

Tabla de contenido

1.	Introducción	1
1.1.	Presentación del tema	1
1.2.	Objetivos.....	2
1.2.1.	Objetivo general	2
1.2.2.	Objetivos específicos	2
1.3.	Propuesta de modelo geometalúrgico	3
2.	Alcances.....	4
3.	Estado del arte.....	5
3.1.	Procesos de conminución.....	5
3.1.1.	Teoría de conminución	5
3.1.2.	Mecanismos de ruptura	6
3.1.3.	Molienda de minerales.....	7
3.2.	Influencia de la mineralogía en el consumo de medios de molienda	33
3.3.	Variables a estudiar.....	35
3.3.1.	Tiempo de molienda.....	36
3.3.2.	Mineralogía.....	36
3.3.3.	Variables operacionales	36
3.4.	Caracterización mineralógica avanzada.....	37
3.4.1.	Caracterización hiperespectral	37
3.4.2.	Difracción de rayos X	39
3.4.3.	Fluorescencia de rayos X	46
4.	Metodología experimental.....	49
4.1.	Equipos utilizados.....	49
4.1.1.	Difractómetro de rayos X Rigaku MiniFlex 600	49

4.1.2.	Olympus Innov – x Delta Premium para pXRF	49
4.1.3.	Otros equipos	50
4.2.	Preparación del mineral de alimentación.....	50
4.2.1.	Origen de las muestras.....	50
4.2.2.	Preparación granulométrica.....	52
4.2.3.	Caracterización mineralógica y elemental	52
4.2.4.	Determinación de la dureza del mineral	53
4.3.	Protocolo experimental	53
4.3.1.	Pruebas experimentales de molienda	53
4.3.2.	Caracterización de productos de molienda	55
4.4.	Tratamiento de la información	55
4.5.	Validación de resultados	55
4.5.1.	Validación cruzada.....	56
4.5.2.	Herramienta de selección de modelos	56
4.5.3.	Estadísticos para validación	57
4.5.4.	Validación experimental	57
4.6.	Resumen de la metodología experimental	58
5.	Resultados.....	59
5.1.	Caracterización mineralógica, elemental y textural.....	59
5.1.1.	Caracterización hiperespectral	59
5.1.2.	Difracción de rayos X	61
5.1.3.	Fluorescencia de rayos X	63
5.1.4.	QA/QC XRD	64
5.2.	Análisis de dureza: Test de Bond	65
5.2.1.	Granulometría alimentación	65

5.2.2.	Resultados Test de Bond.....	66
5.2.3.	Granulometría producto.....	68
5.2.4.	Work Index.....	68
5.3.	Cinéticas de molienda.....	69
5.3.1.	Variación granulométrica.....	69
5.3.2.	Consumo de acero.....	70
5.3.3.	Contenido de hierro.....	71
5.3.4.	Caracterización de productos de molienda.....	73
6.	Propuesta de modelo geometalúrgico predictivo.....	76
6.1.	Modelos finales.....	76
6.2.	Validación cruzada.....	77
6.3.	Coefficiente de determinación.....	80
6.4.	Criterio Bayesiano de Información y Criterio de Akaike Corregido.....	80
6.5.	Selección de modelo.....	80
6.6.	Validación experimental del modelo propuesto.....	80
6.7.	Análisis de sensibilidad.....	81
7.	Análisis y discusión.....	84
7.1.	Caracterización mineralógica y elemental.....	84
7.1.1.	Caracterización hiperespectral.....	84
7.1.2.	Difracción de rayos X.....	85
7.1.3.	Fluorescencia de rayos X y validación de resultados.....	86
7.2.	Análisis de dureza.....	87
7.2.1.	Granulometría de alimentación y producto.....	87
7.2.2.	Influencia de la mineralogía en la dureza.....	88
7.3.	Cinéticas de molienda.....	90

7.3.1.	Granulometría de productos	90
7.3.2.	Consumo de acero.....	92
7.3.3.	Contenido de hierro en los productos de molienda	101
7.3.4.	Caracterización de productos de molienda	101
7.4.	Propuesta de modelo geometalúrgico	102
7.4.2.	Análisis de sensibilidad.....	106
7.4.3.	Aplicabilidad de resultados	107
7.4.4.	Oportunidades de mejora	108
7.5.	Fuentes de error	109
8.	Conclusiones.....	111
9.	Recomendaciones para investigaciones futuras.....	113
10.	Bibliografía	114
Anexo A: Protocolos experimentales		121
A.1.	Protocolo de caracterización hiperespectral	121
A.2.	QA/QC para caracterización hiperespectral.....	121
A.2.1.	Transición entre las regiones VNIR y SWIR.....	121
A.2.2.	QA/QC en rango SWIR.....	121
A.2.3.	QA/QC en rango TIR.....	122
A.2.4.	QA/QC en rango VNIR	122
A.3.	Protocolo de difracción de rayos X.....	122
A.4.	Protocolo de fluorescencia de rayos X	123
A.5.	Test de Bond	123
Anexo B: Complemento de resultados.....		125
B.1.	Caracterización mineralógica y elemental	125
B.1.1.	Mineral A	125

B.1.2. Mineral B.....	126
B.1.3. Mineral C.....	128
B.2. Análisis de dureza: Test de Bond.....	130
B.2.1. Mineral A.....	130
B.2.2. Mineral B.....	132
B.2.3. Mineral C.....	133
B.3. Cinéticas de molienda.....	135
B.3.1. Mineral A.....	135
B.3.2. Mineral B.....	141
B.3.3. Mineral C.....	148
Anexo C: Ajuste de modelos matemáticos.....	154
C.1. Significancia de variables.....	154
C.2. Validación cruzada.....	155
Anexo D: Trabajos presentados en congresos y revistas.....	160
D.1. Conference of Metallurgists 2017.....	160
D.2. International Journal of Mineral Processing/Minerals Engineering (Pending submit).....	161

Índice de tablas

Tabla 3.1. El efecto del diseño y operación en el desempeño de la molienda. (Lynch, 2015)	10
Tabla 3.2. Grado de llenado de molinos con medios de molienda. (COCHILCO, 2015)..	13
Tabla 3.3. Tamaño de medios de molienda por tipo de molino. (COCHILCO, 2015).	13
Tabla 3.4. Condiciones químicas en distintos flujos de una planta concentradora. (Levay, 2001).	16
Tabla 3.5. Diferencias de potencial de minerales sulfurados a pH neutro. (Gu, 2004). ..	18
Tabla 3.6. Composición de medios de molienda de acero forjado.	27
Tabla 3.7. Rangos espectrales para espectroscopía de minerales.	38
Tabla 4.1. Serie de tamices ASTM para caracterización granulométrica.	52
Tabla 4.2. Condiciones operacionales para las pruebas de molienda.	53
Tabla 4.3. Serie de tamices ASTM para caracterización granulométrica en molienda. ...	55
Tabla 5.1. Composición mineralógica Mineral A mediante difracción de rayos X.	61
Tabla 5.2. Composición mineralógica Mineral B mediante difracción de rayos X.	62
Tabla 5.3. Parámetros estadísticos de validación de la cuantificación mineralógica mediante XRD.	62
Tabla 5.4. Composición mineralógica Mineral C mediante difracción de rayos X.	63
Tabla 5.5. Composición elemental mediante fluorescencia de rayos X.	64
Tabla 5.6. Minerales y elementos seleccionados para validación de XRD mediante XRF.	65
Tabla 5.7. Parámetros granulométricos alimentación.	66
Tabla 5.8. Parámetros iniciales Test de Bond, Mineral A.	67
Tabla 5.9. Resultados Test de Bond, Mineral A.	67
Tabla 5.10. Resultados Test de Bond, Mineral B.	67
Tabla 5.11. Resultados Test de Bond, Mineral C.	68
Tabla 5.12. Parámetros granulométricos producto.	68

Tabla 5.13. Work index para los Minerales A, B y C.	68
Tabla 5.14. Contenido de hierro en cada producto de molienda en función del tiempo y del pH.....	72
Tabla 6.1. Errores de validación cruzada.....	78
Tabla 6.2. Criterio Bayesiano de Información.....	80
Tabla 6.3. Condiciones experimentales para validación experimental.....	81
Tabla 6.4. Validación experimental del modelo cuadrático.	81
Tabla 6.5. Valores estándar para análisis de sensibilidad.	82
Tabla 6.6. Análisis de sensibilidad del modelo geometalúrgico.	83
Tabla 7.1. Coeficiente de correlación entre BWi y grupos de minerales.	90
Tabla 7.2. Coeficiente de correlación entre BWi y algunos minerales.	90
Tabla 7.3. Ventajas y desventajas del modelo geometalúrgico propuesto.....	108
Tabla B.1. Detalle distribución granulométrica alimentación Test de Bond Mineral A.	131
Tabla B.2. Detalle ajuste Gaudin - Schuhmann alimentación Test de Bond Mineral A.	131
Tabla B.3. Detalle distribución granulométrica producto Test de Bond Mineral A.....	132
Tabla B.4. Detalle ajuste Gaudin - Schuhmann producto Test de Bond Mineral A.....	132
Tabla B.5. Detalle distribución granulométrica alimentación Test de Bond Mineral B.	132
Tabla B.6. Detalle ajuste Gaudin - Schuhmann alimentación Test de Bond Mineral B.	133
Tabla B.7. Detalle distribución granulométrica producto Test de Bond Mineral B.....	133
Tabla B.8. Detalle ajuste Gaudin - Schuhmann producto Test de Bond Mineral B.....	133
Tabla B.9. Detalle distribución granulométrica alimentación Test de Bond Mineral C.	134
Tabla B.10. Detalle ajuste Gaudin - Schuhmann alimentación Test de Bond Mineral C.	134
Tabla B.11. Detalle distribución granulométrica producto Test de Bond Mineral C.	135
Tabla B.12. Detalle ajuste Gaudin - Schuhmann producto Test de Bond Mineral C.	135
Tabla B.13. Consumo de acero en cinética de molienda, pH 7.5, Mineral A.	138

Tabla B.14. Consumo de acero en cinética de molienda, pH 12, Mineral A.	141
Tabla B.15. Consumo de acero en cinética de molienda, pH 7.5, Mineral B.	142
Tabla B.16. Consumo de acero en cinética de molienda, pH 12, Mineral B.	145
Tabla B.17. Consumo de acero en cinética de molienda, pH 7.5, Mineral C.	148
Tabla B.18. Consumo de acero en cinética de molienda, pH 12, Mineral C.	151
Tabla C.1. Significancia de variables en el modelo lineal.	154
Tabla C.2. Significancia de variables en el modelo cuadrático.	154
Tabla C.3. Significancia de variables en el modelo log – lineal.	154
Tabla C.4. Significancia de variables en el modelo log – cuadrático.	155
Tabla C.5. Validación cruzada modelo lineal.	156
Tabla C.6. Validación cruzada modelo cuadrático.	157
Tabla C.7. Validación cruzada modelo log – lineal.	158
Tabla C.8. Validación cruzada modelo log – cuadrático.	159

Índice de ilustraciones

Ilustración 3.1. Curva de reducción de tamaño de partículas (Hukki, 1961).	6
Ilustración 3.2. Mecanismos de ruptura de partículas. (Lynch, 2015).	6
Ilustración 3.3. Representación de la liberación mineral. (Lynch, 2015).....	8
Ilustración 3.4. Mecanismo de movimientos de medios de molienda. (Lynch, 2015).	9
Ilustración 3.5. Efecto de la concentración de sólidos en los productos de molienda y el CEE. (Kawatra, 2006).	11
Ilustración 3.6. Áreas de consumo (a, izda.) y Fuentes de abastecimiento (b, dcha.) de agua en Chile. (COCHILCO, 2016).	12
Ilustración 3.7. Oferta y demanda de bolas de molienda proyectada al 2025. (COCHILCO, 2015).	14
Ilustración 3.8. Efecto de la liberación en la recuperación en flotación. (Jameson, 2012).	15
Ilustración 3.9. Efecto del tamaño de partícula en la recuperación en flotación. (Yianatos, 2000).	15
Ilustración 3.10. Recuperación en flotación para la calcopirita (izda.) y piritita (dcha.) a distintos pH y colectores. (Göktepe, 2002).	19
Ilustración 3.11. Tasas de disolución predichas en función del pH para distintos minerales.	20
Ilustración 3.12. Evolución del oxígeno disuelto durante molienda. (Huang, 2006).....	21
Ilustración 3.13. Ejemplo de interacción electroquímica entre minerales sulfurados. (Gu, 2004).	22
Ilustración 3.14. Ejemplo de interacción electroquímica entre minerales sulfurados y los medios de molienda. (Gu, 2004).	23
Ilustración 3.15. Evolución del potencial de pulpa durante molienda. (Huang, 2006). ..	23
Ilustración 3.16. Relación entre el E_h y el oxígeno disuelto en función del desgaste de los medios de molienda. (Greet, 2008).	24
Ilustración 3.17. Recuperación y E_h en flotación para la calcopirita (izda.) y piritita (dcha.) a distintos pH. (Göktepe, 2002).	25
Ilustración 3.18. Materiales usados para medios de molienda. (Aldrich, 2013).	26

Ilustración 3.19. Mecanismos de consumo de medios de molienda. (Radziszewski, 2002).	28
Ilustración 3.20. Modelos de corrosión: celda local de abrasión (izda. (a)) e interacción galvánica (dcha. (b)). (Aldrich, 2013).	28
Ilustración 3.21. Distribución de zonas de alteración en un pórfido cuprífero. (Lowell & Gilbert, 1970).	34
Ilustración 3.22. Esquema general de pórfido indicando las zonas de mena. (Lowell & Gilbert, 1970).	35
Ilustración 3.23. Esquema de alteraciones de un depósito tipo pórfido. (Sillitoe, 2010). 35	
Ilustración 3.24. Espectro de reflectancia de la illita: (a) alto grado de cristalinidad, (b) cristalinidad intermedia y (c) baja cristalinidad. ($\nu+\delta$: estiramiento y torsión de grupos OH ⁻).	38
Ilustración 3.25. Curvas espectrales típicas en los distintos rangos de espectrometría de minerales.	38
Ilustración 3.26. Principales componentes del Hylogger3 TM	39
Ilustración 3.27. Arreglo típico de un difractómetro de rayos X.	41
Ilustración 3.28. Espectro de difracción de rayos X del aluminio.	42
Ilustración 3.29. Espectro de fluorescencia de rayos X del oro y del tungsteno. (Gazley, 2014).	47
Ilustración 3.30. Espectrómetro de fluorescencia de rayos X portable. (Gazley, 2014). .	47
Ilustración 3.31. Efecto del tamaño de grano en pXRF. (Gazley, 2014).	48
Ilustración 4.1. Difractómetro de rayos X Rigaku MiniFlex 600.	49
Ilustración 4.2. Equipo Olympus Innov - x Delta Premium para pXRF.	50
Ilustración 4.3. Resumen de la metodología experimental.	58
Ilustración 5.1. Resumen de la caracterización hiperespectral del Mineral A.	59
Ilustración 5.2. Resumen de la caracterización hiperespectral del Mineral B.	60
Ilustración 5.3. Resumen de la caracterización hiperespectral del Mineral C.	60
Ilustración 5.4. Validación de la cuantificación de XRD utilizando XRF.	65
Ilustración 5.5. Distribución granulométrica alimentación Test de Bond.	66

Ilustración 5.6. Distribución granulométrica producto Test de Bond.	69
Ilustración 5.7. Variación del P80 en función del tiempo y del pH.	70
Ilustración 5.8. Variación del consumo de acero en función del tiempo y del pH.	71
Ilustración 5.9. Diferencia en el contenido de hierro entre productos de molienda y mineral de alimentación.	72
Ilustración 5.10. Contenido de hierro en productos de molienda en función del tiempo y del pH.	73
Ilustración 5.11. Difractograma Mineral A y productos de molienda.	74
Ilustración 5.12. Difractograma Mineral B y productos de molienda.	74
Ilustración 5.13. Difractograma Mineral C y productos de molienda.	75
Ilustración 6.1. Comparación de valores experimentales y estimados con el modelo lineal.	77
Ilustración 6.2. Comparación de valores experimentales y estimados con el modelo cuadrático.	78
Ilustración 6.3. Comparación de valores experimentales y estimados con el modelo log – lineal.	79
Ilustración 6.4. Comparación de valores experimentales y estimados con el modelo log – cuadrático.	79
Ilustración 6.5. Validación experimental del modelo geometalúrgico propuesto.	81
Ilustración 7.1. Diagrama de Pourbaix del hierro. (David, 2000).	95
Ilustración 7.2. Imágenes SEM de la superficie del acero sin pasivación (superior) y pasivada por óxidos (inferior). (Cáceres, 2009).	95
Ilustración 7.3. Resultados XPS para la formación de óxidos pasivantes. (Kocijan, 2007).	96
Ilustración 7.4. Box plot de errores del modelo geometalúrgico por tipo de mineral. ...	104
Ilustración 7.5. Histograma de errores del modelo geometalúrgico por tipo de mineral.	105
Ilustración B.1.1. QA/QC para la medición hiperespectral del Mineral A.	125
Ilustración B.1.2. Difractograma y refinamiento Mineral A.	126
Ilustración B.1.3. QA/QC para la medición hiperespectral del Mineral B.	127

Ilustración B.1.4. Difractograma y refinamiento Mineral B.....	128
Ilustración B.1.5. QA/QC para la medición hiperespectral del Mineral C.....	129
Ilustración B.1.6. Difractograma y refinamiento Mineral C.....	130
Ilustración B.1.7. Distribuciones granulométricas cinética de molienda Mineral A, pH 7.5.	136
Ilustración B.1.8. Distribución granulométrica molienda 2 minutos Mineral A, pH 7.5.	136
Ilustración B.1.9. Distribución granulométrica molienda 2 minutos Mineral A, pH 7.5.	137
Ilustración B.1.10. Distribución granulométrica molienda 8 minutos Mineral A, pH 7.5.	137
Ilustración B.1.11. Distribución granulométrica molienda 16 minutos Mineral A, pH 7.5.	138
Ilustración B.1.12. Distribuciones granulométricas cinética de molienda Mineral A, pH 12.	139
Ilustración B.1.13. Distribución granulométrica molienda 2 minutos Mineral A, pH 12.	139
Ilustración B.1.14. Distribución granulométrica molienda 4 minutos Mineral A, pH 12.	140
Ilustración B.1.15. Distribución granulométrica molienda 8 minutos Mineral A, pH 12.	140
Ilustración B.1.16. Distribución granulométrica molienda 16 minutos Mineral A, pH 12.	141
Ilustración B.1.17. Distribuciones granulométricas cinética de molienda Mineral B, pH 7.5.	142
Ilustración B.1.18. Distribución granulométrica molienda 2 minutos Mineral B, pH 7.5.	143
Ilustración B.1.19. Distribución granulométrica molienda 4 minutos Mineral B, pH 7.5.	143
Ilustración B.1.20. Distribución granulométrica molienda 8 minutos Mineral B, pH 7.5.	144

Ilustración B.1.21. Distribución granulométrica molienda 16 minutos Mineral B, pH 7.5.	144
Ilustración B.1.22. Distribuciones granulométricas cinética de molienda Mineral B, pH 12.	145
Ilustración B.1.23. Distribución granulométrica molienda 2 minutos Mineral B, pH 12.	146
Ilustración B.1.24. Distribución granulométrica molienda 4 minutos Mineral B, pH 12.	146
Ilustración B.1.25. Distribución granulométrica molienda 8 minutos Mineral B, pH 12.	147
Ilustración B.1.26. Distribución granulométrica molienda 16 minutos Mineral B, pH 12.	147
Ilustración B.1.27. Distribuciones granulométricas cinética de molienda Mineral C, pH 7.5.	148
Ilustración B.1.28. Distribución granulométrica molienda 2 minutos Mineral C, pH 7.5.	149
Ilustración B.1.29. Distribución granulométrica molienda 4 minutos Mineral C, pH 7.5.	149
Ilustración B.1.30. Distribución granulométrica molienda 8 minutos Mineral C, pH 7.5.	150
Ilustración B.1.31. Distribución granulométrica molienda 16 minutos Mineral C, pH 7.5.	150
Ilustración B.1.32. Distribuciones granulométricas cinética de molienda Mineral C, pH 12.	151
Ilustración B.1.33. Distribución granulométrica molienda 2 minutos Mineral C, pH 12.	152
Ilustración B.1.34. Distribución granulométrica molienda 4 minutos Mineral C, pH 12.	152
Ilustración B.1.35. Distribución granulométrica molienda 8 minutos Mineral C, pH 12.	153
Ilustración B.1.36. Distribución granulométrica molienda 16 minutos Mineral C, pH 12.	153

Índice de ecuaciones

Ecuación 1.1. Ecuación objetivo de la tesis.....	3
Ecuación 3.1. Ecuación general de conminución (Lynch, 2015).....	5
Ecuación 3.2. Modelo de Von Rittinger (Von Rittinger, 1867).	5
Ecuación 3.3. Modelo de Friedrich Kick (Kick, 1885).....	5
Ecuación 3.4. Modelo de Fred Bond (Bond, 1952).	5
Ecuación 3.5. Mecanismo de adsorción electroquímica de colectores.	21
Ecuación 3.6. Reacción de reducción del oxígeno.	22
Ecuación 3.7. Reacción de oxidación del hierro.	22
Ecuación 3.8. Modelo de desgaste de medios de molienda. (Chen, 2006).	31
Ecuación 3.9. Tasa de desgaste. (Chen, 2006).	32
Ecuación 3.10. Modelo de desgaste de medios de molienda en base a parámetros electroquímicos. (Azizi, 2013).....	32
Ecuación 3.11. Modelo de desgaste de medios de molienda de acero con bajo carbono. (Azizi, 2013).....	32
Ecuación 3.12. Modelo de desgaste de medios de molienda de acero con cromo. (Azizi, 2013).....	32
Ecuación 3.13. Ley de Bragg.....	40
Ecuación 3.14. Intensidad de difracción de una fase en un policristal.	43
Ecuación 3.15. Intensidad de reflexión de la fase α en una mezcla de fases.	43
Ecuación 3.16. Función objetivo en el método de Rietveld.	44
Ecuación 3.17. Intensidad del peak calculada.	44
Ecuación 3.18. Factor de estructura.....	44
Ecuación 3.19. Residuo normalizado de los mínimos cuadrados.	45
Ecuación 3.20. Residuo estándar simple.	45
Ecuación 3.21. Fracción en peso para una fase p en una mezcla de n fases mediante refinamiento de Rietveld.	46

Ecuación 4.1. Consumo total de medios de molienda.	54
Ecuación 4.2. Error de validación mediante validación cruzada aleatoria.	56
Ecuación 4.3. Criterio Bayesiano de Información.	56
Ecuación 4.4. Varianza del error relativo.	57
Ecuación 4.5. Criterio de Akaike corregido de Información.	57
Ecuación 4.6. Ejemplo de modelo.	57
Ecuación 6.1. Modelo lineal para el consumo de acero.	76
Ecuación 6.2. Modelo polinomial de grado dos para el consumo de acero.	77
Ecuación 6.3. Modelo log – lineal para el consumo de acero.	77
Ecuación 6.4. Modelo log – cuadrático para el consumo de acero.	77
Ecuación 8.1. Modelo polinomial de grado dos para el consumo de acero.	112
Ecuación A.1. Work Index.	123
Ecuación A.2. Cálculo del Gbp.	124
Ecuación A.3. Cálculo del número de revoluciones.	124