

Tabla de Contenido

1.	Introducción.....	1
1.1.	Acero	1
1.1.1.	Proceso Productivo	1
1.1.1.1.	Conversión en Horno Básico de Oxígeno (BOF).....	2
1.1.1.2.	Conversión en Horno Eléctrico	3
1.1.2.	Fundición y Conformado.....	4
1.1.3.	Conformado y Acabado de Barras de Refuerzo	6
1.1.4.	Residuos de la Industria del Acero	7
1.2.	Cloruro Férrico	10
1.2.1.	Propiedades Físicas y Químicas	10
1.2.2.	Procesos Productivos.....	11
1.2.3.	Aplicaciones	13
1.3.	Descripción del Proyecto.....	14
1.4.	Objetivos.....	15
1.4.1.	Objetivo General.....	15
1.4.2.	Objetivos Específicos	15
1.5.	Alcances.....	16
2.	Marco Teórico	17
2.1.	Surfactantes	17
2.1.1.	Propiedades en Soluciones Acuosas.....	18
2.1.1.1.	Formación de Micelas y Concentración Crítica Micelar (CMC).....	18
2.1.1.1.1.	Forma y Tamaño de las Micelas	19
2.1.1.1.2.	Factores que Afectan la CMC.....	20
2.1.1.2.	Adsorción en Superficies Sólidas.....	22
2.1.1.2.1.	Mecanismo de Adsorción de Surfactante en Superficies Sólidas.....	22
2.1.1.2.2.	Influencia de la Superficie Sólida.....	23
2.1.1.2.3.	Influencia de la Estructura del Surfactante	24
2.1.1.3.	Estabilización de Coloides	25
2.1.1.4.	Solubilización.....	27
2.1.2.	Balance Hidrofílico-Lipofílico (HLB)	29
2.2.	Óxidos de Hierro	30
2.2.1.	Tipos y Propiedades Generales.....	30

2.2.2.	Formación en el Proceso del Acero	31
2.2.3.	Química de Superficie	34
2.2.4.	Disolución de Óxidos de Hierro	35
2.2.4.1.	Solubilidad de Óxidos de Hierro y Factores que la Modifican	35
2.2.4.2.	Mecanismo y Cinética de Disolución de Óxidos de Hierro	37
2.2.4.2.1.	Cinética de Disolución en Ácido Clorhídrico	39
3.	Metodología.....	42
3.1.	Caracterización de la Materia Prima	42
3.1.1.	Composición Química	42
3.1.2.	Composición Mineralógica	42
3.1.3.	Análisis Granulométrico.....	42
3.1.3.1.	Instrumentación.....	42
3.1.3.2.	Procedimiento Experimental.....	42
3.1.3.3.	Análisis de Datos.....	43
3.2.	Etapa de Eliminación de Aceites	43
3.2.1.	Contacto con Surfactantes	44
3.2.1.1.	Surfactantes Utilizados y Preparación de Soluciones	44
3.2.1.2.	Procedimiento Experimental.....	47
3.2.2.	Análisis de Líquido Residual.....	48
3.2.2.1.	Medición de Sólidos en Suspensión.....	48
3.2.2.1.1.	Instrumentación	48
3.2.2.1.2.	Método Analítico	48
3.2.2.1.3.	Procedimiento Experimental.....	49
3.2.2.2.	Medición de Turbidez	49
3.2.2.3.	Medición de Demanda Química de Oxígeno	49
3.2.2.3.1.	Reactivos e Instrumentación	49
3.2.2.3.2.	Método Analítico	50
3.2.2.3.3.	Procedimiento Experimental.....	50
3.2.3.	Análisis de Aceites y Grasas de los Sólidos.....	50
3.2.3.1.	Reactivos e Instrumentación	50
3.2.3.2.	Método Analítico.....	51
3.2.3.3.	Procedimiento Experimental.....	51
3.3.	Etapa de Disolución.....	52
3.3.1.	Reactivos e Instrumentación.....	53

3.3.2.	Dosificación de Reactivos	53
3.3.3.	Procedimiento Experimental	54
3.3.4.	Medición de Hierro con o-Fenantrolina	55
3.3.4.1.	Reactivos y Soluciones.....	55
3.3.4.2.	Instrumentación.....	55
3.3.4.3.	Método Analítico.....	56
3.3.4.4.	Curva de Calibración.....	58
3.3.4.5.	Procedimiento Experimental	59
3.3.5.	Medición de Hierro por Titulación con Dicromato de Potasio	61
3.3.5.1.	Reactivos y Soluciones.....	61
3.3.5.2.	Instrumentación.....	61
3.3.5.3.	Método Analítico.....	62
3.3.5.4.	Procedimiento Experimental	63
3.3.5.4.1.	Hierro Ferroso	63
3.3.5.4.2.	Hierro Total.....	64
3.3.6.	Medición de Acidez Libre	66
3.3.6.1.	Reactivos y Soluciones.....	66
3.3.6.2.	Instrumentación.....	67
3.3.6.3.	Método Analítico.....	67
3.3.6.4.	Procedimiento Experimental	70
3.3.7.	Medición de Materia Insoluble.....	71
3.3.8.	Análisis de Datos	71
3.3.8.1.	Experimentos Isotérmicos	71
3.3.8.2.	Experimentos No-Isotérmicos.....	74
3.3.8.3.	Indicadores Estadísticos	74
4.	Resultados y Discusión.....	76
4.1.	Caracterización de la Materia Prima	76
4.1.1.	Análisis Elemental.....	76
4.1.2.	Análisis Mineralógico	77
4.1.3.	Análisis Granulométrico.....	77
4.1.4.	Aceites y Grasas en la Materia Prima.....	79
4.1.4.1.	Inspección de la Superficie	79
4.1.4.2.	Mediciones por Extractor Soxhlet.....	82
4.1.5.	Discusión Parcial	82

4.2.	Etapa de Eliminación de Aceites	83
4.2.1.	pH	83
4.2.1.1.	Variación de Concentración de Surfactante	84
4.2.1.2.	Variación de Tiempo de Contacto.....	84
4.2.1.3.	Variación del Tipo de Surfactante.....	85
4.2.1.4.	Discusión Parcial de Resultados	86
4.2.2.	Sólidos en Suspensión y Turbidez.....	87
4.2.2.1.	Variación de la Concentración de Surfactante	87
4.2.2.2.	Variación del Tiempo de Contacto.....	89
4.2.2.3.	Variación del Tipo de Surfactante.....	90
4.2.2.4.	Discusión Parcial de Resultados	93
4.2.3.	Demanda Química de Oxígeno.....	94
4.3.4.1.	Variación de la Concentración de Surfactante	95
4.3.4.2.	Variación del Tiempo de Contacto.....	96
4.3.4.3.	Variación del Tipo de Surfactante.....	97
4.3.4.4.	Discusión Parcial de Resultados	97
4.2.4.	Aceites y Grasas	98
4.2.4.1.	Variación de la Concentración de Surfactante	98
4.2.4.2.	Variación del Tiempo de Contacto.....	101
4.2.4.3.	Variación del Tipo de Surfactante.....	103
4.2.4.4.	Discusión Parcial de Resultados	106
4.2.5.	Discusión Parcial	107
4.3.	Etapa de Disolución.....	110
4.3.1.	Experimentos Isotérmicos	110
4.3.1.1.	Variación del Tamaño de Partícula	110
4.3.1.2.	Variación de la Velocidad de Agitación	111
4.3.1.3.	Variación de la Temperatura	113
4.3.1.3.1.	Obtención de Parámetros Cinéticos y Elección de Modelos	116
4.3.1.3.2.	Ajuste de Parámetros Cinéticos con respecto a la Temperatura	116
4.3.2.	Experimentos No-Isotérmicos	120
4.3.2.1.	Cinética de Experimentos No Isotérmicos	120
4.3.2.2.	Formación de Precipitado.....	123
4.3.3.	Caracterización del Producto Líquido	123
4.3.4.	Discusión Parcial	127

5.	Discusión General y Recomendaciones	130
6.	Conclusiones.....	134
7.	Bibliografía.....	135
8.	Anexos.....	143
8.1.	Cálculo de Número HLB.....	143
8.2.	Cálculo de Parámetro de Empaquetamiento.....	145
8.3.	Balance de Masa en Experimentos de Disolución	147
8.4.	Interpolación de Datos de Hierro Total	148
8.5.	Análisis Elemental de la Materia Prima	150
7.6.	Análisis Granulométrico de la Materia Prima	151
7.7.	Resultados de pH en la Etapa de Eliminación de Aceites y Grasas	157
7.7.1.	Variación de la Concentración de Surfactante	157
7.7.1.1.	Ammonyx LO®	157
7.7.1.2.	Lauril Éter Sulfato de Sodio.....	159
7.7.1.3.	Nonil Fenol 10M.....	161
7.7.2.	Variación del Tiempo de Contacto.....	162
7.7.2.1.	Ammonyx LO®	162
7.7.2.2.	Lauril Éter Sulfato de Sodio.....	164
7.7.2.3.	Nonil Fenol 10M.....	166
7.7.3.	Variación del Tipo de Surfactante	167
7.7.3.1.	Concentración de 1.000 mg L ⁻¹	167
7.7.3.2.	Concentración de 500 mg L ⁻¹	169
7.7.3.3.	Concentración de 250 mg L ⁻¹	171
7.8.	Resultados de Sólidos Suspendidos y Turbidez en la Etapa de Eliminación de Aceites y Grasas	174
7.8.1.	Sólidos en Suspensión	174
7.8.1.1.	Variación de la Concentración del Surfactante	174
7.8.1.1.1.	Ammonyx LO®	174
7.8.1.1.2.	Lauril Éter Sulfato de Sodio	176
7.8.1.1.3.	Nonil Fenol 10M.....	177
7.8.1.2.	Variación del Tiempo de Contacto.....	179
7.8.1.2.1.	Ammonyx LO®	179
7.8.1.2.2.	Lauril Éter Sulfato de Sodio	181
7.8.1.2.3.	Nonil Fenol 10M.....	182

7.8.1.3.	Variación del Tipo de Surfactante.....	184
7.8.1.3.1.	Concentración de 1.000 mg L ⁻¹	184
7.8.1.3.2.	Concentración de 500 mg L ⁻¹	186
7.8.1.3.3.	Concentración de 250 mg L ⁻¹	188
7.8.2.	Turbidez.....	189
7.8.2.1.	Variación de la Concentración de Surfactante	190
7.8.2.1.1.	Ammonyx LO®	190
7.8.2.1.2.	Lauril Éter Sulfato de Sodio	192
7.8.2.1.3.	Nonil Fenol 10M.....	193
7.8.2.2.	Variación del Tiempo de Contacto.....	195
7.8.2.2.1.	Ammonyx LO®	195
7.8.2.2.2.	Lauril Éter Sulfato de Sodio	197
7.8.2.2.3.	Nonil Fenol 10M.....	198
7.8.2.3.	Variación del Tipo de Surfactante.....	200
7.8.2.3.1.	Concentración de 1.000 mg L ⁻¹	200
7.8.2.3.2.	Concentración de 500 mg L ⁻¹	202
7.8.2.3.3.	Concentración de 250 mg L ⁻¹	204
7.8.3.	Sólidos en Suspensión Acumulados.....	207
7.8.3.1.	Variación de la Concentración de Surfactante	207
7.8.3.1.1.	Ammonyx LO®	207
7.8.3.1.2.	Lauril Éter Sulfato de Sodio	209
7.8.3.1.3.	Nonil Fenol 10M.....	210
7.8.3.2.	Variación del Tiempo de Contacto.....	212
7.8.3.2.1.	Ammonyx LO®	212
7.8.3.2.2.	Lauril Éter Sulfato de Sodio	214
7.8.3.2.3.	Nonil Fenol 10M.....	215
7.8.3.3.	Variación del Tipo de Surfactante.....	217
7.8.3.3.1.	Concentración de 1.000 mg L ⁻¹	217
7.8.3.3.2.	Concentración de 500 mg L ⁻¹	219
7.8.3.3.3.	Concentración de 250 mg L ⁻¹	221
7.9.	Resultados de Demanda Química de Oxígeno en la Etapa de Eliminación de Aceites y Grasas	222
7.9.1.	Variación de la Concentración de Surfactante	222
7.9.1.1.	Ammonyx LO®	222

7.9.1.2.	Lauril Éter Sulfato de Sodio.....	224
7.9.1.3.	Nonil Fenol 10M.....	226
7.9.2.	Variación del Tiempo de Contacto.....	227
7.9.2.1.	Ammonyx LO®	227
7.9.2.2.	Lauril Éter Sulfato de Sodio.....	229
7.9.2.3.	Nonil Fenol 10M.....	231
7.9.3.	Variación del Tipo de Surfactante	233
7.9.3.1.	Concentración de 1.000 mg L ⁻¹	233
7.9.3.2.	Concentración de 500 mg L ⁻¹	235
7.9.3.3.	Concentración de 250 mg L ⁻¹	237
7.10.	Simulación de Modelos de Disolución Isotérmica.....	240
7.10.1.	Adivinanza Inicial a 25°C.....	240
7.10.2.	Resultados de Ajuste a Modelos Matemáticos	245
7.11.	Variación de la Temperatura de Solución en el Tiempo	247

Índice de Tablas

Tabla 1: Composición química de un tipo de cascarilla de laminación [35].....	9
Tabla 2: Propiedades físicas del cloruro férrico anhídrido.....	10
Tabla 3: Requerimientos mínimos de solución de FeCl3 establecidos según el estándar AWWA B407-98 [46].	10
Tabla 4. Relación entre el parámetro de empaquetamiento y la forma de las micelas [72].	19
Tabla 5: Uso de surfactantes según su número de HLB [76].	29
Tabla 6: Números HLB de algunos grupos hidrofílicos, hidrofóbicos y mixtos [73],[76].	30
Tabla 7 : Punto de carga cero de algunos óxidos de hierro [77].	35
Tabla 8: Ecuaciones de consumo de ácido durante decapado [91].	41
Tabla 9: Principales características de Ammonyx LO®.	44
Tabla 10: Principales características de Lauril Éter Sulfato de Sodio.....	45
Tabla 11: Principales características de Nonil Fenol 10M.	46
Tabla 12: Características del agua utilizada como solvente para las soluciones de surfactantes. .	47
Tabla 13: Velocidades de Agitación utilizadas durante el proceso de eliminación de aceites y grasas.	47
Tabla 14: Efecto de algunos cationes en la determinación de 2 ppm de hierro [112].....	57
Tabla 15: Efecto de algunos aniones en la determinación de 2 ppm de hierro [112].....	57
Tabla 16: Parte de los resultados de análisis elemental por FRX, se muestran sólo aquellas especies por sobre 0,1% en masa.	76
Tabla 17: Análisis Elemental basado en Difracción de Rayos X.	76
Tabla 18: Composición mineralógica de la materia prima por DRX.	77
Tabla 19: Resultados de ajuste del conjunto de ensayos.	78

Tabla 20: Porcentaje de aceites y grasas en la materia prima.	82
Tabla 21: Algunos de los parámetros y su valor límite establecido por el Decreto Supremo N°609/98 [71].	83
Tabla 22: Volumen de agua (en mL) utilizado para la remoción de surfactante necesario para el cumplimiento del Decreto Supremo N°609/98 relativo a sólidos en suspensión.	93
Tabla 23: Promedio de errores relativos y desviación estándar de los mismos al comparar la medición de hierro ferroso y hierro total mediante la técnica de o-fenantrolina y titulación con dicromato de potasio.	114
Tabla 24: Energía de activación, factor pre-exponencial y coeficiente de determinación para los mejores 3 modelos matemáticos de estudio, en el caso del mineral FeO.	117
Tabla 25: Energía de activación, factor pre-exponencial y coeficiente de determinación para los mejores 3 modelos matemáticos de estudio, en el caso del mineral Fe ₃ O ₄	118
Tabla 26: Coeficiente de determinación para el ajuste polinómico del parámetro α_0 , de la ecuación (46), con el inverso de la temperatura para cada especie mineral en consideración.	119
Tabla 27: Parámetros de bondad de ajuste de los modelos en su forma no-isotérmica para el caso de hierro(II).	121
Tabla 28: Parámetros de bondad de ajuste de los modelos en su forma no-isotérmica para el caso de hierro total.	122
Tabla 29: Especies minerales del precipitado obtenido tras la disolución identificadas por Difracción de Rayos X.	123
Tabla 30: Comparación de los parámetros del estándar AWWA B407-98 y los del producto obtenido.	126
Tabla 31: Masa atómica de algunos elementos [75].	143
Tabla 32: Parámetros calculados de volumen ocupado por el grupo hidrofóbico en el núcleo micelar (VH) y largo del grupo hidrofóbico en el núcleo micelar (lc).	145
Tabla 33: Área transversal del grupo hidrofílico en la interfase micela-solución (a_0) de soluciones acuosas de los surfactantes utilizados.	145
Tabla 34: Parámetro de empaquetamiento aproximado para los surfactantes utilizados en solución acuosa.	146
Tabla 35: Resultados de análisis elemental hecho por fluorescencia de rayos X de la materia prima.	150
Tabla 36: Masa de la muestra utilizada en cada ensayo.	151
Tabla 37: Resultados de ajuste del ensayo 1.	152
Tabla 38: Resultados de ajuste del ensayo 2.	153
Tabla 39: Resultados de ajuste del ensayo 3.	154
Tabla 40: Resultados de ajuste del ensayo 4.	155
Tabla 41: Resultados de ajuste del ensayo 5.	156
Tabla 42: Bondad de ajuste de los mejores 6 modelos matemáticos para el caso de wustita.	245
Tabla 43: Bondad de ajuste de los mejores 6 modelos matemáticos para el caso de magnetita.	246
Tabla 44: Parámetros de bondad de ajuste para la temperatura de la solución en función del tiempo de reacción.	247