto al tiempo de reacción total también se nota una mejora al utilizar agua precalentada, es decir con agua a 25°C la reacción total de apagado es de 10 minutos a diferencia de los 16 minutos que tarda en reaccionar completamente la cal cuando esta se realiza con agua fría a 6°C.

Si bien se obtuvo en las pruebas de reactividad que la cal utilizada es de buena calidad, esta debe ser preparada en las condiciones correctas para evitar un consumo excesivo para esto es necesario utilizar la proporción cal: agua 1:3 y así evitar embanques en las líneas de transporte, además de llegar a la temperatura óptima porque esta afecta directamente la calidad del hidróxido de sodio producido generando partículas de tamaño muy fino con una gran área superficial que conlleva a una disminución del consumo de cal, es necesario mantener controlado este factor que es afectada por la reactividad de la cal viva y también la temperatura del agua de apagado

RECOMENDACIONES

Es recomendable seguir estudiando el silicato de sodio como reactivo de flotación, ya que este entregó resultados favorables en la flotación de Cu, incluso mejores que las con quebracho, con silicato de sodio se alcanzó una recuperación de Cu de 92.28% a pH: 10 a diferencia de 91.80% con quebracho.

Como recomendación se puede decir que el proceso de apagado de cal viva es un proceso crítico, el cual generalmente no es lo suficientemente conocido por la gente que opera los equipos, el método y tipo de control usado para el apagado afecta grandemente la eficiencia del proceso. Además la calidad de la cal viva, la temperatura en que se realiza el apagado afecta la calidad de la lechada de cal producida. Es esencial estudiar y conocer el tipo de equipo que se utilizara como preparador de lechada y tener la instrumentación apropiada para mantener una apropiada temperatura de apagado y la relación cal: agua en un rango cierto.

CAPÍTULO VII: BIBLIOGRAFIA

1. Victor Ciribeni, Pedro Sarquís y Mercedes Gonzales “Estudio del efecto depresor de reactivos orgánicos naturales en flotación de sulfuros”, 2002 Instituto de Investigaciones Mineras, Universidad Nacional de San Juan.
2. Pedro Sarquís, Vanesa Bazán, Juan Menéndez, Claudia Salem y Mercedes Gonzales “Recuperación de molibdenita de concentrados globales de Cu-Mo usando extracto de quebracho como depresor”, 2013 Instituto de Investigaciones Mineras, Universidad Nacional de San Juan.
3. “Apuntes del curso de Flotación”, 2010, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
4. Ficha de seguridad de productos químicos, Clariant y Austral Chemical
5. Pedro Sarquís, Victor Ciribeni y Mercedes Gonzales “Depresión selectiva de sulfuros usando extractos de quebracho”, 2007 Instituto de Investigaciones Mineras, Universidad Nacional de San Juan.
6. Ficha de seguridad tipos de quebracho, Unitan SAICA
7. Guillermo Coloma, “La Cal: Es un reactivo químico”, 2008, Chile, pág. 31-83; 171-189.
8. Mohamad Hassibi “Efecto de la temperatura del agua de apagado en la calidad de la lechada de Cal”, 2009 Chemco Systems L.P.
9. Mohamad Hassibi “Una perspectiva general del apagado de la Cal y los factores que afectan el proceso”, 2009 Chemco Systems L.P.
10. Mohamad Hassibi “Una revisión de los apagadores de Cal”, 2003 Chemco Systems L.P.
11. Manual de operación y puesta en marcha Planta de Cal n°2 de División Andina “Servicio de capacitación operacional” 2010
12. Instructivos de pruebas de laboratorio, Laboratorio Metalúrgico, Superintendencia de Ingeniería de procesos, Codelco Chile División Andina

CAPITULO VIII: ANEXOS

ANEXO A: MEMORIA DE CÁLCULO

ANEXO B: PROCEDIMIENTO DE LABORATORIO

ANEXO C: RESULTADOS TRABAJO EXPERIMENTAL

ANEXO A: MEMORIA DE CÁLCULO

A.1: Preparación dosis de quebracho

Para calcular la masa de quebracho necesaria para preparar 200 cm³ de solución, con una solución madre de 10 (g/ton), se hace de la siguiente manera:

$$\text{Masa Quebracho (g)} = \text{Solución madre} \left(\frac{\text{g}}{\text{lt}} \right) * \text{Volumen deseado Quebracho (ml)} * \left(\frac{1\text{lt}}{1000\text{cm}^3} \right)$$

$$\text{Masa Quebracho (g)} = 10 \left(\frac{\text{g}}{\text{lt}} \right) * 200(\text{cm}^3) * \left(\frac{1\text{lt}}{1000\text{cm}^3} \right) = 200 \text{ (g)}$$

Para obtener el volumen de quebracho a adicionar en cada prueba, se utiliza la siguiente ecuación:

$$\text{Volumen en ml} = \frac{\text{Mineral Seco(g)} * \text{Dosis Quebracho} \left(\frac{\text{g}}{\text{ton}} \right) * \left(\frac{1 \text{ ton}}{10^6 \text{g}} \right)}{\text{Concentración solución madre Quebracho} \left(\frac{\text{g}}{\text{lt}} \right) * \left(\frac{1\text{L}}{1000\text{cm}^3} \right)}$$

- Para una dosis de 30 (g/ton)

$$\text{Volumen en ml: } \frac{1180(\text{g}) * 30 \left(\frac{\text{g}}{\text{ton}} \right) * \left(\frac{1 \text{ ton}}{10^6 \text{g}} \right)}{10 \left(\frac{\text{g}}{\text{lt}} \right) * \left(\frac{1\text{L}}{1000\text{cm}^3} \right)} = 3.54 \text{ cm}^3$$

- Para una dosis de 60 (g/ton)

$$\text{Volumen en ml: } \frac{1180(\text{g}) * 60 \left(\frac{\text{g}}{\text{ton}} \right) * \left(\frac{1 \text{ ton}}{10^6 \text{g}} \right)}{10 \left(\frac{\text{g}}{\text{lt}} \right) * \left(\frac{1\text{L}}{1000\text{cm}^3} \right)} = 7.08 \text{ cm}^3$$

A.2: Dosis de reactivos en laboratorio

Utilizando las dosis de planta de cada reactivo es posible calcular la dosis para las pruebas de laboratorio con la siguiente ecuación:

$$\text{Volumen en } \mu\text{lt} = \frac{\text{Mineral Seco(g)} * \text{Dosis Reactivo} \left(\frac{\text{g}}{\text{ton}} \right) * \left(\frac{1 \text{ ton}}{10^6 \text{g}} \right)}{\text{Densidad de Reactivo} \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) * \left(\frac{1\text{cm}^3}{10^3 \mu\text{lt}} \right)}$$

- Dosis X-23

$$\text{Volumen en } \mu\text{lt} = \frac{1180(\text{g}) * 19 \left(\frac{\text{g}}{\text{ton}} \right) * \left(\frac{1 \text{ ton}}{10^6 \text{g}} \right)}{0.98 \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) * \left(\frac{1 \text{ cm}^3}{10^3 \mu\text{lt}} \right)} = 23 \mu\text{lt}$$

- Dosis Diesel

$$\text{Volumen en } \mu\text{lt} = \frac{1180(\text{g}) * 8 \left(\frac{\text{g}}{\text{ton}} \right) * \left(\frac{1 \text{ ton}}{10^6 \text{g}} \right)}{0.85 \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) * \left(\frac{1 \text{ cm}^3}{10^3 \mu\text{lt}} \right)} = 11 \mu\text{lt}$$

- Dosis MIBC

$$\text{Volumen en } \mu\text{lt} = \frac{1180(\text{g}) * 12 \left(\frac{\text{g}}{\text{ton}} \right) * \left(\frac{1 \text{ ton}}{10^6 \text{g}} \right)}{0.807 \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) * \left(\frac{1 \text{ cm}^3}{10^3 \mu\text{lt}} \right)} = 18 \mu\text{lt}$$

- Dosis Silicato de Sodio

$$\text{Volumen en } \mu\text{lt} = \frac{1180(\text{g}) * 30 \left(\frac{\text{g}}{\text{ton}} \right) * \left(\frac{1 \text{ ton}}{10^6 \text{g}} \right)}{1.36 \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) * \left(\frac{1 \text{ cm}^3}{10^3 \mu\text{lt}} \right)} = 26 \mu\text{lt}$$

ANEXO B: PROCEDIMIENTOS DE LABORATORIO

Anexo B.1^[12]: Índice de Reactividad o Apagado de Cal

Equipo de protección personal requerido	Materiales y equipos requeridos
<ul style="list-style-type: none">• Calzado de seguridad.• Guantes de trabajo (quirúrgicos).• Buzo piloto.• Respirador facial rostro completo (full face).• Gafas de seguridad.	<ul style="list-style-type: none">• Muestra de cal previamente homogeneizada.• Matraz Dewar• Termómetro digital o del tipo dial.• Cronómetro.• Agitador mecánico• Balanza digital.• Agua destilada• Juego tamices #4 hasta #200 y Rotap

Procedimiento:

- Usar el equipo de protección personal.
- Preparar la muestra de cal viva, esta debe estar bajo #6 (3.35 mm) luego almacenarla en bolsas de plástico y sellarla rápidamente para evitar su degradación.
- Medir el volumen de agua requerida, llevarla a 25°C agregarla al Matraz Dewar.
- Poner el agitador mecánico con 400 r.p.m. +50 r.p.m. y cubrir con tapa especial, para no perder temperatura durante la reacción.
- Agregar en forma rápida la Cal preparada y sin pérdida de tiempo, poner tapa y termómetro dentro del matraz y correr cronómetro para el control del tiempo.
- Registrar a los 30 segundos la temperatura obtenida y después anotar la variación cada 1 minuto hasta observar una variación de 0.5°C en tres valores consecutivos.
- El primer tiempo registrado de estos tres valores consecutivos, es el tiempo de apagado total de la muestra.
- Cuidadosamente sacar la muestra (Cal Apagada) del matraz y poner a secar, luego realizar análisis granulométrico a la muestra seca, desde malla #4 hasta #200.

Anexo B.2: Consumo de Cal

Equipo de protección personal requerido	Materiales y equipos requeridos
<ul style="list-style-type: none">• Calzado de seguridad.• Guantes de trabajo(quirúrgicos)• Buzo piloto.• Protector respiratorio con filtros para polvo.• Gafas de seguridad transparentes.	<ul style="list-style-type: none">• Muestra de mineral 100% -10#.• Molino Batch de Laboratorio.• Celda de flotación de 2,3 Lts.• pH Metro.• Balanza digital.• Vidrio reloj

Procedimiento:

- Usar el equipo de protección personal.
- Mediante muestreo se obtiene la muestra mineral, esta debe ser preparada 100% - 10#
- Realizar la cinética de Molienda para obtener el tiempo óptimo según el mineral a utilizar siguiendo el procedimiento adecuado (Anexo B.3).
- Con los resultados de la cinética de molienda moler el mineral adicionando 19 (g/ton) de colector X-23 más 8(g/ton) de Diesel al molino.
- Depositar la pulpa producto de la molienda en la celda de flotación de 2.3 lts, y mantener agitada a una velocidad de 1400 RPM.
- Medir el pH de la pulpa, luego acondicionar durante un minuto y adicionar 0.2 g de Cal apagada (Ver Anexo B.1), medir nuevamente el pH y repetir esto hasta un consumo de 3 g de Cal.

Anexo B.3: Cinética de Molienda

Equipo de protección personal requerido	Materiales y equipos requeridos
<ul style="list-style-type: none">• Calzado de seguridad.• Guantes de goma• Buzo piloto.• Protector respiratorio con filtros para polvo.• Lentes de seguridad transparentes.• Protector auditivo.	<ul style="list-style-type: none">• Muestra de mineral 100% -10 #• Balde con parrilla de lavado.• Molino Batch de laboratorio• Tornamesa de molienda, tipo rodillo.• Collar de bolas completo.• Balanza.• Timer eléctrico.

Procedimiento:

- Usar el equipo de protección personal.
- Disponer de una cantidad de muestras que permita realizar a lo menos 4 moliendas de 1180 g.
- Lavar el molino con el collar de bolas, asegurándose que no queden residuos de moliendas anteriores
- Tomar una muestra mineral al azar y deslamar en balde con malla #325 tyler.
- La muestra deslamada ponerla a secar y luego realizar análisis granulométrico desde la malla 10 hasta la 325 en rotap durante 15 minutos para obtener la granulometría en tiempo de molienda cero
- Utilizar una segunda muestra de mineral, agregar 590 cm³ de agua al molino y vaciar la muestra al molino. Al cumplirse el tiempo requerido sonará el timer y la tornamesa de molienda se detendrá automáticamente.
- Destapar el molino y vaciar su carga sobre la parrilla de lavado también lavar las bolas, el interior del molino y todo lo que esté en contacto con la pulpa evitando perder muestra.
- Deslamar el producto de la molienda en malla 325# Tyler y secarlo a 100°C luego realizar análisis granulométrico desde malla 10 hasta la 325 en rotap durante 15 minutos.
- Con datos obtenidos calcular el % retenido en cada fracción y el acumulado en 65#. El resultado de éste cálculo corresponde a un tiempo de molienda.
- Repetir los pasos anteriores para tiempos que pueden ser mayores o menores dependiendo de las condiciones operacionales.
- Finalmente Calculados los porcentajes de +65#, graficar %+65# v/s tiempo de molienda. De este gráfico, realizar una interpolación para obtener el tiempo óptimo de molienda primaria. El estándar para Andina es de 20% +65 #.

Anexo B.4: Flotación Rougher

Equipo de protección personal requerido	Materiales y equipos requeridos
<ul style="list-style-type: none">• Calzado de seguridad.• Guantes de latex.• Buzo piloto.• Protector respiratorio con filtros para polvo.• Gafas de seguridad transparentes.• Protector auditivo.	<ul style="list-style-type: none">• Reactivos de flotación, Cal• Hds de reactivo a utilizar• Micro pipeta.• Bandeja para almacenar muestra.• Timer eléctrico.• Celda de flotación.• pH-metro.• Horno de Secado

Procedimiento:

- Verificar que los reactivos e insumos a utilizar no estén contaminados, en caso contrario prepararlos nuevamente.
- Preparar materiales y equipos a utilizar. Lavar la celda de flotación, asegurándose que no queden residuos de flotaciones anteriores, lavar el molino con su collar de bolas correspondiente, paletas, bandeja de acero inoxidable, rotor de la máquina de flotación hasta eliminar productos anteriores, si los hubiere. Asegurarse que el pH-metro haya sido correctamente calibrado.
- Realizar molienda controlada con el tiempo optimo obtenido de la cinética de molienda (ver Anexo B.2). Adicionar los reactivos estándares de flotación al molino utilizando pipetas de autograduación (micro pipetas).
- Depositar el producto de la molienda controlada en un balde, utilizar la cantidad de agua justa para lavar las bolas y el interior del molino, un exceso puede pasar al nivel de la celda.
- Vaciar el contenido del balde a la celda de flotación. Completar el volumen de la celda de flotación de 2.3 lt con agua. Estando la celda bajo la máquina de flotación, instalar el rotor y ajustar la velocidad de operación a 1500 RPM.
- Poner en operación la máquina de flotación. Acondicionar la pulpa a pH 10 utilizando cal viva y midiendo con el pH-meter previamente calibrado. Adicionar espumante a la celda utilizando micropipeta. Acondicionar la pulpa por tres (3) minuto antes de flotar.

Utilizar el timer para controlar los tiempos. Instalar la bandeja de acero inoxidable bajo el labio de la celda.

- Flotar durante 7 minutos. Adicionar aire a la pulpa mediante el accionamiento de la válvula de control abriéndola a 3/4 de la abertura total. Una vez que se produce el rebalse de espuma sobre el labio de la celda, comenzar a paletear a una frecuencia de 10 segundos, mantener la válvula de aire abierta a 3/4 de la abertura total durante 4 minutos, para los últimos 3 minutos de flotación abrir la válvula completamente, flotar por 7 minutos agregando agua para limpiar las paredes de la celda y mantener el nivel de la celda de flotación. Durante la duración de la prueba adicionar cal viva para mantener el pH en 10. Transcurrido los 7 minutos, cortar el suministro de aire y detener la máquina. De esta flotación se obtienen dos productos: Concentrado primario y cola primaria. Ambos se filtran y se ubican en el horno de secado a no más de 100°C.

Anexo B.5: Cinética de Flotación

Equipo de protección personal requerido	Materiales y equipos requeridos
<ul style="list-style-type: none"> • Calzado de seguridad. • Guantes de latex. • Buzo piloto. • Lentes de seguridad transparentes. • Protector auditivo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Muestra de pulpa • Reactivos. • Cal • Agua • Micropipeta. • Celda de flotación. • Bandejas Recolectoras

Procedimiento:

- Adicionar los reactivos estándares de flotación al molino, utilizando micropipeta, agregando la dosis de mezcla colectora deseada y realizar la molienda.
- Utilizar la cantidad de agua justa para lavar las bolas y el interior del molino, un exceso puede pasar al nivel máximo de la celda.
- Completar el volumen de la celda de flotación de 2300 cc con agua.
- Ubicar la celda bajo la máquina de flotación, instalar el rotor y ajustar la velocidad de operación a 1500 RPM.

- Poner en operación la máquina de flotación.
- Acondicionar pulpa a pH deseado, con pH metro previamente.
- Adicionar los reactivos estándares de flotación a la celda, utilizando micropipeta. Cuando se requiera realizar pruebas con reactivos adicionales o completamente diferente a los estándares se procede de manera similar a la presentada en este instructivo, agregando el reactivo en la etapa y dosis que se desee probar.
- Acondicionar la pulpa por un (3) minutos antes de flotar.
- Instalar la bandeja de acero inoxidable bajo el labio de la celda.
- Evitar el contacto directo con los reactivos de flotación, utilizar guantes de goma cuando se realice esta actividad.
- Registrar el tiempo en el cual se produce el rebase de espuma sobre el labio de la celda.
- Comenzar a paletear a una frecuencia cada 10 segundos.
- Mantener la válvula de aire abierta a $\frac{3}{4}$ de la abertura total durante 4 minutos, para los últimos 3 minutos de flotación abrir la válvula completamente.
- Flotar por 16 minutos agregando agua sólo para limpiar las paredes de la celda si fuese necesario.
- Comenzar paletando lentamente al interior de la celda con el cuidado de capturar la mayor cantidad de espuma desde la parte posterior de la celda como desde los costados.
- El concentrado se debe ir separando en distintas bandejas a medida que transcurre el tiempo de flotación, para ello se deberá ir cambiando las bandejas cuando se cumplan los siguientes tiempos: 1, 2, 3, 4, 7, 11 y 16 minutos.
- Transcurrido los 16 minutos, cortar el suministro de aire y detener la máquina.
- De esta flotación se obtiene el concentrado separado en 7 bandejas y la cola primaria. Los ocho productos se filtran y secan.
- Utilizar siempre los lentes de seguridad transparentes.

ANEXO C: RESULTADOS TRABAJO EXPERIMENTAL

C.1: Cinética de Molienda

- 0 minutos

Distribución					
Malla	Micrones	Peso (g)	Parcial (%)	Acumulada (%)	Pasante (%)
8	2360	5,00	0,42	0,42	99,58
12	1700	39,20	3,32	3,75	96,25
16	1180	155,78	13,20	16,95	83,05
20	850	168,50	14,28	31,23	68,77
30	600	149,70	12,69	43,91	56,09
40	425	116,50	9,87	53,79	46,21
50	300	89,50	7,58	61,37	38,63
70	212	75,70	6,42	67,79	32,21
100	150	57,60	4,88	72,67	27,33
140	106	43,80	3,71	76,38	23,62
200	75	37,10	3,14	79,52	20,48
-200	-75	241,62	20,48	100,00	0,00
	Total	1180,00	100,00		

- 15 minutos

Distribución					
Malla	Micrones	Peso (g)	Parcial (%)	Acumulada (%)	Pasante (%)
8	2360	0,00	0,00	0,00	100,00
12	1700	0,00	0,00	0,00	100,00
16	1180	0,40	0,03	0,03	99,97
20	850	0,70	0,06	0,09	99,91
30	600	2,20	0,19	0,28	99,72
40	425	4,50	0,38	0,66	99,34
50	300	27,20	2,31	2,97	97,03
70	212	112,50	9,53	12,50	87,50
100	150	199,50	16,91	29,41	70,59
140	106	160,00	13,56	42,97	57,03
200	75	104,20	8,83	51,80	48,20
-200	-75	568,80	48,20	100,00	0,00
	Total	1180,00	100,00		

- 16 minutos

Distribución					
Malla	Micrones	Peso (g)	Parcial (%)	Acumulada (%)	Pasante (%)
8	2360	0,00	0,00	0,00	100,00
12	1700	0,00	0,00	0,00	100,00
16	1180	0,20	0,02	0,02	99,98
20	850	0,40	0,03	0,05	99,95
30	600	0,70	0,06	0,11	99,89
40	425	2,40	0,20	0,31	99,69
50	300	15,60	1,32	1,64	98,36
70	212	102,10	8,65	10,29	89,71
100	150	191,50	16,23	26,52	73,48
140	106	156,40	13,25	39,77	60,23
200	75	122,30	10,36	50,14	49,86
-200	-75	588,40	49,86	100,00	0,00
	Total	1180,00	100,00		

- 12:40 minutos

Distribución					
Malla	Micrones	Peso (g)	Parcial (%)	Acumulada (%)	Pasante (%)
8	2360	0,00	0,00	0,00	100,00
12	1700	0,4	0,03	0,03	99,97
16	1180	1,30	0,11	0,14	99,86
20	850	2,20	0,19	0,33	99,67
30	600	5,20	0,44	0,77	99,23
40	425	14,10	1,19	1,97	98,03
50	300	61,80	5,24	7,20	92,80
70	212	151,90	12,87	20,08	79,92
100	150	181,30	15,36	35,44	64,56
140	106	125,60	10,64	46,08	53,92
200	75	100,40	8,51	54,59	45,41
-200	-75	535,80	45,41	100,00	0,00
	Total	1180,00	100,00		

C.2: Flotación Rougher

Identificación		Agua	Quebracho		Silicato (g/t)	Ph	Ley Concentrado (%)				Ley Cola (%)				Ley Alimentación Analizada (%)				Ley Cu Alimentación Recalculada (%)
Muestra	Test		Flotan	Dosis (g/t)			Cu	Mo	Fe	Ins	Cu	Mo	Ins	Fe	Cu	Mo	Fe	Ins	
Mixto	T-1	Fresca	-	-	-	9	3.5	0.086	10.9	55.0	0.075	0.005	84.7	2.7	0.740	0.022	4.50	75.50	0.715
Mixto	T-2	Fresca	-	-	-	10	3.7	0.093	11.0	53.0	0.078	0.006	80.5	2.7	0.740	0.022	4.50	75.50	0.739
Mixto	T-3	Fresca	-	-	30	9	3.7	0.093	10.8	52.3	0.072	0.006	81.2	2.8	0.740	0.022	4.50	75.50	0.745
Mixto	T-4	Fresca	-	-	30	10	3.8	0.093	11.3	52.4	0.071	0.006	80.4	3.0	0.740	0.022	4.50	75.50	0.752
Mixto	T-5	Fresca	T1	30	30	9	3.7	0.090	11.5	52.1	0.079	0.006	80.6	2.9	0.740	0.022	4.50	75.50	0.743
Mixto	T-6	Fresca	T1	60	30	9	3.7	0.095	11.2	52.9	0.080	0.007	81.6	2.9	0.740	0.022	4.50	75.50	0.740
Mixto	T-7	Fresca	T1	60	-	9	3.7	0.099	11.1	51.7	0.081	0.007	82.6	2.8	0.740	0.022	4.50	75.50	0.742
Mixto	T-8	Fresca	T5	30	30	9	3.8	0.091	10.8	51.1	0.076	0.006	78.5	2.9	0.740	0.022	4.50	75.50	0.752
Mixto	T-9	Fresca	T5	60	30	9	3.7	0.093	11.8	51.0	0.076	0.006	77.1	3.0	0.740	0.022	4.50	75.50	0.738
Mixto	T-10	Fresca	T5	60	-	9	3.7	0.094	11.3	52.6	0.078	0.006	80.7	2.9	0.740	0.022	4.50	75.50	0.740
Mixto	T-11	Fresca	M3	30	30	9	3.8	0.092	10.9	50.7	0.076	0.006	78.3	2.9	0.740	0.022	4.50	75.50	0.752
Mixto	T-12	Fresca	M3	60	30	9	3.8	0.092	11.1	52.0	0.077	0.006	83.1	3.0	0.740	0.022	4.50	75.50	0.757
Mixto	T-13	Fresca	M3	60	-	9	3.7	0.099	11.2	51.7	0.077	0.007	79.5	3.0	0.740	0.022	4.50	75.50	0.746

Razón Concentración Cu	Razón Enriquecimiento Cu	Pesos (gr)				Finos Cu T.			Finos Fe T.			Finos Mo T.			Finos Insoluble T.		
		Concentrado	Cola	Total	% Peso Conc.	Concentr.	Cola	Aliment.	Concentr.	Cola	Aliment.	Concentr.	Cola	Aliment.	Concentr.	Cola	Aliment.
5.351	4.730	220.2	958	1178.4	18.7	7.71	0.72	8.43	24.00	25.87	49.87	0.19	0.05	0.24	121.11	811.60	932.71
5.476	5.000	215.2	963	1178.5	18.3	7.96	0.75	8.71	23.67	26.01	49.68	0.20	0.06	0.26	114.06	775.46	889.51
5.390	5.000	218.8	961	1179.4	18.6	8.10	0.69	8.79	23.63	26.90	50.53	0.20	0.06	0.26	114.43	780.01	894.44
5.475	5.135	215.4	964	1179.3	18.3	8.19	0.68	8.87	24.34	28.92	53.26	0.20	0.06	0.26	112.87	774.98	887.85
5.450	5.000	216.4	963	1179.4	18.3	8.01	0.76	8.77	24.89	27.93	52.81	0.19	0.06	0.25	112.74	776.18	888.92
5.483	5.000	214.9	964	1178.4	18.2	7.95	0.77	8.72	24.07	27.94	52.01	0.20	0.07	0.27	113.68	786.22	899.90
5.471	5.000	215.5	964	1179.1	18.3	7.97	0.78	8.75	23.92	26.98	50.90	0.21	0.07	0.28	111.41	795.93	907.35
5.511	5.135	213.6	964	1177.2	18.1	8.12	0.73	8.85	23.07	27.94	51.01	0.19	0.06	0.25	109.15	756.43	865.58
5.472	5.000	215.5	964	1179.2	18.3	7.97	0.73	8.71	25.43	28.91	54.34	0.20	0.06	0.26	109.91	743.01	852.92
5.472	5.000	215.5	964	1179.2	18.3	7.97	0.75	8.73	24.35	27.95	52.30	0.20	0.06	0.26	113.35	777.71	891.06
5.513	5.135	213.7	964	1178.1	18.1	8.12	0.73	8.85	23.29	27.97	51.26	0.20	0.06	0.25	108.35	755.13	863.47
5.475	5.135	215.2	963	1178.3	18.3	8.18	0.74	8.92	23.89	28.89	52.78	0.20	0.06	0.26	111.90	800.34	912.24
5.417	5.000	217.7	962	1179.3	18.5	8.05	0.74	8.80	24.38	28.85	53.23	0.22	0.07	0.28	112.55	764.47	877.02

C.3: Consumo de Cal durante la flotación Rougher

STD			T1 silicato			T1			T5 silicato		
Mixto			Mixto			Mixto			Mixto		
Cal (grs)	Ph	grs/ton	Cal (grs)	Ph	grs/ton	Cal (grs)	Ph	grs/ton	Cal (grs)	Ph	grs/ton
0.0	7.61	0.0	0.0	7.54	0.0	0.0	7.36	0.0	0.0	7.4	0.0
0.2	9.95	169.5	0.2	9.84	169.5	0.2	9.79	169.5	0.2	9.89	169.5
0.4	10.98	339.0	0.4	10.81	339.0	0.4	10.69	339.0	0.4	10.93	339.0
0.6	11.4	508.5	0.6	11.28	508.5	0.6	11.11	508.5	0.6	11.23	508.5
0.8	11.61	678.0	0.8	11.65	678.0	0.8	11.53	678.0	0.8	11.53	678.0
1.0	11.78	847.5	1.0	11.83	847.5	1.0	11.7	847.5	1.0	11.73	847.5
1.2	11.9	1016.9	1.2	11.93	1016.9	1.2	11.82	1016.9	1.2	11.85	1016.9
1.4	11.95	1186.4	1.4	12.01	1186.4	1.4	11.94	1186.4	1.4	11.89	1186.4
1.6	12	1355.9	1.6	12.12	1355.9	1.6	12.01	1355.9	1.6	11.94	1355.9
1.8	12.05	1525.4	1.8	12.16	1525.4	1.8	12.08	1525.4	1.8	12	1525.4
2.0	12.13	1694.9	2.0	12.2	1694.9	2.0	12.13	1694.9	2.0	12.05	1694.9
2.2	12.15	1864.4	2.2	12.24	1864.4	2.2	12.19	1864.4	2.2	12.09	1864.4
2.4	12.18	2033.9	2.4	12.28	2033.9	2.4	12.23	2033.9	2.4	12.14	2033.9
2.6	12.19	2203.4	2.6	12.3	2203.4	2.6	12.26	2203.4	2.6	12.16	2203.4
2.8	12.23	2372.9	2.8	12.33	2372.9	2.8	12.29	2372.9	2.8	12.18	2372.9
3.0	12.26	2542.4	3.0	12.35	2542.4	3.0	12.31	2542.4	3.0	12.22	2542.4
3.2	12.3	2711.9	3.2	12.37	2711.9	3.2	12.32	2711.9	3.2	12.3	2711.9

T5			M3 silicato			M3		
Mixto			Mixto			Mixto		
Cal (grs)	Ph	grs/ton	Cal (grs)	Ph	grs/ton	Cal (grs)	Ph	grs/ton
0.0	7.53	0.0	0.0	7.58	0.0	0.0	7.56	0.0
0.2	9.9	169.5	0.2	9.9	169.5	0.2	10.03	169.5
0.4	10.86	339.0	0.4	10.93	339.0	0.4	11.03	339.0
0.6	11.25	508.5	0.6	11.32	508.5	0.6	11.37	508.5
0.8	11.48	678.0	0.8	11.59	678.0	0.8	11.59	678.0
1.0	11.67	847.5	1.0	11.78	847.5	1.0	11.78	847.5
1.2	11.8	1016.9	1.2	11.89	1016.9	1.2	11.91	1016.9
1.4	11.9	1186.4	1.4	11.96	1186.4	1.4	11.95	1186.4
1.6	11.99	1355.9	1.6	12.02	1355.9	1.6	12.03	1355.9
1.8	12.07	1525.4	1.8	12.06	1525.4	1.8	12.09	1525.4
2.0	12.13	1694.9	2.0	12.1	1694.9	2.0	12.12	1694.9
2.2	12.17	1864.4	2.2	12.12	1864.4	2.2	12.16	1864.4
2.4	12.2	2033.9	2.4	12.14	2033.9	2.4	12.2	2033.9
2.6	12.23	2203.4	2.6	12.17	2203.4	2.6	12.22	2203.4
2.8	12.27	2372.9	2.8	12.2	2372.9	2.8	12.25	2372.9
3.0	12.29	2542.4	3.0	12.24	2542.4	3.0	12.28	2542.4
3.2	12.32	2711.9	3.2	12.27	2711.9	3.2	12.31	2711.9

C.4: Cinética de Flotación

Condiciones: STD Ph: 10 Cal:0.3 g												% +65=22%					
Flujo			Peso (g)		Ley Cu (%)		Ley Mo (%)		Ley Fe (%)		Ley Ins (%)		Recuperación (%)				
			Parcial	Acum.	Parcial	Acum.	Parcial	Acum.	Parcial	Acum.	Parcial	Acum.	Peso	Cu	Mo	Fe	Ins
Alimentación			1178.1	1178.1	1.02	1.02	0.028	0.028	3.63	3.63	82.86	82.86	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Conc.	1	min	61.8	61.8	11.90	11.90	0.243	0.243	22.10	22.10	32.80	32.80	5.25	61.13	45.77	31.91	2.08
Conc.	2	min	35.9	97.7	5.80	9.66	0.147	0.208	12.40	18.54	55.00	40.96	8.29	78.43	61.86	42.31	4.10
Conc.	4	min	47.1	144.8	2.20	7.23	0.063	0.161	5.90	14.43	69.40	50.21	12.29	87.05	70.90	48.80	7.45
Conc.	7	min	50.1	194.9	0.75	5.57	0.028	0.127	3.50	11.62	74.40	56.43	16.54	90.17	75.18	52.90	11.27
Conc.	11	min	55.5	250.4	0.38	4.42	0.013	0.101	2.70	9.64	78.00	61.21	21.25	91.92	77.38	56.40	15.70
Conc.	16	min	55.0	305.4	0.18	3.65	0.008	0.085	2.20	8.30	80.80	64.74	25.92	92.75	78.72	59.22	20.25
Relave			872.7	872.7	0.100	0.100	0.008	0.008	2.000	2.00	89.200	89.20	74.08	7.25	21.28	40.78	79.75

Condiciones: Ph: 9 Cal: 0,2 g Silicato: 30 g/ton																	
Flujo			Peso (g)		Ley Cu (%)		Ley Mo (%)		Ley Fe (%)		Ley Ins (%)		Recuperación (%)				
			Parcial	Acum.	Parcial	Acum.	Parcial	Acum.	Parcial	Acum.	Parcial	Acum.	Peso	Cu	Mo	Fe	Ins
Alimentación			1178.6	1178.6	1.00	1.00	0.028	0.028	3.60	3.60	82.39	82.39	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Conc.	1	min	55.2	55.2	12.60	12.60	0.258	0.258	22.80	22.80	30.90	30.90	4.68	58.77	43.40	29.68	1.76
Conc.	2	min	35.8	91.0	6.10	10.04	0.150	0.216	13.10	18.98	52.90	39.55	7.72	77.22	59.77	40.74	3.71
Conc.	4	min	46.3	137.3	2.20	7.40	0.071	0.167	6.30	14.71	68.30	49.25	11.65	85.83	69.79	47.62	6.96
Conc.	7	min	53.7	191.0	0.83	5.55	0.030	0.128	3.50	11.56	75.70	56.69	16.21	89.59	74.70	52.05	11.15
Conc.	11	min	56.7	247.7	0.45	4.38	0.014	0.102	2.80	9.55	78.00	61.56	21.02	91.75	77.12	55.80	15.70
Conc.	16	min	61.90	309.6	0.23	3.55	0.009	0.084	2.20	8.08	81.40	65.53	26.27	92.95	78.81	59.01	20.89
Relave			869.000	869.0	0.096	0.096	0.008	0.008	2.000	2.00	88.400	88.40	73.73	7.05	21.19	40.99	79.11

Condiciones: Ph: 9 Cal:0,1 g Silicato: 30 g/ton T5:30 g/ton

Flujo			Peso (g)		Ley Cu (%)		Ley Mo (%)		Ley Fe (%)		Ley Ins (%)		Recuperación (%)				
			Parcial	Acum.	Parcial	Acum.	Parcial	Acum.	Parcial	Acum.	Parcial	Acum.	Peso	Cu	Mo	Fe	Ins
Alimentación			1177.3	1177.3	0.95	0.95	0.028	0.028	3.61	3.61	85.63	85.63	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Conc.	1	min	59.7	59.7	11.50	11.50	0.235	0.235	22.80	22.80	36.20	36.20	5.07	61.14	42.79	31.98	2.14
Conc.	2	min	31.3	91.0	5.60	9.47	0.138	0.202	12.90	19.39	66.30	46.55	7.73	76.75	55.97	41.47	4.20
Conc.	4	min	49.4	140.4	2.30	6.95	0.064	0.153	5.80	14.61	74.70	56.46	11.93	86.87	65.61	48.20	7.86
Conc.	7	min	54.4	194.8	0.66	5.19	0.025	0.117	3.40	11.48	76.60	62.08	16.55	90.06	69.76	52.55	12.00
Conc.	11	min	48.4	243.2	0.45	4.25	0.014	0.097	2.80	9.75	79.90	65.63	20.66	92.00	71.83	55.73	15.83
Conc.	16	min	52.2	295.4	0.20	3.53	0.008	0.081	2.30	8.44	83.10	68.72	25.09	92.93	73.10	58.56	20.13
Relave			881.9	881.9	0.090	0.090	0.010	0.010	2.000	2.00	91.300	91.30	74.91	7.07	26.90	41.44	79.87

Condiciones: Ph: 9 Cal: 0,1 g Silicato: 30 g/ton T5:60 g/ton

Flujo			Peso (g)		Ley Cu (%)		Ley Mo (%)		Ley Fe (%)		Ley Ins (%)		Recuperación (%)				
			Parcial	Acum.	Parcial	Acum.	Parcial	Acum.	Parcial	Acum.	Parcial	Acum.	Peso	Cu	Mo	Fe	Ins
Alimentación			1179.7	1179.7	1.07	1.07	0.028	0.028	3.51	3.51	82.30	82.30	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Conc.	1	min	59.8	59.8	12.30	12.30	0.221	0.221	22.10	22.10	32.10	32.10	5.07	58.23	40.15	31.90	1.98
Conc.	2	min	32.8	92.6	6.30	10.17	0.134	0.190	12.90	18.84	68.70	45.06	7.85	74.59	53.51	42.11	4.30
Conc.	4	min	50.7	143.3	2.60	7.49	0.066	0.146	5.80	14.23	65.10	52.15	12.15	85.03	63.67	49.20	7.70
Conc.	7	min	57.7	201.0	0.86	5.59	0.029	0.113	3.40	11.12	77.70	59.49	17.04	88.96	68.76	53.94	12.32
Conc.	11	min	47.9	248.9	0.61	4.63	0.017	0.094	2.70	9.50	76.00	62.66	21.10	91.27	71.23	57.06	16.07
Conc.	16	min	53.5	302.4	0.29	3.86	0.013	0.080	2.10	8.19	78.50	65.47	25.63	92.50	73.35	59.77	20.39
Relave			877.3	877.3	0.108	0.108	0.010	0.010	1.900	1.90	88.100	88.10	74.37	7.50	26.65	40.23	79.61

Condiciones: Ph: 9 Cal: 0,2 g T5: 30 g/ton

Flujo			Peso (g)		Ley Cu (%)		Ley Mo (%)		Ley Fe (%)		Ley Ins (%)		Recuperación (%)				
			Parcial	Acum.	Parcial	Acum.	Parcial	Acum.	Parcial	Acum.	Parcial	Acum.	Peso	Cu	Mo	Fe	Ins
Alimentación			1176.7	1176.7	1.06	1.06	0.026	0.026	3.89	3.89	81.23	81.23	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Conc.	1	min	53.1	53.1	13.20	13.20	0.220	0.220	24.50	24.50	26.50	26.50	4.51	56.07	37.66	28.39	1.47
Conc.	2	min	37.5	90.6	6.70	10.51	0.156	0.194	13.00	19.74	51.90	37.01	7.70	76.17	56.51	39.03	3.51
Conc.	4	min	49.7	140.3	2.60	7.71	0.072	0.150	6.50	15.05	68.90	48.31	11.92	86.50	68.05	46.08	7.09
Conc.	7	min	53.7	194.0	0.84	5.81	0.029	0.117	4.50	12.13	73.90	55.39	16.49	90.11	73.07	51.36	11.24
Conc.	11	min	54.5	248.5	0.48	4.64	0.016	0.095	3.00	10.13	77.50	60.24	21.12	92.20	75.88	54.93	15.66
Conc.	16	min	58.10	306.6	0.24	3.80	0.009	0.078	2.60	8.70	78.60	63.72	26.06	93.32	77.56	58.22	20.44
Relave			870.100	870.1	0.096	0.096	0.008	0.008	2.200	2.20	87.400	87.40	73.94	6.68	22.44	41.78	79.56

Condiciones: Ph: 9 Cal: 0,1 g Silicato: 30 g/ton M3: 30 g/ton

Flujo			Peso (g)		Ley Cu (%)		Ley Mo (%)		Ley Fe (%)		Ley Ins (%)		Recuperación (%)				
			Parcial	Acum.	Parcial	Acum.	Parcial	Acum.	Parcial	Acum.	Parcial	Acum.	Peso	Cu	Mo	Fe	Ins
Alimentación			1175.8	1175.8	1.05	1.05	0.026	0.026	3.55	3.55	82.28	82.28	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Conc.	1	min	61.9	61.9	11.80	11.80	0.216	0.216	21.00	21.00	28.00	28.00	5.26	59.01	42.94	31.18	1.79
Conc.	2	min	39.8	101.7	5.80	9.45	0.124	0.180	11.10	17.13	50.40	36.77	8.65	77.66	58.79	41.78	3.86
Conc.	4	min	46.6	148.3	2.30	7.20	0.062	0.143	5.80	13.57	63.70	45.23	12.61	86.32	68.07	48.26	6.93
Conc.	7	min	52.7	201.0	0.85	5.54	0.030	0.113	3.30	10.87	72.30	52.33	17.09	89.94	73.15	52.43	10.87
Conc.	11	min	53.9	254.9	0.47	4.47	0.016	0.093	2.50	9.10	73.40	56.78	21.68	91.98	75.92	55.67	14.96
Conc.	16	min	64.8	319.7	0.21	3.60	0.010	0.076	2.10	7.68	74.00	60.27	27.19	93.08	78.00	58.93	19.92
Relave			856.1	856.1	0.100	0.100	0.008	0.008	2.000	2.00	90.500	90.50	72.81	6.92	22.00	41.07	80.08

Condiciones: Ph: 9 Cal: 0,1g Silicato: 30 g/ton M3:60 g/ton

Flujo			Peso (g)		Ley Cu (%)		Ley Mo (%)		Ley Fe (%)		Ley Ins (%)		Recuperación (%)				
			Parcial	Acum.	Parcial	Acum.	Parcial	Acum.	Parcial	Acum.	Parcial	Acum.	Peso	Cu	Mo	Fe	Ins
Alimentación			1177.6	1177.6	1.02	1.02	0.027	0.027	3.62	3.62	77.86	77.86	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Conc.	1	min	57.7	57.7	12.60	12.60	0.244	0.244	22.90	22.90	29.20	29.20	4.90	60.50	44.18	30.99	1.84
Conc.	2	min	32.5	90.2	6.10	10.26	0.147	0.209	12.90	19.30	52.80	37.70	7.66	77.00	59.17	40.82	3.71
Conc.	4	min	47.0	137.2	2.40	7.57	0.066	0.160	6.20	14.81	62.00	46.03	11.65	86.38	68.90	47.66	6.89
Conc.	7	min	55.7	192.9	0.81	5.62	0.028	0.122	3.60	11.57	70.60	53.12	16.38	90.14	73.80	52.36	11.18
Conc.	11	min	59.1	252.0	0.49	4.41	0.016	0.097	2.80	9.52	74.00	58.02	21.40	92.55	76.76	56.24	15.95
Conc.	16	min	48.00	300.0	0.22	3.74	0.008	0.083	2.30	8.36	73.40	60.48	25.48	93.43	77.97	58.83	19.79
Relave			877.600	877.6	0.090	0.090	0.008	0.008	2.000	2.00	83.800	83.80	74.52	6.57	22.03	41.17	80.21

Condiciones: Ph: 9 Cal:0,2 g M3:30 g/ton

Flujo			Peso (g)		Ley Cu (%)		Ley Mo (%)		Ley Fe (%)		Ley Ins (%)		Recuperación (%)				
			Parcial	Acum.	Parcial	Acum.	Parcial	Acum.	Parcial	Acum.	Parcial	Acum.	Peso	Cu	Mo	Fe	Ins
Alimentación			1173.6	1173.6	1.05	1.05	0.025	0.025	3.58	3.58	78.13	78.13	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Conc.	1	min	56.0	56.0	13.10	13.10	0.216	0.216	23.10	23.10	28.90	28.90	4.77	59.37	41.05	30.80	1.77
Conc.	2	min	35.5	91.5	6.10	10.38	0.127	0.181	12.30	18.91	48.20	36.39	7.80	76.90	56.35	41.20	3.63
Conc.	4	min	45.1	136.6	2.70	7.85	0.067	0.144	6.10	14.68	68.70	47.06	11.64	86.75	66.60	47.75	7.01
Conc.	7	min	49.0	185.6	0.87	6.01	0.030	0.114	3.50	11.73	69.50	52.98	15.81	90.20	71.59	51.83	10.72
Conc.	11	min	50.2	235.8	0.51	4.84	0.016	0.093	2.80	9.83	71.00	56.82	20.09	92.27	74.31	55.18	14.61
Conc.	16	min	67.4	303.2	0.19	3.80	0.009	0.074	2.10	8.11	73.00	60.41	25.84	93.31	76.37	58.55	19.98
Relave			870.4	870.4	0.095	0.095	0.008	0.008	2.000	2.00	84.300	84.30	74.16	6.69	23.63	41.45	80.02

C.5: Perfil granulométrico muestra de cal

	Malla	Abertura	Peso Retenido		Acumulado	Pasante
	#	Malla			Retenido	Acumulado
			grs	%	%	%
1	4	4750	0	0	0	100
2	6	3350	0	0	0	100
3	8	2360	14.7	10.95	10.95	89.05
4	12	1700	28.7	21.39	32.34	67.66
5	16	1180	21.3	15.87	48.21	51.79
6	20	850	12.9	9.61	57.82	42.18
7	30	600	9.4	7.00	64.83	35.17
8	40	425	7.3	5.44	70.27	29.73
9	50	300	5.8	4.32	74.59	25.41
10	70	212	5.3	3.95	78.54	21.46
11	100	150	5.5	4.10	82.64	17.36
12	140	106	5.1	3.80	86.44	13.56
13	200	75	5.1	3.80	90.24	9.76
14	-200	0	13.1	9.76	100	0
D80	2076.56	µm		D50	1115.57	µm

C.6: Reactividad según norma ASTM C-110

Prueba N° 1 (1:1)		Prueba N° 2 (1:2)		Prueba N° 3 (1:3)		Prueba N° 4 (1:4)		Prueba N° 5 (1:5)	
Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Temperatura (°C)
0	25.4	0	25.8	0	25.3	0	26.1	0	25.7
0.5	92.2	0.5	90.0	0.5	88.9	0.5	53.9	0.5	45.6
1	91.8	1	91.9	1	87.7	1	58.3	1	48.9
2	88.4	2	88.1	2	82.8	2	59.5	2	51.1
3	83.0	3	82.8	3	78.9	3	60.5	3	52.1
4	80.0	4	79.3	4	75.0	4	60.3	4	53.6
5	76.2	5	76.6	5	72.7	5	60.2	5	53.5
6	73.8	6	74.8	6	70.8	6	60.0	6	53.3
7	71.4	7	72.9	7	69.0	7	59.0	7	53.2
8	68.9	8	71.1	8	67.7	8	58.0	8	52.6
9	67.2	9	69.6	9	66.3	9	57.1	9	52.1
10	65.1	10	68.0	10	65.3	10	56.4	10	51.6

C.7: Perfil granulométrico lechada

Abertura Malla	Cal Viva		Prueba N° 1 (1:1)		Prueba N° 2 (1:2)		Prueba N° 3 (1:3)		Prueba N° 4 (1:4)		Prueba N° 5 (1:5)	
µm	Peso Retenido (g)	Pasante Acumulado (%)	Peso Retenido (g)	Pasante Acumulado (%)	Peso Retenido (g)	Pasante Acumulado (%)	Peso Retenido (g)	Pasante Acumulado (%)	Peso Retenido (g)	Pasante Acumulado (%)	Peso Retenido (g)	Pasante Acumulado (%)
4750	0.0	100.0	0.0	100.00	0.0	100.00	0.0	100.00	0.0	100.00	0.0	100.00
3350	0.0	100.0	0.0	100.00	0.0	100.00	0.0	100.00	0.0	100.00	0.0	100.00
2360	14.7	89.0	0.0	100.00	0.0	100.00	0.0	100.00	0.0	100.00	0.0	100.00
1700	28.7	67.7	0.0	100.00	0.0	100.00	0.0	100.00	0.0	100.00	0.0	100.00
1180	21.3	51.8	0.2	99.67	0.0	100.00	0.1	99.84	0.0	100.00	0.0	100.00
850	12.9	42.2	0.6	98.69	0.8	98.69	2.2	96.33	1.1	98.26	1.2	98.12
600	9.4	35.2	15.9	72.71	16.1	72.34	15.1	72.20	17.4	70.82	18.6	69.01
425	7.3	29.7	14.8	48.53	13.0	51.06	14.0	49.84	13.9	48.90	14.3	46.64
300	5.8	25.4	9.2	33.50	8.4	37.32	9.3	34.98	8.6	35.33	8.4	33.49
212	5.3	21.5	5.9	23.86	5.6	28.15	6.6	24.44	6.0	25.87	5.7	24.57
150	5.5	17.4	4.6	16.34	4.6	20.62	5.7	15.34	5.1	17.82	4.8	17.06
106	5.1	13.6	3.1	11.27	3.3	15.22	3.8	9.27	4.2	11.20	4.7	9.70
75	5.1	9.8	2.4	7.35	2.5	11.13	2.4	5.43	2.4	7.41	2.3	6.10
0	13.1	0.0	4.5	0.00	6.8	0.00	3.4	0.00	4.7	0.00	3.9	0.00
	p80	2077	p80	669	p80	672	p80	679	p80	683	p80	694

C.8: Consumo de cal mineral SAG y convencional

Relación Cal: Agua (1:1)						Relación Cal: Agua (1:2)						Relación Cal: Agua (1:3)					
SAG			CONVENCIONAL			SAG			CONVENCIONAL			SAG			CONVENCIONAL		
Cal (grs)	Ph	grs/ton	Cal (grs)	Ph	grs/ton	Cal (grs)	Ph	grs/ton	Cal (grs)	Ph	grs/ton	Cal (grs)	Ph	grs/ton	Cal (grs)	Ph	grs/ton
0.0	7.45	0.0	0.0	7.38	0.0	0.0	7.5	0.0	0.0	7.35	0.0	0.0	7.05	0.0	0.0	7.43	0.0
0.2	10.1	169.5	0.2	9.81	169.5	0.2	9.84	169.5	0.2	9.67	169.5	0.2	9.87	169.5	0.2	9.7	169.5
0.4	10.88	339.0	0.4	10.77	339.0	0.4	10.71	339.0	0.4	10.71	339.0	0.4	10.96	339.0	0.4	10.62	339.0
0.6	11.25	508.5	0.6	11.13	508.5	0.6	11.09	508.5	0.6	11.11	508.5	0.6	11.4	508.5	0.6	11.06	508.5
0.8	11.5	678.0	0.8	11.45	678.0	0.8	11.43	678.0	0.8	11.41	678.0	0.8	11.58	678.0	0.8	11.41	678.0
1.0	11.61	847.5	1.0	11.62	847.5	1.0	11.6	847.5	1.0	11.63	847.5	1.0	11.72	847.5	1.0	11.62	847.5
1.2	11.71	1016.9	1.2	11.8	1016.9	1.2	11.68	1016.9	1.2	11.7	1016.9	1.2	11.79	1016.9	1.2	11.7	1016.9
1.4	11.77	1186.4	1.4	11.91	1186.4	1.4	11.74	1186.4	1.4	11.76	1186.4	1.4	11.84	1186.4	1.4	11.77	1186.4
1.6	11.83	1355.9	1.6	11.98	1355.9	1.6	11.82	1355.9	1.6	11.76	1355.9	1.6	11.88	1355.9	1.6	11.8	1355.9
1.8	11.87	1525.4	1.8	12.03	1525.4	1.8	11.88	1525.4	1.8	11.8	1525.4	1.8	11.93	1525.4	1.8	11.83	1525.4
2.0	11.92	1694.9	2.0	12.13	1694.9	2.0	11.91	1694.9	2.0	11.84	1694.9	2.0	11.95	1694.9	2.0	11.88	1694.9
2.2	11.96	1864.4	2.2	12.15	1864.4	2.2	11.94	1864.4	2.2	11.88	1864.4	2.2	11.99	1864.4	2.2	11.92	1864.4
2.4	11.97	2033.9	2.4	12.18	2033.9	2.4	11.96	2033.9	2.4	11.92	2033.9	2.4	12	2033.9	2.4	11.94	2033.9
2.6	12.03	2203.4	2.6	12.19	2203.4	2.6	11.98	2203.4	2.6	11.92	2203.4	2.6	12.01	2203.4	2.6	11.95	2203.4
2.8	12.02	2372.9	2.8	12.2	2372.9	2.8	11.99	2372.9	2.8	11.92	2372.9	2.8	12.04	2372.9	2.8	11.97	2372.9
3.0	12.04	2542.4	3.0	12.22	2542.4	3.0	12.01	2542.4	3.0	11.94	2542.4	3.0	12.05	2542.4	3.0	12	2542.4
3.2	12.05	2711.9	3.2	12.22	2711.9	3.2	12.03	2711.9	3.2	11.95	2711.9	3.2	12.05	2711.9	3.2	12.01	2711.9

Relación Cal: Agua (1:4)						Relación Cal: Agua (1:5)					
SAG			CONVENCIONAL			SAG			CONVENCIONAL		
Cal (grs)	Ph	grs/ton	Cal (grs)	Ph	grs/ton	Cal (grs)	Ph	grs/ton	Cal (grs)	Ph	grs/ton
0.0	7.51	0.0	0.0	7.32	0.0	0.0	7.45	0.0	0.0	7.27	0.0
0.2	9.79	169.5	0.2	9.83	169.5	0.2	9.8	169.5	0.2	9.5	169.5
0.4	10.84	339.0	0.4	10.63	339.0	0.4	10.84	339.0	0.4	10.5	339.0
0.6	11.26	508.5	0.6	11.01	508.5	0.6	11.31	508.5	0.6	11.01	508.5
0.8	11.48	678.0	0.8	11.31	678.0	0.8	11.53	678.0	0.8	11.35	678.0
1.0	11.59	847.5	1.0	11.45	847.5	1.0	11.71	847.5	1.0	11.48	847.5
1.2	11.7	1016.9	1.2	11.58	1016.9	1.2	11.82	1016.9	1.2	11.63	1016.9
1.4	11.79	1186.4	1.4	11.69	1186.4	1.4	11.89	1186.4	1.4	11.71	1186.4
1.6	11.85	1355.9	1.6	11.77	1355.9	1.6	11.95	1355.9	1.6	11.78	1355.9
1.8	11.88	1525.4	1.8	11.81	1525.4	1.8	11.99	1525.4	1.8	11.81	1525.4
2.0	11.92	1694.9	2.0	11.87	1694.9	2.0	12.02	1694.9	2.0	11.85	1694.9
2.2	11.94	1864.4	2.2	11.91	1864.4	2.2	12.06	1864.4	2.2	11.88	1864.4
2.4	11.97	2033.9	2.4	11.93	2033.9	2.4	12.09	2033.9	2.4	11.93	2033.9
2.6	11.98	2203.4	2.6	11.96	2203.4	2.6	12.1	2203.4	2.6	11.95	2203.4
2.8	12	2372.9	2.8	11.96	2372.9	2.8	12.13	2372.9	2.8	11.97	2372.9
3.0	12.01	2542.4	3.0	11.98	2542.4	3.0	12.15	2542.4	3.0	12	2542.4
3.2	12.04	2711.9	3.2	12	2711.9	3.2	12.15	2711.9	3.2	12.01	2711.9

C.9: Reactividad de Ca con agua fría

Reactividad (1:1)		Reactividad (1:2)		Reactividad (1:3)		Reactividad (1:4)	
Tiempo, min.	Temperatura, °C	Tiempo, min.	Temperatura, °C	Tiempo, min.	Temperatura, °C	Tiempo, min.	Temperatura, °C
0	7.47	0	6.63	0	6.77	0	5.63
1/6	33.30	1/6	24.53	1/6	19.83	1/6	15.67
1/3	36.27	1/3	26.50	1/3	20.70	1/3	16.97
0.5	39.77	0.5	28.10	0.5	21.50	0.5	17.70
1	50.07	1	31.13	1	23.47	1	18.80
1.5	63.23	1.5	34.60	1.5	25.50	1.5	19.80
2	76.57	2	38.93	2	28.10	2	20.73
2.5	83.53	2.5	43.43	2.5	30.50	2.5	21.87
3	86.27	3	47.50	3	33.23	3	23.03
3.5	87.63	3.5	51.23	3.5	35.80	3.5	24.27
4	88.20	4	54.50	4	38.00	4	25.47
4.5	88.40	4.5	57.30	4.5	40.20	4.5	26.73
5	88.43	5	59.03	5	42.13	5	28.07
6	86.87	6	61.47	6	45.03	6	30.43
7	85.33	7	62.83	7	47.07	7	32.77
8	83.77	8	63.40	8	48.13	8	34.63
9	82.03	9	63.80	9	49.10	9	36.27
10	80.57	10	63.87	10	49.80	10	37.47
11	78.97	11	63.90	11	50.07	11	38.40
12	77.30	12	63.83	12	50.37	12	39.07
13	75.77	13	63.43	13	50.57	13	39.57
14	74.37	14	62.73	14	50.63	14	40.00
15	72.67	15	62.67	15	50.53	15	40.27
16	61.87	16	60.63	16	59.80	16	40.57
17	0.00	17	0.00	17	0.00	17	40.83
18	0.00	18	0.00	18	0.00	18	40.93

C.10: Reactividad de Cal con distintas leyes de Cal inicial

Lote 1 CaO: 87,8%		Lote 2 CaO: 92,5%		Lote 3 CaO: 89,8%		Lote 4 CaO: 76,7%		Lote 5 CaO: 86,9%		Lote 6 CaO: 82,7%	
Tiempo, min.	Temperatura, °C	Tiempo, min.	Temperatura, °C	Tiempo, min.	Temperatura, °C	Tiempo, min.	Temperatura, °C	Tiempo, min.	Temperatura, °C	Tiempo, min.	Temperatura, °C
0	5.25	0	5.50	0	5.35	0	5.75	0	5.50	0	5.40
1/6	16.55	1/6	20.30	1/6	18.60	1/6	15.00	1/6	15.75	1/6	14.60
1/3	17.20	1/3	25.45	1/3	19.55	1/3	15.95	1/3	16.95	1/3	15.40
0.5	18.10	0.5	29.15	0.5	20.00	0.5	16.70	0.5	17.70	0.5	16.30
1	19.00	1	34.40	1	21.20	1	18.20	1	18.75	1	17.35
1.5	19.70	1.5	38.10	1.5	22.70	1.5	19.25	1.5	19.65	1.5	18.30
2	20.20	2	40.55	2	23.80	2	19.95	2	20.25	2	18.80
2.5	20.75	2.5	42.15	2.5	24.80	2.5	20.50	2.5	20.65	2.5	19.25
3	21.35	3	43.20	3	26.00	3	21.00	3	21.15	3	19.80
3.5	21.85	3.5	44.30	3.5	26.80	3.5	21.30	3.5	21.60	3.5	20.25
4	22.35	4	44.95	4	28.00	4	21.60	4	22.05	4	20.65
4.5	22.95	4.5	44.65	4.5	29.00	4.5	22.10	4.5	22.55	4.5	21.20
5	23.45	5	44.15	5	30.05	5	22.45	5	23.00	5	21.60
6	24.55	6	43.40	6	32.20	6	22.95	6	23.95	6	22.50
7	25.85	7	42.80	7	34.10	7	23.40	7	24.95	7	23.50
8	27.35	8	42.10	8	35.55	8	23.80	8	25.85	8	24.60
9	29.00	9	41.35	9	36.65	9	24.25	9	26.80	9	26.00
10	30.75	10	40.45	10	37.45	10	24.65	10	27.65	10	27.45
11	32.30	11	0.00	11	37.95	11	25.10	11	28.50	11	28.95
12	33.75	12	0.00	12	38.35	12	25.50	12	29.20	12	30.55
13	34.80	13	0.00	13	38.55	13	25.85	13	29.85	13	32.15
14	35.70	14	0.00	14	38.65	14	26.25	14	30.35	14	33.45
15	36.35	15	0.00	15	38.75	15	26.65	15	30.65	15	34.70
16	36.90	16	0.00	16	0.00	16	27.00	16	30.90	16	35.75
17	37.30	17	0.00	17	0.00	17	27.35	17	31.05	17	36.55
18	37.60	18	0.00	18	0.00	18	27.75	18	31.20	18	37.20
19	37.80	19	0.00	19	0.00	19	28.05	19	31.40	19	37.55
20	37.95	20	0.00	20	0.00	20	28.20	20	31.45	20	37.95
LEY CaO	65.75	LEY CaO	68.6	LEY CaO	68.15	LEY CaO	58.15	LEY CaO	67.15	LEY CaO	60.6

C.11: Reactividad de Cal con distintas leyes de Cal inicial

i	Malla	Abertura	Peso		Acumulado	Pasante
	#	Malla	Retenido		Retenido	Acumulado
			grs	%	%	%
1	4	4750	0	0	0	100
2	6	3350	0	0	0	100
3	8	2360	4.9	4.9	4.9	95.1
4	12	1700	8.3	8.3	13.2	86.8
5	16	1180	10	10	23.2	76.8
6	20	850	10	10	33.2	66.8
7	30	600	9.5	9.5	42.7	57.3
8	40	425	8.6	8.6	51.3	48.7
9	50	300	7.5	7.5	58.8	41.2
10	70	212	7.1	7.1	65.9	34.1
11	100	150	5.6	5.6	71.5	28.5
12	140	106	5	5	76.5	23.5
13	200	75	5.1	5.1	81.6	18.4
14	-200	0	18.4	18.4	100	0
D80	1332.80	µm	D50		449.42	µm

C.12: Reactividad de Cal con agua fría y precalentada

Tiempo (min)	Reactividad (1:2)		Reactividad (1:3)		Reactividad (1:4)	
	1	2	1	2	1	2
0	5.60	25.00	6.00	25.50	6.30	25.50
1/6	22.50	36.40	18.20	33.50	15.70	30.90
1/3	23.50	37.60	19.20	34.40	16.40	31.80
0.5	23.90	42.40	19.80	35.10	16.90	32.10
1	25.80	49.10	20.50	38.30	17.80	33.90
1.5	27.80	56.70	21.10	42.00	18.80	36.30
2	30.10	63.50	22.10	46.90	19.30	38.70
2.5	32.60	67.70	23.00	51.60	20.00	41.60
3	36.20	70.20	24.20	55.30	20.60	45.00
3.5	40.40	72.00	25.60	58.20	21.40	47.50
4	44.60	72.90	27.00	60.40	22.10	49.60
4.5	48.60	73.60	28.60	61.50	23.10	51.50
5	51.90	74.10	30.10	62.40	24.10	52.60
6	56.80	74.30	34.20	63.40	25.80	54.30
7	59.80	74.40	38.30	64.00	28.10	55.20
8	61.20	0.00	41.00	64.30	30.60	55.80
9	62.00	0.00	43.50	64.40	32.80	56.20
10	62.30	0.00	45.30	64.40	34.50	56.50
11	62.40	0.00	46.40	0.00	36.00	56.60
12	62.40	0.00	47.10	0.00	37.20	56.60
13	62.50	0.00	47.50	0.00	38.20	56.70
14	0.00	0.00	47.90	0.00	38.90	0.00
15	0.00	0.00	48.10	0.00	39.40	0.00
16	0.00	0.00	48.20	0.00	39.80	0.00
17	0.00	0.00	0.00	0.00	40.10	0.00
18	0.00	0.00	0.00	0.00	40.30	0.00
LEY CaO	67.2	78.9	62.3	69.3	56.9	64.5

	Razón Cal: Agua (1:2)		Razón Cal: Agua (1:3)		Razón Cal: Agua (1:4)	
TEMPERATURA AGUA (°C)	6.00	25.00	6.00	25.00	6.00	25.00
REACCION COMPLETA (min)	13	7	16	10	20	13