

Tabla de Contenido

Lista de Tablas	viii
Lista de Figuras	ix
1 Introducción	1
1.1 Presentación del tema	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivo General	2
1.2.2 Objetivos específicos	3
1.3 Motivación	3
1.4 Alcances	4
2 Marco Teórico	5
2.1 Procesamiento de minerales de Cobre	5
2.1.1 Conminución	6
2.1.2 Concentración	7
2.1.3 Recuperación de agua	8
2.1.4 Depositación de relaves	8
2.2 Transporte por Tuberías	9
2.2.1 Modelación de flujos en tuberías	11
2.3 Fuerzas	12
2.3.1 Fuerzas hidrodinámicas y coloidales	13
2.3.1.1 Fuerza gravitacional y boyancia	14
2.3.1.2 Fuerza de arrastre	14
2.3.1.3 Fuerza de levante (<i>Lift</i>)	15
2.3.1.4 Fuerza turbulenta difusiva	16
2.3.2 Fuerza Browniana	16
2.3.3 Fuerzas Coloidales	17
2.3.3.1 Fuerzas de repulsión	17
2.3.3.2 Fuerzas de Van der Waals	18
2.3.3.3 Fuerzas de hidratación	19
2.4 Mineralogía de arcillas	19
2.4.1 Caolinita	23
2.4.2 Montmorillonita	25
2.4.2.1 Bentonita	26
2.5 Carga superficial de las arcillas	27
2.6 Comportamiento de hinchamiento y selectividad de las arcillas en el intercambio iónico	29
2.7 Intercambio catiónico en suelos arcillosos	31
2.8 Efecto de minerales de arcillas en las plantas de procesamiento	32
2.9 Composición de Agua de proceso, agua de mar y su relevancia	35
2.9.1 Agua Fresca	36

2.9.2	Agua de Mar	36
2.9.3	El uso de agua de mar como agua de proceso	37
2.9.4	Efecto de agua de mar en los procesos	39
3	Simulación Numérica	42
3.1	OpenFOAM	42
3.1.1	Solver TwoPhaseEulerFOAM	43
3.1.2	Esquemas numéricos	43
3.1.2.1	Estructuras de las ecuaciones	44
3.1.2.2	Cálculo del término laplaciano ∇^2	44
3.1.2.3	Cálculo del término convectivo $\nabla \cdot (\mathbf{u}, \phi)$	45
3.1.2.4	Cálculo de la primera derivada temporal d/dt	46
3.2	Modelo de dos Fases	46
3.3	Ecuación de Momentum	47
3.3.1	Presión de sólido	48
3.3.1.1	Modelo exponencial	48
3.3.1.2	Modelo de la cinética del flujo granular	49
3.3.2	Tensor de cizalle y viscosidad efectiva	51
3.3.3	Fuerzas interfaciales	53
3.3.3.1	Modelo de arrastre	53
3.3.3.2	Fuerza de levante (<i>lift</i>)	54
3.3.3.3	Fuerza de lubricación de pared y dispersión turbulenta	55
3.3.4	Transferencia de masa de partículas	55
3.4	Ecuaciones de turbulencia	56
3.4.1	Modelo $k - \varepsilon$	57
3.4.2	Modelo $k - \varepsilon$ disperso	57
3.4.3	Modelo $k - \varepsilon$ de dos fases	58
3.5	Transferencia de masa de iones	58
3.5.1	Modelo de adsorción	59
3.5.1.1	Modelo site-binding	59
3.5.1.2	Modelos cinéticos de adsorción	60
3.5.1.3	Intercambio iónico	63
3.5.2	Coefficientes de Actividad	66
3.5.2.1	Modelo Debye-Huckel	67
3.5.2.2	Modelo de Davies	68
3.5.2.3	Modelo B-dot	69
3.6	Casos de Estudio y condiciones de borde	71
3.7	Resultados	75
3.7.1	Validación modelo hidrodinámico	75
3.7.2	Heterogeneidad y convergencia en tubería	76
3.7.3	Relación entre el contenido de partícula y el perfil de velocidad	80
3.7.4	Intercambio iónico en el sistema	82
3.7.5	Afinidad del sodio en la arcilla	86
3.7.6	Selectividad de Ca-Mg	89
3.7.7	Efecto de la distribución inicial del CEC de la arcilla	91
3.7.8	Equilibrio en la tubería	95
3.7.9	Mejoras al modelo para futuros trabajo	98

3.7.9.1	Agregar reacciones Ca-Mg y/o de todos los iones presentes .	98
3.7.9.2	Agregar un modelo de zona negativas (función pH)	99
3.7.9.3	Modelo potencial zeta	99
3.7.10	Resultados experimentales preliminares	100
3.8	Resumen y conclusiones	101

Bibliografía		105
---------------------	--	------------

Lista de Tablas

2.1	Estabilidad suspensión a distinto potencial zeta (Shook & Roco, 2015).	18
2.2	Comparación CEC para distinto mineral de arcilla, con P_h el potencial de hinchamiento y S_p el área superficial de partículas. (White, 2013).	22
2.3	relación μ_m/μ_l para distintos sistemas particulados (Bulatovic <i>et al.</i> , 1999).	23
2.4	Composición típica del agua de mat basada en el ASTM estándar (D1141-98).	37
3.1	relación μ_m/μ_l para distintos sistemas particulados.	52
3.2	parámetros B-dot Model para distintos cationes (Truesdell & Jones, 1974).	70
3.3	valores A y B para el modelo a distintas temperaturas (Truesdell & Jones, 1974).	70
3.4	Modelos utilizados en las simulaciónde numéricas en OpenFOAM.	72
3.5	Salidas (Output) de las simulaciones realizadas en OpenFOAM. Aquí i es Na, Ca, Mg y Cl.	73
3.6	Rango de valores de las variables principales estudiadas en las simulaciones numéricas para el análisis de sensibilidad.	73
3.7	Fracción de cationes en la partícula (meq/100 gr arcilla) para distintos CEC y distinta concentración de finos; con $u_m = 2\text{m s}^{-1}$ y $\phi_s = 20\%$	84
3.8	Composición de cationes de intercambio en la partícula y fracción intercambiada en el líquido en función del tipo de arcilla; Proporción es la fracción del ion i que equivale al CEC.	85
3.9	Efecto del diámetro de las partículas gruesas d_s en la fracción media intercambiada de calcio $\bar{\theta}_{Ca}$	85
3.10	Efecto de K_{Mg} en la composición de iones de intercambio en una arcilla saturada en sodio con CEC 70 meq/100 gr arcilla.	90
3.11	Efecto de la concentración de iones en el líquido en la composición de iones intercambiables para distintas esmectitas, resumen investigación (Shainberg <i>et al.</i> , 1987). M1 y M2 corresponden a dos muestras de la misma esmectita sumergida en un líquido con distintas proporciones de K y Ca.	90
3.12	Composición de los cationes de intercambio para distinto k_2/c_0 desde una cinética rápida ($5 \cdot 10^{-02}$) a una cinética lenta ($1 \cdot 10^{-04}$).	95
3.13	variables con efecto que contrarrestan el intercambio iónico, (\uparrow) significa que necesita aumentar para contrarrestar el efecto de la variable, (\downarrow) significa que debe disminuir, (\Downarrow y \Uparrow) se necesita disminuir y aumentar manteniendo ϕ_T (tonelaje fijo) y * se refiere a que no afecta la fracción media intercambiada.	101
3.14	Efecto del tipo de arcilla y composición inicial de arcilla en la composición final de la arcilla y del líquido, para $K \leq 1$ y $K_{Mg} = 1$	102

Lista de Figuras

2.2.1	Efecto tamaño de partícula y velocidad (Jacobs, 2003).	10
2.2.2	Tipos de flujo en una tubería (Jacobs, 2003).	11
2.3.1	Diagrama de fuerzas en una partícula (Abulnaga, 2002).	13
2.3.2	Fuerza de levante para una partícula (Shook & Roco, 2015).	15
2.4.1	Diagrama de los minerales filosilicatados (Farrokhpay & Bradshaw, 2012). . .	20
2.4.2	Ejemplo de arcillas, caolinita a la izquierda y bentonita a la derecha (Leroy & Revil, 2004).	21
2.4.3	Estructura de la caolinita (Larsen, 2009).	24
2.4.4	Estructura de la bentonita (Larsen, 2009).	26
2.4.5	Comparación arcillas con distinto CEC.	27
2.5.1	Distribución de iones y cargas de una partícula, donde Q_0, Q_β, Q_S son las cargas superficiales en la superficie de la partícula, en la capa de Stern y en la capa difusa, respectivamente, $\Phi_0, \Phi_\beta, \Phi_S$ es el potencial electrostático en la superficie de la partícula, en la capa de Stern y en la capa difusa, respectivamente. A^- y M^+ son aniones y cationes en solución (Leroy & Revil, 2004).	28
3.1.1	Estructura de la celda y tiempo (Open, 2011a).	42
3.1.2	Estructura OpenFoam (Open, 2011b)	43
3.1.3	Celdas en una malla OpenFOAM (Open, 2011a).	44
3.2.1	Representación de ϕ para un modelo Euler de dos fases, los valores en la celda corresponden a los valores de la concentración en volumen (ϕ) (Rusche, 2003).	46
3.5.1	Actividad iones en solución.	66
3.5.2	Coefficiente de actividad para los iones Ca, Na y Mg.	68
3.5.3	Coefficiente de actividad Ca, Na y Mg.	69
3.5.4	Coefficiente de actividad Ca, Na y Mg.	70
3.6.1	Sección de la tubería donde se aprecia el perfil de velocidad en la dirección x.	71
3.6.2	Distribución de la celda en la tubería.	72
3.6.3	Concentración de Ca en el agua a lo largo de la tubería con respecto a la concentración inicial.	75
3.7.1	Perfil de velocidad en una tubería mediante una simulación numérica en el software OpenFoam con (a) $u_m = 3 \text{ m s}^{-1}$ y $\phi_s = 19\%$ y (b) $u_m = 5.4 \text{ m s}^{-1}$ y $\phi_s = 20\%$. Tesis corresponde al presente trabajo, Exp. corresponde a los datos experimentales utilizados en Ekambara <i>et al.</i> (2009) y Ekambara <i>et al.</i> (2009) corresponde a la simulación 3D realizada por Ekambara.	76
3.7.2	Perfil de concentración volumétrica de partículas mediante una simulación numérica en OpenFoam con (a) $u_m = 5.4 \text{ m s}^{-1}$ y $\phi_s = 30\%$ y (b) $u_m = 5.4 \text{ m s}^{-1}$ y $\phi_s = 40\%$. El perfil corresponde a los promedios horizontales de los primeros 10 m de la tubería. Tesis corresponde al presente trabajo, Exp. corresponde a los datos experimentales utilizados en Ekambara <i>et al.</i> (2009) y Ekambara <i>et al.</i> (2009) corresponde a la simulación 3D realizada por Ekambara.	77

3.7.3	Efecto de la velocidad en el perfil de concentración volumétrica de partículas para (a) $u_m = 1 \text{ m s}^{-1}$ y (b) $u_m = 3 \text{ m s}^{-1}$, con $\phi_s = 20 \%$ y $d_s = 200 \mu\text{m}$	77
3.7.4	Efecto del tamaño de partícula en el perfil de concentración volumétrica de partículas (ϕ_s) para (a) $d_s = 10 \mu\text{m}$, (b) $d_s = 50 \mu\text{m}$, (c) $d_s = 100 \mu\text{m}$ y (d) $d_s = 200 \mu\text{m}$, con $\phi_s = 20 \%$ y $u_m = 2 \text{ m s}^{-1}$	78
3.7.5	Efecto de la concentración media de partículas en el perfil de concentración volumétrica de partículas para (a) $\phi_s = 20 \%$ y (b) $\phi_s = 40 \%$, con $d_s = 100 \text{ m s}^{-1}$ y $u_m = 2 \text{ m s}^{-1}$	79
3.7.6	En (a) la variación media (vertical) de la concentración de partículas β a distintos distancia dentro de la tubería y (b) estudio convergencia del perfil ($\beta_{14} - \beta_6$) a los 6 m de la tubería para distintos valores de Π ; En (b) Z1:Fuerte estratificación, Z2: zona de transición, Z3: Alta suspensión de partículas.	79
3.7.7	En (a) el perfil de velocidad a diferentes velocidades media de la pulpa. En (b) el perfil de concentración de partículas gruesas a distinta velocidades media. Ambos con $\phi_s = 20 \%$, $d_s = 100 \mu\text{m}$, $\phi_f = 6 \%$ y $\text{CEC} = 70 \text{ meq}/100\text{gr-arcilla}$	80
3.7.8	En (a) el perfil de concentración de partículas gruesas a diferente concentración media de gruesos, con $d_s = 100 \mu\text{m}$ y en (b) este perfil de concentración para diferentes tamaños de partícula; $u_m = 2 \text{ m s}^{-1}$ y $\phi_f = 6 \%$	81
3.7.9	Perfil de concentración para partículas finas a (a) diferentes velocidades media con $\phi_s = 20 \%$ y (b) diferente concentración de partícula gruesa, en ambos casos $u_m = 2 \text{ m s}^{-1}$. $\phi_f = 60 \%$	82
3.7.10	Fracción intercambiada en el agua para (a) calcio y (b) magnesio; En ambos casos $\phi_s = 20 \%$, $u_m = 2 \text{ m s}^{-1}$, $\text{CEC} = 70 \text{ meq}/100\text{gr-clay}$	83
3.7.11	Fracción de Ca intercambiada para (a) distintas fracciones de arcillas ($d_{s1} = 100 \mu\text{m}$, $d_{s2} = 200 \mu\text{m}$), (b) en función del CEC para distintas fracciones de finos; Para ambos casos $\phi_s = 20 \%$ and $u_m = 2 \text{ m s}^{-1}$ y para (a) $\text{CEC} = 70 \text{ meq}/100 \text{ gr-clay}$	84
3.7.12	En (a) el valor de ϕ_s es fijo al 20% y en (b) ϕ_T y u_m están fijos en 40% y 2 m s^{-1} respectivamente. $i = \text{Ca}$ o Mg y $\text{CEC} = 70 \text{ meq}/100 \text{ gr-arcilla}$. Los valores corresponden a promedio verticales a los 14 m de la tubería.	86
3.7.13	Fracción media intercambiada en función de k_2 para diferentes K (m^3/mol) para (a) calci, (b) sodio y (c) magnesio; $\text{CEC} = 70 \text{ meq}/100 \text{ gr-clay}$, $\phi_s = 20 \%$, $\phi_f = 6 \%$, $u_m = 2 \text{ m s}^{-1}$, $d_s = 200 \mu\text{m}$	87
3.7.14	Composición de cationes de intercambio en la partícula ($\text{mol}/100\text{g-arcilla}$) para distintos valores de K (afinidad con sodio), $i = \text{Ca}$, Mg ó Na ; $\text{CEC} = 70 \text{ meq}/100 \text{ gr-clay}$, $\phi_s = 20 \%$, $\phi_f = 6 \%$, $u_m = 2 \text{ m s}^{-1}$, $d_s = 100 \mu\text{m}$	88
3.7.15	Efecto de la selectividad por Mg (K_{Mg}) para la fracción intercambiada en el agua de (a) calcio y (b) magnesio a distintos K	89
3.7.16	Efecto en la distribuciones de los cationes de intercambio en la intercapa de la arcillas cuando el $\%$ de calcio correspondiente al CEC es igual al (a) 25% y (b) 75% a distintos valores de K . ; $\text{CEC} = 70 \text{ meq}/100 \text{ gr-clay}$, $\phi_s = 20 \%$, $\phi_f = 6 \%$, $u_m = 2 \text{ m s}^{-1}$, $d_s = 100 \mu\text{m}$	91
3.7.17	Efecto a la fracción media intercambiada la fracción de Mg a distintas fracciones de Ca en la partícula variando K . ; $\text{CEC} = 70 \text{ meq}/100 \text{ gr-clay}$, $\phi_s = 20 \%$, $\phi_f = 6 \%$, $u_m = 2 \text{ m s}^{-1}$, $d_s = 100 \mu\text{m}$	92

3.7.18	Fracción intercambiada de sodio en el agua en función de R . Menor a 10^3 aumenta la concentración en el líquido y a valores mayores disminuye la cantidad de sodio en el líquido.	94
3.7.19	Fracción media intercambiada a lo largo del tubo para (a) arcilla saturada en sodio y (b) arcilla con 50% de sus cationes de intercambio como Ca para distintas constantes cinéticas k_2	96
3.7.20	Fracción intercambiada de Ca para (a) arcilla saturada en sodio y (b) con 50% de sus cationes de intercambio correspondiente a calcio, para distintos valores de K	97
3.7.21	Fracción media intercambiada de Mg para distintos potenciales zeta ζ inicial, en (a) en función de K y (b) a lo largo de la tubería.	98
3.7.22	(a) Efecto de la concentración de sales CaCl_2 y NaCl y (b) tiempo de relajación del potencial zeta al agregar un pulso de 0.005M.	101