

ÍNDICE

RESUMEN.....	ii
ABSTRACT	iii
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivo general.....	4
1.2. Objetivos específicos	4
1.3. Alcances.....	5
CAPÍTULO 2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1. Antecedentes del procesamiento de menas de cobre	6
2.2. Efecto del arsénico en la ruta del procesamiento de los concentrados de Cu.....	12
2.2.1. Medidas actuales para la estabilización del As	15
2.3. Aspectos teóricos de la flotación por espuma.....	18
2.3.1. Reactivos de flotación	21
2.4. Comportamiento del colector en flotación.....	24
2.4.1. Teoría química de adsorción del xantato.....	24
2.4.2. Teoría electroquímica de la adsorción del xantato	24
2.5. Flotación de sulfuros.....	27
2.5.1. Flotación de sulfuros en ausencia de colector	27
2.6. Antecedentes de la enargita	32
2.6.1. Enargita.....	32
2.6.2. Génesis	33
2.6.3. Características del mineral: propiedades físicas y químicas de la enargita....	34
2.6.4. Diagrama $E_h - pH$	35
2.7. Flotación de enargita.....	37

2.7.1.	Selectividad de la enargita en función del potencial de oxidación.....	37
2.7.2.	Selectividad de la enargita en función de colectores.....	43
2.7.3.	Selectividad en la flotación de enargita a partir del uso de depresantes.....	46
2.8.	Distribución en la clasificación de fracciones de tamaño y efecto del gas en el proceso de flotación.....	48
2.8.1.	Análisis del efecto de la distribución de tamaños de partícula sobre la flotación de minerales.....	48
2.8.2.	Efecto del gas nitrógeno en la flotación de sulfuros.....	50
2.8.3.	Fundamentos del uso del gas ozono como alternativa oxidante en el acondicionamiento de la pulpa por flotación.....	51
2.9.	Antecedentes del lote de concentrado.....	52
CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA.....		55
3.1.	Esquema secuencial de los trabajos experimentales.....	56
3.2.	Obtención del concentrado de cobre.....	58
3.3.	Preparación y análisis del material	58
3.3.1.	Análisis mineralógico por Difracción de Rayos X (DRX).....	59
3.3.2.	Análisis por fracciones de partícula.....	60
3.4.	Estado de oxidación superficial del concentrado.....	60
3.5.	Determinación de la densidad aparente del concentrado por picnometría	61
3.6.	Equipos y materiales.....	61
3.6.1.	Celdas de laboratorio.....	62
3.6.2.	Descripción de equipos auxiliares	64
3.6.3.	Reactivos químicos.....	66
3.7.	Procedimiento experimental	67
3.7.1.	Variables operacionales para las pruebas experimentales de flotación.....	68
3.7.2.	Descripción general de pruebas de microflotación en celda <i>Partridge-Smith</i>	70

3.7.3.	Ajuste del potencial de oxidación, E_h de la pulpa mediante el uso de ozono como etapa de preacondicionamiento.....	73
3.7.4.	Procedimiento general de pruebas de flotación masiva en la celda EDEMET.....	75
3.8.	Criterios de evaluación de las pruebas experimentales de flotación	76
3.8.1.	Indicadores metalúrgicos.....	77
CAPÍTULO 4 RESULTADOS		79
4.1.	Caracterización de las muestras de concentrado.....	79
4.1.1.	Análisis mineralógico del concentrado.....	80
4.2.	Determinación de las distribuciones de tamaño de las fracciones de concentrado	82
4.3.	Resultados de las pruebas de microflotación colectiva	84
4.3.1	Recuperación de enargita en el concentrado en función del pH.....	84
4.3.2.	Efecto del pretratamiento del concentrado exponiéndolo a condiciones ácidas previo a las pruebas de microflotación	92
4.3.3.	Comportamiento de la pirita en el proceso de microflotación con el uso de reactivos modificadores de pH: óxido de calcio (cal) y soda caústica (NaOH).....	96
4.3.4.	Efecto del uso del reactivo colector MX-9950 sobre la recuperación de enargita como alternativa al MX-5160.....	98
4.3.5.	Efecto del gas ozono en el rendimiento del proceso	100
4.3.6.	Efecto del tamaño de partícula sobre la recuperación metalúrgica de enargita... ..	106
4.4.	Flotación masiva	109
4.4.1.	Flotación rougher.....	109
4.4.2.	Prueba de flotación para la separación selectiva de enargita.....	112
4.4.3.	Razón de enriquecimiento	115
4.4.4	Índice de Selectividad.....	117

5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	120
5.1.	Conclusiones	120
5.2.	Recomendaciones	121
6.	REFERENCIAS	123
7.	ANEXOS	132
7.1.	ANEXO A. Análisis granulométrico del concentrado original de Cu-As.....	132
7.2.	ANEXO B. Densidad por picnometría de muestras de concentrado.....	133
7.3.	ANEXO C. Memoria de cálculo para soluciones genéricas de reactivos químicos.....	134
7.4.	ANEXO D. Reporte de las condiciones experimentales para pruebas por microflotación y detalle del procedimiento para el cálculo de recuperación metalúrgica.....	135
7.5.	ANEXO E. Detalle experimental de prueba reproducible por flotación.	144

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura2.1. Trazabilidad del As en una fundición de Cu (Gestión ambiental de minería, 2010; Torres y Riveros, 2006).....	14
Figura2.2. Tratamiento por tostación reductora de un concentrado de enargita que incluye el procesamiento de subproductos (Safarzadeh et al., 2014b en Nazari et al., 2016)	16
Figura2.3. Esquema del proceso de flotación en una celda típica de concentración de minerales (Abarca, 2011).	20
Figura2.4. Valores de recuperación de enargita observados experimentalmente en pruebas de microflotación en ausencia de colector; a) en función del pH y efecto de adición de H ₂ O ₂ y b) en función del potencial redox (Kantar, 2002).....	30
Figura2.5. Mineral de enargita en presencia de piritita y cuarzo, <i>Steward Mine, Butte, Silver Bow Co, Montana, USA</i> , (Fabre Minerals, 1996-2020).....	34
Figura2.6. Diagrama de estabilidad de fases; a) diagrama de fases del sistema Cu-As-S y agua a 25 °C; b) diagrama de fases del sistema As-Cu y agua a 25 °C (Castro y Baltierra, 2005).....	36
Figura2.7. Valores de recuperación de sulfuros de cobre por flotación de diferentes sistemas minerales mixtos (○ calcosina-enargita; □ covelita-enargita; △ calcopirita-enargita; ● calcosina-tennantita; ■ covelita-tennantita; ▲ calcopirita-tennantita) con y sin la presencia de tratamientos preoxidativos. (a) pH 5; (b) pH 11 (Fornasiero et al. 2001). ..	40
Figura2.8. (a) Relación en la recuperación por flotación de la enargita y la calcopirita en función del potencial de la pulpa. (b) Relación en la recuperación por flotación de la enargita y calcosina en función del potencial de la pulpa (Senior et al. 2006).	42
Figura2.9. Flotabilidad de enargita mediante el uso de distintos colectores a pH 10,5 (Castro et al. 2003)	44
Figura2.10. Recuperación por flotación, en función del tamaño promedio de partícula (Trahar, 1981).....	49
Figura3.1. Esquema general de la metodología experimental en el procesamiento por microflotación y flotación del concentrado de Cu-As (elaboración propia)	57

Figura3.2. Representación esquemática de una celda de microflotación tipo <i>Partridge-Smith</i> (elaboración propia).	62
Figura3.3. Celda de flotación de laboratorio modelo EDEMET®.	63
Figura3.4. Montaje del sistema de preacondicionamiento con gas ozono (elaboración propia).....	74
Figura3.5. Proceso de acondicionamiento de la pulpa (elaboración propia)	75
Figura3.6. Montaje experimental para las pruebas de flotación masiva en celda EDEMET. 1) Flujómetros; 2) controlador automatizado; 3) cilindro de nitrógeno; 4) bomba de reposición de nivel; 5) celda acrílica; 6) medidor de pH (elaboración propia)	77
Figura4.1. Difractograma de rayos X de una muestra de concentrado de enargita utilizado en el presente estudio. Py: pirita; En: enargita; Cp: calcopirita; Pn: posnjakita y Qz: cuarzo (elaboración propia).....	81
Figura4.2. Distribución acumulada de tamaños de partícula del concentrado utilizado en el presente estudio (elaboración propia).....	82
Figura4.3. Valores de recuperación metalúrgica de enargita en el concentrado en función del pH y la relación colector-espumante utilizados en las pruebas, especificados en la Tabla 3.9 (elaboración propia).....	85
Figura4.4. Diagrama de Pourbaix del sistema Cu-As-S-H ₂ O a 25 °C (Extraído de Castro y Baltierra 2005).....	88
Figura4.5. Efecto del pH sobre la recuperación metalúrgica de enargita en el concentrado para dos condiciones de colector y espumante adicionado al medio de flotación (pruebas P3 y P6 de la Tabla 4.3) (elaboración propia)	89
Figura4.6. Efecto del pH y de la relación de colector y espumante utilizados en las pruebas de flotación sobre la ley de As del concentrado (elaboración propia).....	91
Figura4.7. Efecto del pH y de la relación de colector y espumante utilizados en las pruebas de flotación sobre la ley de As en el material de descarte (elaboración propia).	92
Figura4.8. Efecto de la operación de pretratamiento sobre los valores de recuperación metalúrgica de calcopirita y enargita en el concentrado (elaboración propia).	94
Figura4.9. Efecto del reactivo modificador de pH en el comportamiento de la pirita por microflotación, en pruebas a 30 mg/l de colector y 30 mg/l de espumante (elaboración propia).....	97

Figura4.10. Efecto de la recuperación metalúrgica de enargita en función del tipo de colector utilizado en pruebas de microflotación realizadas a distinto pH. Izquierda: concentrado y derecha: material de descarte (elaboración propia).....	100
Figura4.11. Efecto de la recuperación metalúrgica de la enargita, calcopirita y pirita, con respecto al tiempo de ozonización al pre-acondicionar la pulpa con gas oxidante (ozono). a) Sulfuros en el material recuperado, concentrado. b) Sulfuros en el material de descarte, cola (elaboración propia).....	104
Figura4.12. Efecto de las fracciones de tamaño de partícula sobre la eficiencia por microflotación en la recuperación de la enargita (elaboración propia).	108
Figura4.13. Prueba por flotación, recuperación de valores de enargita en el concentrado (C) y cola (T) (elaboración propia).....	111
Figura4.14. Efecto en la recuperación metalúrgica de la enargita al utilizar reactivo tionocarbamato AERO 5100p, al comparar la recuperación de acuerdo a la respuesta metalúrgica de la enargita sin la intervención de este reactivo (elaboración propia).....	114
Figura4.15. Efecto en la recuperación de enargita y calcopirita al utilizar reactivo AERO 5100p durante las pruebas de microflotación selectivas (elaboración propia).	115
Figura4.16. Razón de enriquecimiento de la enargita relacionada a las pruebas exploratorias y la prueba de selectividad por microflotación (elaboración propia).	117
Figura4.17. Efecto del índice de selectividad en la enargita definida a partir de las pruebas exploratorias (elaboración propia).....	118
Figura4.18. Efecto del índice de selectividad en la relación enargita y calcopirita de acuerdo a las pruebas de selectividad metalúrgica (elaboración propia).....	119
Figura7.1. Recuperación metalúrgica de la enargita, de acuerdo las condiciones establecidas en la prueba P3 con posterior duplicado (elaboración propia).....	142
Figura7.2. Recuperación en peso de la enargita luego de las pruebas por microflotación exploratorias en todo intervalo de pH estudiado (elaboración propia).....	143

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla2.1. Principales menas oxidadas y sulfuradas de cobre.....	7
Tabla2.2. Mecanismo de reacción de la oxidación de los concentrados de cobre en el horno de DMH bajo condiciones de tostación parcialmente oxidante (Manual de operaciones área de tostación de Codelco).....	10
Tabla2.3. Disposición de arsénico en la minería convencional (García, 2017).	17
Tabla2.4. Principales características físicas de la enargita (Brodtkorb y Crosta, 2011)	34
Tabla2.5. Principales características químicas de la enargita (Brodtkorb y Crosta, 2011) .	35
Tabla2.6. Flotación selectiva de calcopirita y enargita empleando PAX, con ajuste de potencial de oxidación (Guo y Yen, 2004).....	46
Tabla2.7. Catastro de fracciones de tamaño de partículas (elaboración propia basado en la información de Mesh y Cell, 2012).....	50
Tabla3.1. Resultados de densidad aparente por picnometría a cada uno de los ensayos realizados (elaboración propia).	61
Tabla3.2. Equipos auxiliares para las pruebas de laboratorio	64
Tabla3.3. Reactivos colectores para la flotación de sulfuros de cobre (elaboración propia).....	67
Tabla3.4. Definición de variables y parámetros operacionales para las pruebas de microflotación (elaboración propia)	68
Tabla3.5. Condiciones estandarizadas para pruebas de microflotación (elaboración propia).....	69
Tabla3.6. Ejemplo de clasificación de pruebas de microflotación en función de la dosis de reactivos colector-espumante (elaboración propia).....	70
Tabla3.7. Tiempo referencial de pruebas de flotación en laboratorio y en planta en tres mineras de Codelco, Chile (Zúñiga, 2015).....	76
Tabla4.1. Composición química del concentrado original de Cu por técnica FRX (elaboración propia).....	79
Tabla4.2. Comparación en la composición química de los elementos principales del concentrado original, de acuerdo a los valores reportado por División Ministro Hales y lo experimentalmente obtenido por técnica de absorción atómica.....	80

Tabla4.3. Composición mineralógica del concentrado de Cu de la Minera Ministro Hales (elaboración propia).....	81
Tabla4.4. Composición química de las fracciones de tamaño > #100 y > #270 y <#100 obtenidas por tamizado del concentrado de Ministro Hales (elaboración propia).	83
Tabla4.5. Condiciones operacionales de la etapa de acondicionamiento de la pulpa (elaboración propia).....	110
Tabla4.6. Condiciones operacionales de la etapa de flotación (elaboración propia).	110
Tabla4.7. Contenido de enargita en la alimentación, concentrado y cola asociados a la prueba de flotación colectiva masiva (elaboración propia).	111
Tabla7.1. Análisis granulométrico del concentrado de Cu (elaboración propia).....	132
Tabla7.2. Registro de pesos a diferentes condicionesde picnómetro (elaboración propia).....	134
Tabla7.3. Detalle de conversión de valores teóricos en soluciones genéricas de 100 ml (elaboración propia).....	135
Tabla7.4. Catastro de datos experimentales por técnica FRX y recuperación metalúrgica de la enargita, por pruebas de microflotación (elaboración propia).....	137
Tabla7.5. Datos experimentales de los elementos Cu, Fe y As como productos de los materiales concentrados y colas de acuerdo a los tiempos de ozonización en el preacondicionamiento por microflotación (elaboración propia)	139
Tabla7.6. Procesamiento de datos experimentales en términos de los sulfuros principales, luego de las pruebas de microflotación que involucraron la ozonización de la pulpa (elaboración propia).....	140
Tabla7.7. Datos experimentales del contenido de los elementos principales y la recuperación de los sulfuros de cobre como resultados de las pruebas de microflotación selectiva con colector AERO 5100p (elaboración propia)	141
Tabla7.8. Registro de valores de recuperación de enargita en duplicados para la prueba P3 de mejor rendimiento (elaboración propia).	142
Tabla7.9. Vector de operaciones para flujo de aire volumétrico de laboratorio en pruebas experimentales por flotación Rougher, referentes a la empresa SGS.....	145