

ÍNDICE

| | |
|--|------------|
| RESUMEN | ii |
| ABSTRACT..... | iii |
| AGRADECIMIENTOS..... | iv |
| CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1 Objetivo general..... | 3 |
| 1.2 Objetivos específicos..... | 3 |
| 1.3 Alcances..... | 3 |
| CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO..... | 4 |
| 2.1 Procesamiento pirometalúrgico del cobre..... | 4 |
| 2.1.1 Preparación de los minerales..... | 7 |
| 2.1.2 Extracción del cobre..... | 7 |
| 2.1.3 Afino del cobre..... | 8 |
| 2.2 Procesamiento hidrometalúrgico de sulfuros de cobre..... | 9 |
| 2.3 Proceso de flotación de espumas..... | 10 |
| 2.3.1 Variables del proceso de flotación..... | 11 |
| 2.3.2 Fases del proceso de flotación..... | 12 |
| 2.3.3 Etapas del proceso de flotación..... | 13 |
| 2.4 Proceso de tostación..... | 14 |
| 2.4.1 Variables del proceso de tostación..... | 14 |
| 2.5 Tipos de tostación..... | 15 |
| 2.5.1 Tostación oxidante..... | 15 |
| 2.5.2 Tostación sulfatante..... | 16 |
| 2.5.3 Tostación oxi-sulfatante..... | 17 |
| 2.6 Termodinámica de la tostación..... | 17 |
| 2.7 Diagrama ternario de estabilidad de fases del sistema Cu-S-O..... | 20 |

| | | |
|--|---|-----------|
| 2.7.1 | Diagrama ternario Cu-S-O para tostación oxidante a 500 °C | 21 |
| 2.7.2 | Diagrama ternario Cu-S-O para tostación oxidante a 550 °C | 22 |
| 2.7.3 | Diagrama ternario Cu-S-O para tostación oxidante a 600 °C | 23 |
| 2.8 | Cinética de la tostación | 24 |
| 2.9 | Modelo de núcleo recesivo | 25 |
| 2.10 | Técnicas analíticas de minerales..... | 27 |
| 2.10.1 | Fluorescencia de rayos X | 27 |
| 2.10.2 | Espectrometría infrarroja | 28 |
| 2.10.3 | Espectroscopia de absorción atómica | 28 |
| CAPÍTULO 3: Metodología experimental..... | | 30 |
| 3.1 | Equipos utilizados | 30 |
| 3.1.1 | Analizador portátil de fluorescencia de rayos X..... | 30 |
| 3.1.2 | Balanza analítica semi-micro Boeco® BXX 22..... | 31 |
| 3.1.3 | Celda de flotación EDEMET® | 31 |
| 3.1.4 | Filtro de presión EDEMET® | 32 |
| 3.1.5 | Horno de secado BellHor®..... | 33 |
| 3.1.6 | Tamizadora Ro-Tap® RX-29-10..... | 34 |
| 3.1.7 | Horno de Mufla Biobase | 34 |
| 3.2 | Materiales reactivos..... | 35 |
| 3.3 | Procedimiento experimental | 36 |
| 3.3.1 | Análisis del mineral..... | 37 |
| 3.3.2 | Preparación de muestras del mineral | 37 |
| 3.3.3 | Proceso de flotación Rougher | 39 |
| 3.3.4 | Proceso de flotación Cleaner | 41 |
| 3.3.5 | Obtención fracciones de tamaño | 42 |
| 3.3.6 | Prueba experimental previa de tostación | 43 |
| 3.3.7 | Proceso de tostación del concentrado sulfurado | 47 |
| CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADO | | 49 |
| 4.1 | Caracterización del mineral | 49 |

| | | |
|---|--|-----------|
| 4.2 | Pruebas de flotación..... | 50 |
| 4.2.1 | Caracterización granulométrica del concentrado | 50 |
| 4.2.2 | Caracterización química del concentrado..... | 51 |
| 4.3 | Prueba experimental previa de tostación | 53 |
| 4.4 | Pruebas de tostación de partículas muy pequeñas, intermedias y muy grandes..... | 55 |
| 4.4.1 | Prueba de tostación con partículas muy pequeñas | 55 |
| 4.4.2 | Prueba de tostación con partículas intermedias | 58 |
| 4.4.3 | Prueba de tostación con partículas muy grandes..... | 59 |
| 4.5 | Comportamiento de oxidación de las calcinas de cobre | 62 |
| 4.6 | Velocidad de reacción de las calcinas de cobre | 64 |
| 4.7 | Termodinámica de la prueba de tostación | 65 |
| CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES | | 68 |
| CAPÍTULO 6: RECOMENDACIONES..... | | 70 |
| CAPITULO 7: REFERENCIAS | | 71 |
| CAPITULO 8: APÉNDICE Y ANEXOS..... | | 75 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2.1: Diagrama proceso hidrometalúrgico del cobre (Biswas & Davenport, 1994). | 5 |
| Figura 2.2: Diagrama proceso pirometalúrgico del cobre (Biswas & Davenport, 1994). | 6 |
| Figura 2.3: Diagrama de flujo del proceso pirometalúrgico del cobre (Elaboración propia). | 8 |
| Figura 2.4: Diagrama de flujo del proceso hidrometalúrgico de sulfuros de cobre (Elaboración propia). | 10 |
| Figura 2.5: Proceso de flotación dentro de una celda (Abarca Rodríguez, 2011). | 11 |
| Figura 2.6: Diagrama de flujo de las etapas de flotación (Elaboración propia). | 13 |
| Figura 2.7: Diagrama ternario Cu-S-O a 500 °C (Elaboración propia). | 22 |
| Figura 2.8: Diagrama ternario Cu-S-O a 550 °C (Elaboración propia). | 23 |
| Figura 2.9: Diagrama ternario Cu-S-O a 600 °C (Elaboración propia). | 24 |
| Figura 2.10: Modelo de núcleo recesivo de una partícula (Parra Sánchez, 2018). | 26 |
| Figura 3.1: Analizador portátil de fluorescencia de rayos X (ThermoFisher, 2018). | 31 |
| Figura 3.2: Celda de flotación EDEMET (Elaboración propia). | 32 |
| Figura 3.3: Filtro de presión EDEMET® (EDEMET, 2018). | 33 |
| Figura 3.4: Horno de secado BellHor® (COTECNO, 2020). | 33 |
| Figura 3.5: Tamizadora Ro-Tap® (MATEX, 2020). | 34 |
| Figura 3.6: Horno Mufla Biobase MC2.5-12 (HR Representaciones, 2020). | 35 |
| Figura 3.7: Imagen satelital Mina Chépica (GoogleEarth, 2020). | 36 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.8: Diagrama de flujo de operaciones (Elaboración propia)..... | 37 |
| Figura 3.9: Preparación de las muestras del mineral para flotación Rougher (Elaboración propia)..... | 39 |
| Figura 3.10: Cinética de Flotación Rougher en celdas EDEMET® (Elaboración propia). | 40 |
| Figura 3.11: Cinética de Flotación Cleaner en celdas EDEMET® (Elaboración propia). | 41 |
| Figura 3.12: Variación de masas en muestras de la prueba experimental inicial de tostación (Elaboración propia)..... | 44 |
| Figura 3.13: Concentración de elementos representativos de la prueba experimental inicial de tostación (Elaboración propia)..... | 45 |
| Figura 3.14: Variación de masas en muestras de la prueba experimental final de tostación (Elaboración propia)..... | 46 |
| Figura 3.15: Concentración de elementos representativos de la prueba experimental final de tostación (Elaboración propia). | 47 |
| Figura 4.1: Análisis granulométrico del material de mineral sulfurado de cobre (Lobos Salinas, 2019). | 49 |
| Figura 4.2: Cantidad de concentrado por tamaño de partícula (Elaboración propia). ... | 51 |
| Figura 4.3: Concentración de cada elemento por tamaño de partícula (Elaboración propia)..... | 52 |
| Figura 4.4: Eliminación de masa y azufre de la muestra del proceso experimental previo de tostación en fase inicial (Elaboración propia). | 54 |
| Figura 4.5: Eliminación de masa y azufre de la muestra del proceso experimental previo de tostación en fase final (Elaboración propia)..... | 54 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.6: Variación de masas en muestras de la prueba de tostación en partículas muy pequeñas (Elaboración propia)..... | 56 |
| Figura 4.7: Concentración de elementos representativos de la prueba de tostación en partículas muy pequeñas (Elaboración propia). | 57 |
| Figura 4.8: Variación de masas en muestras de la prueba de tostación en partículas intermedias (Elaboración propia)..... | 58 |
| Figura 4.9: Concentración de elementos representativos de la prueba de tostación en partículas intermedias (Elaboración propia). | 59 |
| Figura 4.10: Variación de masas en muestras de la prueba de tostación en partículas muy grandes (Elaboración propia). | 60 |
| Figura 4.11: Concentración de elementos representativos de la prueba de tostación en partículas muy grandes (Elaboración propia). | 61 |
| Figura 4.12: Comportamiento del contenido de azufre a distintas temperaturas y tamaños de partículas (Elaboración propia)..... | 62 |
| Figura 4.13: Ecuaciones de las velocidades de reacción en función de la temperatura por tamaños de partículas (Elaboración propia)..... | 64 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 3.1: Reactivos específicos para pruebas de flotación (Elaboración propia)..... | 35 |
| Tabla 3.2: Condiciones para flotación Rougher (Elaboración propia)..... | 40 |
| Tabla 3.3: Condiciones para flotación Cleaner (Elaboración propia)..... | 42 |
| Tabla 3.4: Tamaños de partículas para pruebas de tostación (Elaboración propia)..... | 42 |
| Tabla 3.5: Temperaturas para pruebas de tostación (Elaboración propia)..... | 48 |
| Tabla 4.1: Concentración de cada elemento por tamaño de partícula (Elaboración propia)..... | 51 |
| Tabla 4.2: Balance estequiométrico de la reacción 4.4 (Elaboración propia)..... | 66 |
| Tabla 4.3: Balance estequiométrico de la reacción 4.5 (Elaboración propia)..... | 66 |
| Tabla 4.4: Balance estequiométrico de la reacción 4.6 (Elaboración propia)..... | 67 |
| Tabla 8.1: Datos del comportamiento del azufre para las distintas granulometrías y temperaturas (Elaboración propia)..... | 75 |