

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Contexto . . . . .	1
1.2. Descripción del problema . . . . .	2
1.3. Objetivos . . . . .	2
1.3.1. Objetivo general . . . . .	2
1.3.2. Objetivos específicos . . . . .	3
1.4. Alcances . . . . .	3
<b>2. Revisión Bibliográfica</b>	<b>4</b>
2.1. Proceso de conversión de cobre . . . . .	4
2.1.1. Aspectos termodinámicos del proceso . . . . .	9
2.2. Comportamiento de elementos menores en el proceso . . . . .	9
2.2.1. Coeficiente de distribución para procesamiento de cobre primario . . . . .	13
2.2.2. Coeficiente de distribución para procesamiento de cobre secundario . . . . .	14
2.3. Convertidor Peirce-Smith . . . . .	14
2.4. Chatarra electrónica y su reciclaje en Chile . . . . .	16
2.4.1. Minería urbana . . . . .	16
2.4.2. Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos y residuos electrónicos . . . . .	17
2.4.3. Ley 20.920 de Reciclaje . . . . .	17
2.4.4. Chilenter . . . . .	19
2.4.5. Placas de Circuito Impreso . . . . .	19
2.5. Tratamiento pirometalúrgico de RAEE y PCB . . . . .	23
2.5.1. Casos a escala industrial . . . . .	23
2.5.2. Casos a escala de laboratorio . . . . .	26
2.6. Técnicas de análisis . . . . .	27
2.6.1. Microscopía óptica . . . . .	27
2.6.2. XRF . . . . .	27
2.6.3. XRD . . . . .	28
2.6.4. ICP-MS . . . . .	29
<b>3. Metodología</b>	<b>30</b>
3.1. Procedimiento . . . . .	30
3.1.1. Experimento 1: Formación y caracterización de botón metálico . . . . .	31
3.1.2. Experimento 2: Pruebas de equilibrio y dopaje de chatarra . . . . .	32
3.2. Instrumentos y equipos . . . . .	33
3.2.1. Horno de laboratorio . . . . .	33

3.2.2. Equipos de muestreo y análisis . . . . .	34
3.3. Selección de elementos de interés . . . . .	38
<b>4. Resultados</b>	<b>40</b>
4.1. Experimento 1: Formación y caracterización de botón metálico . . . . .	40
4.1.1. Pretratamiento de placas de circuito impreso . . . . .	40
4.1.2. Fusión de chatarra de placas de circuito impreso . . . . .	41
4.1.3. Caracterización de botón metálico . . . . .	43
4.1.4. Porcentaje de metal en la muestra . . . . .	44
4.1.5. Fluorescencia de Rayos X . . . . .	44
4.1.6. Análisis microscópico . . . . .	45
4.2. Experimento 2: Pruebas de equilibrio y dopaje de chatarra . . . . .	47
4.2.1. Caracterización de escoria y metal blanco . . . . .	47
4.2.2. Diseño del experimento . . . . .	53
4.2.3. Prueba 1: Caso Base . . . . .	55
4.2.4. Prueba 2: Enriquecimiento de 5 % . . . . .	60
4.2.5. Prueba 3: Enriquecimiento de 10 % . . . . .	67
4.2.6. Prueba 4: Enriquecimiento de 15 % . . . . .	74
4.2.7. Análisis elemental por ICP y corrección de valores de XRF . . . . .	82
<b>5. Análisis de Resultados</b>	<b>88</b>
5.1. Caracterización de chatarra PCB . . . . .	88
5.2. Escorias y matas recibidas y formadas . . . . .	89
5.3. Comportamiento de elementos de interés . . . . .	90
5.3.1. Cobre, azufre, hierro, silicio, aluminio . . . . .	91
5.3.2. Plata, oro, paladio, platino . . . . .	97
5.3.3. Arsénico, antimonio, plomo . . . . .	99
5.3.4. Consideraciones con el dopaje de chatarra . . . . .	103
<b>6. Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>105</b>
6.1. Principales hallazgos . . . . .	105
6.2. Trabajo futuro . . . . .	107
<b>Bibliografía</b>	<b>109</b>
<b>A. Fotografías de las placas de circuito impreso seleccionadas</b>	<b>115</b>
<b>B. Resultados de análisis XRF para todas las muestras</b>	<b>119</b>
<b>C. Microfotografías</b>	<b>128</b>
<b>D. Resultados de ICP para matas y escorias</b>	<b>139</b>

# Índice de Tablas

2.1. Distribución de impurezas en Convertidor Peirce-Smith. . . . .	16
2.2. Contenido de metales de placas de circuito impreso, por distintas fuentes. . .	23
3.1. Especificaciones de la pistola de XRF Delta premium. . . . .	36
3.2. Especificaciones de difractómetros de sobremesa Rigaku Miniflex. . . . .	37
4.1. Número de placas recibidas y masa asociada. . . . .	41
4.2. Placas elegidas como muestra y su masa luego de retirar elementos de Al y Fe.	41
4.3. Composición elemental del botón metálico formado en el Experimento 1. . .	45
4.4. Composición elemental de la escoria utilizada en los experimentos 2. . . . .	48
4.5. Resultados de XRD de la escoria alimentada a los experimentos 2. . . . .	50
4.6. Composición elemental de la mata de cobre utilizada en los experimentos 2. .	51
4.7. Resultados de XRD de la mata de cobre alimentada a los experimentos 2. . .	53
4.8. Cantidad base alimentada a las pruebas de equilibrio termodinámico. . . . .	55
4.9. Dimensiones de crisoles de alúmina utilizados para las pruebas de equilibrio.	55
4.10. Resultados XRF para mata y escoria de la prueba 1. . . . .	57
4.11. Resultados de XRD para la escoria generada en la prueba 1. . . . .	60
4.12. Resultados de XRD para la mata de cobre generada en la prueba 1. . . . .	60
4.13. Resultados XRF para mata, escoria y botón de la prueba 2. . . . .	62
4.14. Resultados de XRD para la escoria generada en la prueba 2. . . . .	66
4.15. Resultados de XRD para la mata de cobre generada en la prueba 2. . . . .	67
4.16. Resultados XRF para mata, escoria y botón de la prueba 3. . . . .	69
4.17. Resultados de XRD para la escoria generada en la prueba 3. . . . .	73
4.18. Resultados de XRD para la mata de cobre generada en la prueba 3. . . . .	74
4.19. Resultados XRF para mata, escoria y botón de la prueba 4. . . . .	76
4.20. Resultados de XRD para la escoria generada en la prueba 4. . . . .	81
4.21. Resultados de XRD para la mata de cobre generada en la prueba 4. . . . .	81
4.22. Matriz de validación para cobre y metales preciosos. . . . .	83
4.23. Matriz de validación para metales base. . . . .	84
4.24. Matriz de validación para metales base (continuación). . . . .	85
4.25. Concentraciones corregidas de elementos de interés para todas las fases . . .	86
4.26. Concentraciones corregidas de elementos de interés para todas las fases (con- tinuación). . . . .	86
5.1. Concentración de elementos de interés en la chatarra estudiada. . . . .	88
B.1. Resultados de análisis XRF para todos los materiales estudiados. . . . .	120

B.2. Resultados de análisis XRF para todos los materiales estudiados (continuación).	121
B.3. Resultados de análisis XRF para todos los materiales estudiados (continuación).	122
B.4. Resultados de análisis XRF para todos los materiales estudiados (continuación).	123
B.5. Resultados de análisis XRF para todos los materiales estudiados (continuación).	124
B.6. Resultados de análisis XRF para todos los materiales estudiados (continuación).	125
B.7. Resultados de análisis XRF para todos los materiales estudiados (continuación).	126
B.8. Resultados de análisis XRF para todos los materiales estudiados (continuación).	127
D.1. Resultados ICP para matas de experimentos 1 y 2. . . . .	140
D.2. Resultados ICP para escorias de experimentos 1 y 2. . . . .	140

# Índice de Ilustraciones

2.1.	Diagrama de Ellingham para oxidación a distintas temperaturas. . . . .	5
2.2.	Diagrama de fases del sistema FeO- SiO <sub>2</sub> . . . . .	6
2.3.	Diagrama de fases del sistema FeOx-CaO-SiO <sub>2</sub> a 1250°C. . . . .	6
2.4.	Diagrama de fases del sistema Cu-S a 1200°C. . . . .	8
2.5.	Diagrama de fases del sistema Cu-Fe-S a 1250°C. . . . .	8
2.6.	Distribución de cobre entre la escoria y la mata. . . . .	9
2.7.	Convertidor Peirce-Smith de Fundición Chagres en operación. . . . .	15
2.8.	Diagrama esquemático de Convertidor Peirce-Smith, vistas de perfil. . . . .	15
2.9.	Posiciones del Convertidor Peirce Smith mientras carga mata, sopla y descarga. . . . .	15
2.10.	Pirámide de jerarquía de residuos. . . . .	18
2.11.	Placa de circuito impreso <i>single-sided</i> . . . . .	20
2.12.	Placas de circuito impreso <i>double-sided</i> : (i) sin PTH. (ii) con PTH. . . . .	21
2.13.	Placa de circuito impreso <i>multi-layer</i> con 4 capas. . . . .	21
2.14.	Flowsheet de la planta Hoboken, de Umicore. . . . .	25
2.15.	Flowsheet de la planta Rönnskar, de Boliden. . . . .	26
2.16.	Microscopio óptico y sus partes. . . . .	28
3.1.	Procedimiento secuencial de la investigación. . . . .	30
3.2.	Horno de laboratorio a utilizar en las pruebas de equilibrio. . . . .	33
3.3.	Cortador rotatorio. . . . .	34
3.4.	Pulverizador de bolas Fritsch Pulverisette 6. . . . .	35
3.5.	Microscopio polarizante Nikon Labophot2-Pol. . . . .	38
4.1.	Placas de circuito impreso de la muestra una vez reducidas de tamaño. . . . .	42
4.2.	Elementos cerámicos sin fundir. . . . .	43
4.3.	Botón metálico formado después de la segunda fusión. . . . .	44
4.4.	Microfotografía 1 del botón metálico formado en el experimento 1. . . . .	46
4.5.	Microfotografía 2 del botón metálico formado en el experimento 1. . . . .	46
4.6.	Microfotografía 3 del botón metálico formado en el experimento 1. . . . .	47
4.7.	Microfotografía 1 de la escoria alimentada al experimento 2. . . . .	49
4.8.	Microfotografía 2 de la escoria alimentada al experimento 2. . . . .	49
4.9.	Microfotografía 1 de la mata alimentada al experimento 2. . . . .	52
4.10.	Microfotografía 2 de la mata alimentada al experimento 2. . . . .	52
4.11.	Microfotografía 3 de la mata alimentada al experimento 2. . . . .	53
4.12.	Muestra de fases de escoria (derecha) y metal blanco (izquierda) de la prueba 1. . . . .	56
4.13.	Microfotografía 1 del metal blanco formado en la prueba 1 del experimento 2. . . . .	57

4.14. Microfotografía 2 del metal blanco formado en la prueba 1 del experimento 2.	58
4.15. Microfotografía 1 de la escoria formada en la prueba 1 del experimento 2. . .	59
4.16. Microfotografía 2 de la escoria formada en la prueba 1 del experimento 2. . .	59
4.17. Muestra de metal blanco con botón formado, pertenecientes a la prueba 2. .	61
4.18. Microfotografía 1 del metal blanco formado en la prueba 2 del experimento 2.	63
4.19. Microfotografía 2 del metal blanco formado en la prueba 2 del experimento 2.	63
4.20. Microfotografía 1 de la escoria formada en la prueba 2 del experimento 2. . .	64
4.21. Microfotografía 2 de la escoria formada en la prueba 2 del experimento 2. . .	65
4.22. Microfotografía 1 del botón metálico formado en la prueba 2 del experimento 2.	65
4.23. Microfotografía 2 del botón metálico formado en la prueba 2 del experimento 2.	66
4.24. Muestra de metal blanco con botón metálico formados en la prueba 3. . . . .	68
4.25. Microfotografía 1 del metal blanco formado en la prueba 3 del experimento 2.	69
4.26. Microfotografía 2 del metal blanco formado en la prueba 3 del experimento 2.	70
4.27. Microfotografía 1 de la escoria formada en la prueba 3 del experimento 2. . .	70
4.28. Microfotografía 2 de la escoria formada en la prueba 3 del experimento 2. . .	71
4.29. Microfotografía 3 de la escoria formada en la prueba 3 del experimento 2. . .	72
4.30. Microfotografía 1 del botón metálico formado en la prueba 3 del experimento 2.	72
4.31. Microfotografía 2 del botón metálico formado en la prueba 3 del experimento 2.	73
4.32. Fase de metal blanco junto a botón metálico formados en la prueba 4. . . . .	75
4.33. Microfotografía 1 del metal blanco formado en la prueba 4 del experimento 2.	76
4.34. Microfotografía 2 del metal blanco formado en la prueba 4 del experimento 2.	77
4.35. Microfotografía 3 del metal blanco formado en la prueba 4 del experimento 2.	78
4.36. Microfotografía 1 de la escoria formada en la prueba 4 del experimento 2. . .	78
4.37. Microfotografía 2 de la escoria formada en la prueba 4 del experimento 2. . .	79
4.38. Microfotografía 3 de la escoria formada en la prueba 4 del experimento 2. . .	79
4.39. Microfotografía 1 del botón metálico formado en la prueba 4 del experimento 2.	80
4.40. Microfotografía 2 del botón metálico formado en la prueba 4 del experimento 2.	80
A.1. Fotografía de placa número 1. . . . .	115
A.2. Fotografía de placa número 4. . . . .	115
A.3. Fotografía de placa número 7. . . . .	116
A.4. Fotografía de placa número 8. . . . .	116
A.5. Fotografía de placa número 9. . . . .	116
A.6. Fotografía de placa número 10. . . . .	117
A.7. Fotografía de placa número 12. . . . .	117
A.8. Fotografía de placa número 19. . . . .	118
C.1. Microfotografía 4 del botón metálico formado en el experimento 1. . . . .	129
C.2. Microfotografía 3 del botón metálico formado en la prueba 2 del experimento 2.	129
C.3. Microfotografía 3 del botón metálico formado en la prueba 3 del experimento 2.	130
C.4. Microfotografía 4 del botón metálico formado en la prueba 3 del experimento 2.	130
C.5. Microfotografía 3 del botón metálico formado en la prueba 4 del experimento 2.	131
C.6. Microfotografía 4 del botón metálico formado en la prueba 4 del experimento 2.	131
C.7. Microfotografía 3 de la escoria alimentada al experimento 2. . . . .	132
C.8. Microfotografía 3 de la escoria formada en la prueba 1 del experimento 2. . .	132
C.9. Microfotografía 4 de la escoria formada en la prueba 1 del experimento 2. . .	133
C.10. Microfotografía 3 de la escoria formada en la prueba 2 del experimento 2. . .	133

C.11.	Microfotografía 4 de la escoria formada en la prueba 3 del experimento 2. . .	134
C.12.	Microfotografía 4 de la escoria formada en la prueba 4 del experimento 2. . .	134
C.13.	Microfotografía 4 de la mata alimentada al experimento 2. . . . .	135
C.14.	Microfotografía 5 de la mata alimentada al experimento 2. . . . .	135
C.15.	Microfotografía 3 del metal blanco formado en la prueba 1 del experimento 2.	136
C.16.	Microfotografía 3 del metal blanco formado en la prueba 2 del experimento 2.	136
C.17.	Microfotografía 3 del metal blanco formado en la prueba 3 del experimento 2.	137
C.18.	Microfotografía 4 del metal blanco formado en la prueba 4 del experimento 2.	137
C.19.	Microfotografía 5 del metal blanco formado en la prueba 4 del experimento 2.	138
C.20.	Microfotografía 6 del metal blanco formado en la prueba 4 del experimento 2.	138