

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Objetivos	2
1.1.1	Objetivo general	2
1.1.2	Objetivos específicos	2
1.1.3	Alcances	2
2	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	Cobalto	3
2.2	Yacimientos de cobalto en Chile	4
2.3	Oclusión de cobalto en pirita	5
2.4	Metalurgia del cobalto	8
2.4.1	Flotación para minerales de cobre-cobalto	8
2.4.2	Flotación iónica	9
2.4.3	Flotación de minerales mixtos óxidos-sulfuros Cu-Co	10
2.4.4	Flotación inversa	17
2.5	Principios de flotación	23
2.5.1	Flotación Espumante.....	24
2.5.2	Ángulo de contacto y Ecuación de Young	27
2.5.3	Variables de la Flotación.....	29
2.5.4	Cinética de Flotación.....	31
2.5.5	Reactivos de Flotación	31
2.5.6	Indicadores metalúrgicos	34
2.5.7	Circuitos de flotación	39
2.5.8	Equipos de flotación	40
3	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	44
3.1	Caracterización de la muestra	44

3.1.1	Preparación de la muestra	44
3.1.2	Análisis granulométrico	47
3.1.3	Densidad y peso específico	47
3.1.4	Caracterización química	48
3.1.5	Caracterización mineralógica	50
3.2	Flotación espumante.....	51
3.2.1	Conminución del mineral para diseño A y B	52
3.3	Preparación de muestra diseño A	53
3.3.1	Flotación diseño A	54
3.3.2	Separación magnética al concentrado y relave	55
3.4	Preparación de muestras diseño B	56
3.4.1	Separación magnética a las muestras de cada malla.....	57
3.4.2	Flotación diseño B	61
4	EQUIPOS Y MATERIALES	63
4.1	Equipos de caracterización física	63
4.2	Equipos de caracterización química.....	64
4.3	Equipos de caracterización mineralógica.....	65
4.4	Equipos de conminución	67
4.5	Instrumentos para concentración magnética	68
4.6	Equipos para las pruebas de flotación	69
4.7	Reactivos para Flotación.....	71
5	RESULTADOS	72
5.1	Caracterización física del mineral.....	72
5.2	Caracterización química del mineral	73
5.3	Caracterización mineralógica	74
5.4	Resultados obtenidos del diseño A.....	77
5.5	Resultados obtenidos del diseño B.....	80
6	ANÁLISIS DE RESULTADOS	88

6.1	Caracterización Física.....	88
6.2	Caracterización Química.....	88
6.3	Caracterización mineralógica	89
6.4	Diseño A	89
6.5	Diseño B	90
6.5.1	Concentración magnética	90
6.5.2	Flotación para evaluar el pH	92
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	94
7.1	Conclusiones.....	94
7.2	Recomendaciones.....	95
8	REFERENCIAS	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 Franja Ferrífera de Chile (Townley et al., 2017)	5
Fig. 2.2 distribución de Fe y Co en un grano idiomorfo de pirita (Ruiz, 1971).....	7
Fig. 2.3 Contenido de cobalto alrededor de cada framboide (Ruiz, 1971)	7
Fig. 2.4 Extracción de Cu, Co, Ni y Zn por flotación iónica a diferentes pH y utilizando naftenato de amonio como colector (Pelegrin et al., 1994).....	10
Fig. 2.5 Circuito de Flotación con dos etapas <i>rougher-scavenger</i> (Tijsseling et al., 2019).....	12
Fig. 2.6. Curvas de recuperación de cobre para la etapa de flotación de sulfuros (A) y óxidos (B) (Tijsseling et al., 2019).....	13
Fig. 2.7. Curvas de recuperación de cobalto en la etapa de flotación de sulfuros (A) y óxidos (B) (Tijsseling et al., 2019).....	14
Fig. 2.8. Curvas de recuperación-ley para la etapa de flotación de sulfuros de Cu (A) y oxidados de Cu (B) (Tijsseling et al., 2019)	15
Fig. 2.9. Curvas de recuperación-ley para la etapa de flotación de sulfuros de Co (A) y oxidados de Co (B) (Tijsseling et al., 2019)	16
Fig. 2.10 Recuperación de pirita en función del pH y distintas dosificaciones de xantato (Fuerstenau et al. (2007))	19
Fig. 2.11 Esquema del proceso de flotación (Fuerstenau et al., 2007)	25
Fig. 2.12 Representación de las fases en el proceso de flotación (Kawatra, 1992)	26
Fig. 2.13 Conjunto base del proceso Flotación Espumante (Bustamante, 2017)	27
Fig. 2.14. Clasificación de un sólido según el ángulo θ (Linares, 2011).....	28
Fig. 2.15 Esquema de un concentrador con dos productos (Bustamante, 2017)	35
Fig. 2.16 Gráfico representativo de la región de operación en un proceso de flotación, respecto al % recuperado de la especie valiosa v/s ganga (Moraga, 2018)	38
Fig. 2.17 Esquema de una celda de flotación mecánica (Yianatos, 2014)	41
Fig. 2.18 Representación de las tres zonas formadas durante la flotación (Bravo, 2004).....	42

Fig. 2.19 Representación de una celda columnar (Yianatos, 2014)	43
Fig. 3.1 Proceso de roleo y cuarteo para obtener una muestra representativa.....	45
Fig. 3.2 Diseño A - Flotación y luego concentración magnética.....	51
Fig. 3.3 Diseño B - Concentración magnética y luego flotación.	51
Fig. 3.4 Proceso de conminución del mineral.	53
Fig. 3.5 Proceso de separación magnética.....	56
Fig. 4.1 Equipo Ro-Tap (izq). Balanza semi-micro analítica (der).....	64
Fig. 4.2 Recipientes de vidrio.	64
Fig. 4.3 Equipo FRX (izq). Equipo ICP-MS (der).....	65
Fig. 4.4 Equipo Mineralogía automatizada TESCAN (izq). Equipo DRX (der).....	66
Fig. 4.5. Chancador de mandíbulas de laboratorio (izq). Pulverizador de laboratorio (der).	67
Fig. 4.6 Molino de bolas de laboratorio.	68
Fig. 4.7 Imanes de parlantes (izq). Lente de reloj químico (der).....	69
Fig. 4.8 Celda de Flotación de laboratorio (izq). Filtro a Presión (der). (Edemet, 2020).....	70
Fig. 4.9 Medidor de pH digital (izq). Horno de secado de laboratorio (der).....	71
Fig.5.1 Gráfico de distribución tamaño de partícula de tamizado en seco.....	72
Fig. 5.2 Leyes de FRX por granulometría.....	73
Fig. 5.3 Difractograma de análisis en DRX. Laboratorio CEM.....	75
Fig. 5.4 Resultados análisis mineralógico en TESCAN. Laboratorio CEM.	76
Fig. 5.5 Leyes de Co en el concentrado y relave presentes en la fase magnética y no magnética, obtenidas por el diseño A.	79
Fig. 5.6 Leyes de Cu en el concentrado y relave presentes en la fase magnética y no magnética, obtenidas por el diseño A.	79
Fig. 5.7 Gráfico comparativo entre la recuperación de Co y Cu obtenida en la fase magnética y no magnética, presentes en el concentrado de flotación.....	80
Fig. 5.8 Gráfico de leyes obtenidas mediante FRX a las muestras de la fase magnética.	82

.....	82
Fig. 5.9 Gráfico de leyes obtenidas mediante FRX a las muestras de la fase no magnética.	82
Fig. 5.10 Leyes de Co v/s recuperación obtenidas al flotar a distintos pH.	85
Fig. 5.11 Leyes de Cu v/s recuperación obtenidas al flotar a distintos pH.	85
Fig. 5.12 Recuperaciones de Co y Cu obtenidas al flotar a distintos pH.	86
Fig. 5.13 Leyes de Co y Cu, entre diseño A y B.	86
Fig. 5.14 Recuperación de Co y Cu, entre diseño A y B.	87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Resumen de diferentes características del cobalto (Rocas y Minerales 2020)	4
Tabla 2.2 Menas de cobalto ordenadas por % del elemento Cobalto (Emsley, 1991) ...	4
Tabla 2.3 Resumen de parámetros utilizados en las pruebas de flotación para minerales mixtos (Tijsseling et al., 2019)	11
Tabla 2.4. Reactivos de flotación usados en estudio de minerales mixtos (Tijsseling et al., 2019)	12
Tabla 2.5 Resumen de diferentes tipos de colectores y sus características (Uribe, 2018)	32
Tabla 2.6: Resumen de algunos espumantes y sus características (Uribe, 2018).....	33
Tabla 2.7: Resumen de algunos Modificadores y sus características (Uribe, 2018)	34
Tabla 3.1 Resumen de análisis realizados para la caracterización mineral	46
Tabla 3.2 Serie de tamices utilizados en análisis granulométrico	47
Tabla 3.3 Elementos químicos identificados por ICP-MS y FRX.....	49
Tabla 3.4 Resumen de parámetros para la flotación sin previa separación magnética.	54
Tabla 3.5 Resumen de las pruebas para evaluar pH	61
Tabla 3.6 Resumen de parámetros utilizados en las pruebas de flotación para evaluar el pH	62
Tabla 4.1 Resumen de los principales equipos utilizados	63
Tabla 5.1: Densidad y peso específico, realizados a muestra completa	73
Tabla 5.2 Resultados análisis químico por ICP-MS en laboratorio ALS	74
Tabla 5.3 Fases minerales identificadas por DRX en Laboratorio CEM	75
Tabla 5.4 Resultados análisis mineralógico en TESCAN. Laboratorio CEM	76
Tabla 5.5: Leyes de la muestra inicial obtenidas por FRX	77
Tabla 5.6: Valores obtenidos en el cálculo de finos de mineral.....	77
Tabla 5.7 Resultados de la fase magnética posterior a la flotación	78
Tabla 5.8 Resultados de la fase no magnética posterior a la flotación	78
Tabla 5.9 Resultado de la separación del material por granulometría.....	80

Tabla 5.10 Resultado en términos de masa, del proceso de separación magnética	81
Tabla 5.11 Resumen de las leyes obtenidas mediante FRX a las muestras magnéticas y no magnéticas.....	81
Tabla 5.12 Densidad aparente y peso específico por picnometría de la fase no magnética	83
Tabla 5.13 Resumen de resultados obtenidos en la prueba de flotación a pH 9	83
Tabla 5.14: Resumen de resultados obtenidos en la prueba de flotación a pH 10	84
Tabla 5.15: Resumen de resultados obtenidos en la prueba de flotación a pH 11	84