

# Tabla de Contenido

<b>Lista de Tablas</b>	<b>viii</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>ix</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
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
<b>2 Marco Teórico</b>	<b>5</b>
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
<b>3</b>	<b>Simulación Numérica</b>	<b>42</b>
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 $\nabla^2$ . . . . .	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

<b>Bibliografía</b>		<b>105</b>
---------------------	--	------------

# 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 $\mu_m/\mu_l$ 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 $\mu_m/\mu_l$ 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 $\phi_T$ (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 $Q_0, Q_\beta, Q_S$ 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 $\phi$ para un modelo Euler de dos fases, los valores en la celda corresponden a los valores de la concentración en volumen ( $\phi$ ) (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 ( $\phi_s$ ) 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 $\beta$ 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 $\Pi$ ; 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 $\phi_s$ es fijo al $20 \%$ y en (b) $\phi_T$ y $u_m$ están fijos en $40 \%$ y $2 \text{ m s}^{-1}$ respectivamente. $i = \text{Ca}$ o $\text{Mg}$ 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 $K$ ( $\text{m}^3/\text{mol}$ ) 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), $i = \text{Ca}$ , $\text{Mg}$ ó $\text{Na}$ ; $\text{CEC} = 70 \text{ meq}/100 \text{ gr-clay}$ , $\phi_s = 20 \%$ , $\phi_f = 6 \%$ , $u_m = 2 \text{ m s}^{-1}$ , $d_s = 100 \mu\text{m}$ . . . . .	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 $\zeta$ 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 $\text{CaCl}_2$ y $\text{NaCl}$ y (b) tiempo de relajación del potencial zeta al agregar un pulso de 0.005M. . . . .	101