

## TABLA DE CONTENIDO

CAPITULO 1 .....	1
INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Presentación del Tema .....	1
1.2 Objetivos .....	2
CAPITULO 2 .....	5
ANTECEDENTES Y FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA .....	5
2.1 Proceso de Fusión.....	5
2.2 Arcillas .....	19
2.3 Reología .....	25
2.4 Variables que afectan la viscosidad de escorias fayalíticas .....	46
CAPITULO 3 .....	65
PLANIFICACIÓN EXPERIMENTAL .....	65
3.1 Variables del sistema.....	65
3.2 Arreglo Experimental.....	65
3.3 Equipos y Materiales .....	69
3.4 Procedimiento Experimental .....	71
3.5 Pruebas Experimentales .....	75
CAPITULO 4 .....	79
RESULTADOS EXPERIMENTALES .....	79
4.1 Caracterización de mineral de arcilla .....	79
4.2 Generación de escoria sintética .....	82
4.3 Medición de la viscosidad de la escoria fundida.....	84
CAPITULO 5 .....	99
DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	99
5.1 Caolinita .....	99
5.2 Montmorillonita .....	106
5.3 Comparación entre caolinita y montmorillonita.....	113
5.4 Proyección industrial.....	116
CAPITULO 6 .....	121
CONCLUSIONES .....	121
CAPITULO 7 .....	125

RECOMENDACIONES PARA ESTUDIOS FUTUROS .....	125
CAPITULO 8 .....	126
BIBLIOGRAFÍA .....	126
CAPITULO 9 .....	133
ANEXO A: Calibración del Reómetro .....	133
ANEXO B: VISCOSIDAD Y TORQUE EN FUNCIÓN DE TASA DE CORTE .....	135
ANEXO C: CARACTERIZACIÓN SEM .....	149
ANEXO D: SEXTA CONVENCION CUBANA GEOCIENCIAS 2015 .....	153
ANEXO E: COPPER 2016 .....	154

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1. Diagrama binario de fases FeO-SiO <sub>2</sub> (Diaz C., 1974). .....	7
Figura 2. Diagrama ternario SiO <sub>2</sub> -FeO-FeS a 1.200 °C (Yazawa & Kameda, 1953). .....	8
Figura 3. Diagrama ternario de fases FeO-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> a distinta temperatura y presión parcial de oxígeno (Muan <i>et.al.</i> , 1955). .....	10
Figura 4. Distintas cargas de Oxígeno en la estructura del silicato fundido (Genge M., 2011). ...	11
Figura 5. Polimerización de cadenas silicatadas (Genge M., 2011). .....	12
Figura 6. Solubilidad de cobre en escoria fayalítica a 1.300 °C en equilibrio con matas incrementando la cantidad de cobre en ellas (Roghani G. <i>et. al.</i> , 2000). .....	15
Figura 7. Esquema Convertidor Teniente (Schlesinger <i>et. al.</i> , 2011). .....	17
Figura 8. Esquema Horno Flash Outotec (Schlesinger <i>et. al.</i> , 2011). .....	18
Figura 9. (a) Tetraedro SiO <sub>4</sub> y capas 'T'. (b) Octaedro y diferencia entre las capas de brucita y gibbsita (Klein C. y, Dutrow B., 2008). .....	19
Figura 10. Clasificación del grupo de filosilicatos (Ndlovu B. <i>et. al.</i> , 2013). .....	22
Figura 11. Movimiento de las partículas en fluidos de cizalla y extensionales (Barnes H.A., 2000). .....	25
Figura 12. Modelo de Placas Paralelas (Barnes H.A., 2000). .....	26
Figura 13. Comportamiento de un fluido Newtoniano, donde la viscosidad del material es independiente de la tasa de cizalla. Izquierda: Gráfico esfuerzo cizalla vs tasa cizalla. Derecha: Gráfico viscosidad vs tasa cizalla (Barnes H.A., 2000). .....	29
Figura 14. Valores A, B en la ecuación de Andrade E. (1934) para distintos líquidos orgánicos (Barnes H.A., 2000). .....	30
Figura 15. Viscosidad del agua normalizada a valores de 0 °C y presión atmosférica como una función de la presión (Barnes H.A., 2000). .....	32
Figura 16. Modelos no Newtonianos en estado estacionario. Izquierda: Modelos de dos parámetros. Derecha: Modelos de tres parámetros (Bird R. <i>et. a.</i> , 1987). .....	36
Figura 17. Solución al análisis de estabilidad lineal. ....	37
Figura 18. Equipo utilizado en el procedimiento experimental, Anton-Paar Rheolab QC. ....	39
Figura 19. Sistema de medición de cilindros coaxiales para medir viscosidad. Izquierda: Vista superior. Derecha: Corte transversal (Barnes H.A., 2000). .....	41
Figura 20. Componentes del Hylogger-3. ....	43

Figura 21. Viscosidad de fayalita en función de la temperatura para mediciones de varios investigadores (Kowalczyk W. <i>et. al.</i> , 1995). .....	46
Figura 22. Viscosidad en función de Fe/SiO <sub>2</sub> para distintas cantidades de alúmina a 1673 K (Park H. S., <i>et. al.</i> , 2011). .....	48
Figura 23. FTIR de escorias fayalíticas con distintos Fe/SiO <sub>2</sub> a 1773 K (Park H. S., <i>et. al.</i> , 2011) .....	49
Figura 24. Cambio en la profundidad de picos para NBO/T=1, 2,4 en función de Fe/SiO <sub>2</sub> (Park H. S., <i>et. al.</i> , 2011). .....	50
Figura 25. Viscosidad para escorias fayalíticas en función de Fe/SiO <sub>2</sub> a distintas temperaturas y presiones parciales de oxígeno (Vartiainen, A., 1998). .....	51
Figura 26. Curvas de isoviscosidad del ternario FeO-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> a 1.250 °C, 1.300 °C, 1.350 °C y 1.400 °C. Isoviscosidad en mPa · s. El área <i>liquidus</i> se muestra en líneas punteadas (Vartiainen, A., 1998). .....	52
Figura 27. Gráfico logaritmo natural de viscosidad e inverso de la temperatura para distintas cantidades de CaO (Kowalczyk W. <i>et. al.</i> , 1995). .....	53
Figura 28. Viscosidad escoria fayalítica en función de contenido de CaO para 1.250, 1.300 y 1.350 °C (Kowalczyk W. <i>et. al.</i> , 1995). .....	54
Figura 29. Viscosidad de escorias fayalíticas a 1.300 °C en función de la adición de distintos óxidos (Kowalczyk W. <i>et. al.</i> , 1995). .....	55
Figura 30. Viscosidad de escoria fayalítica y cantidad de alúmina en la escoria para distintos Fe/SiO <sub>2</sub> (Park H. S., <i>et. al.</i> , 2011). .....	56
Figura 31. FTIR escoria fayalítica con distintas cantidades de alúmina para Fe/SiO <sub>2</sub> =1,27 a 1673 K (Park H. S., <i>et. al.</i> , 2011). .....	57
Figura 32. Energía de activación superficial para el ternario MO-YO-SiO <sub>2</sub> y una sección transversal a través de zMO-SiO <sub>2</sub> y zYO-SiO <sub>2</sub> (Seetharaman S. <i>et. al.</i> , 2004). .....	59
Figura 33. Diagrama de contorno y diagrama tridimensional de viscosidad para mezcla de minerales de arcilla. La viscosidad está en Pa · s (Ayadi A. J. <i>et. al.</i> , 2013). .....	64
Figura 34. Arreglo experimental del tren de gases. ....	66
Figura 35. Esquema del interior del horno eléctrico de laboratorio en conjunto con el reómetro. ....	67
Figura 36. Arreglo experimental del horno de laboratorio y reómetro. ....	68
Figura 37. Principales componentes de la tapa del horno eléctrico de laboratorio. ....	68
Figura 38. Arreglo de crisoles al interior del tubo de reacción para las pruebas de equilibrio químico. ....	69
Figura 39. Caracterización hiperespectral para la caolinita. Se aprecia la coincidencia de picos en longitudes de onda particulares entre el espectro medido y el espectro de referencia. ....	79
Figura 40. Espectroscopia de reflectancia para montmorillonita. Se aprecia la coincidencia de picos en longitudes de onda particulares entre el espectro medido y el espectro de referencia. ...	81
Figura 41. Micrografía de escoria sintética. ....	83
Figura 42. Caracterización hiperespectral para fayalita. Se aprecia la coincidencia de picos en longitudes de onda particulares entre el espectro medido y el espectro de referencia. ....	83
Figura 43. Discriminación entre una zona de flujo concéntrico y otra zona de flujo helicoidal dada una tasa de corte crítica para escoria sintética a 1.350 °C. ....	86
Figura 44. Valores máximos, mínimos y promedios de viscosidad reportados (Utigard T. & Warczok A., 1995; Kowalczyk W. <i>et. al.</i> , 1995) y valores experimentales obtenidos en la tesis. ....	87

Figura 45. Micrografía SEM muestra de escoria sin dopar a 1.275 °C. A la izquierda una micrografía de la matriz de la escoria en color amarillo-verde. A la derecha una micrografía de los cristales de hercinita en color rojo y de la matriz en color azul.....	88
Figura 46. Micrografía SEM muestra de escoria sin dopar a 1.300 °C. En azul se aprecia la matriz de la escoria Fayalítica. En amarillo-verde se observan los cristales de hercinita. ....	89
Figura 47. Micrografía SEM a la escoria sintética dopada con 8% de caolinita a 1.275 °C.....	92
Figura 48. Micrografía óptica para escoria sintética dopada con 2% de caolinita a 1.275 °C, x200. ....	93
Figura 49. Micrografía óptica para escoria sintética dopada con 5% de caolinita a 1.275 °C, x200. ....	93
Figura 50. Micrografía óptica para escoria sintética dopada con 8% de caolinita a 1.275 °C, x200. ....	94
Figura 51. Micrografía SEM a la escoria sintética dopada con 2% de montmorillonita a 1.275 °C. Espectros más relevantes. En naranja se identifican cristales de hercinita y en azul-verde la matriz de olivino. ....	96
Figura 52. Micrografía óptica para escoria sintética dopada con 2% de montmorillonita a 1.275 °C, x200.....	97
Figura 53. Micrografía óptica para escoria sintética dopada con 5% de montmorillonita a 1.275 °C, x200.....	98
Figura 54. Micrografía óptica para escoria sintética dopada con 8% de montmorillonita a 1.275 °C, x200.....	98
Figura 55. Distribución porcentual de especies constituyentes de la escoria en función del contenido de caolinita en la alimentación, como mineral arcilloso de dopaje, a 1.275 °C. ....	100
Figura 56. Distribución porcentual de especies constituyentes de la escoria en función del contenido de caolinita en la alimentación, como mineral arcilloso de dopaje, a 1.300 °C. ....	100
Figura 57. Gráfico semilogarítmico de la viscosidad versus inverso de la temperatura para distintas cantidades de caolinita adicionada a la escoria. ....	101
Figura 58. Viscosidad de la escoria en función de la cantidad de caolinita adicionada para las distintas temperaturas experimentales estudiadas. ....	102
Figura 59. Viscosidad de la escoria en función de la temperatura para las distintas cantidades de caolinita adicionada. ....	102
Figura 60. Ajuste del modelo propuesto en la tesis junto con aquel propuesto por Utigard <i>et. al.</i> , 1995 a los valores experimentales obtenidos a 1.275 °C de dopaje con caolinita. ....	105
Figura 61. Ajuste del modelo propuesto en la tesis junto con aquel propuesto por Utigard <i>et. al.</i> , 1995 a los valores experimentales obtenidos a 1.300 °C de dopaje con caolinita. ....	105
Figura 62. Distribución porcentual de especies constituyentes de la escoria en función del contenido de montmorillonita en la alimentación, como mineral arcilloso de dopaje, a 1.275 °C. ....	107
Figura 63. Distribución porcentual de especies constituyentes de la escoria en función del contenido de montmorillonita en la alimentación, como mineral arcilloso de dopaje, a 1.300 °C. ....	107
Figura 64. Gráfico semilogarítmico de la viscosidad versus inverso de la temperatura para distintas cantidades de montmorillonita adicionada a la escoria. ....	108
Figura 65. Viscosidad de la escoria en función de la cantidad de montmorillonita adicionada para las distintas temperaturas experimentales estudiadas. ....	109

Figura 66. Viscosidad de la escoria en función de la temperatura para las distintas cantidades de montmorillonita adicionada.....	109
Figura 67. Ajuste del modelo propuesto en la tesis junto con aquel propuesto por Utigard <i>et. al.</i> , 1995 a los valores experimentales obtenidos a 1.275 °C de dopaje con montmorillonita. ....	112
Figura 68. Ajuste del modelo propuesto en la tesis junto con aquel propuesto por Utigard <i>et. al.</i> , 1995 a los valores experimentales obtenidos a 1.300 °C de dopaje con montmorillonita. ....	112
Figura 69. Comparación entre los modelos propuestos en esta investigación y un dato experimental no considerado en la realización de los modelos. Vale la pena mencionar que tanto los modelos como los datos experimentales graficados corresponden a escoria Fayalítica sin dopaje de mineral arcilloso.....	113
Figura 70. Relación entre la magnetita en la fase de escoria con el grado de mata generado y el cobre atrapado mecánicamente entre 1.200-1.300 °C. Confección propia. ....	118
Figura 71. Viscosidad y torque para escoria sintética a 1.285 °C. ....	134
Figura 72. Viscosidad y torque para escoria fayalítica a 1.350 °C.....	135
Figura 73. Viscosidad y torque para escoria fayalítica a 1.325 °C.....	135
Figura 74. Viscosidad y torque para escoria fayalítica a 1.300 °C.....	136
Figura 75. Viscosidad y torque para escoria fayalítica a 1.275°C.....	136
Figura 76. Viscosidad y torque de escoria fayalítica dopada con 2% de caolinita a 1.350 °C. ..	137
Figura 77. Viscosidad y torque de escoria fayalítica dopada con 2% de caolinita a 1.325 °C. ..	137
Figura 78. Viscosidad y torque de escoria fayalítica dopada con 2% de caolinita a 1.300 °C. ..	138
Figura 79. Viscosidad y torque de escoria fayalítica dopada con 2% de caolinita a 1.275 °C. ..	138
Figura 80. Viscosidad y torque de escoria fayalítica dopada con 5% de caolinita a 1.350 °C. ..	139
Figura 81. Viscosidad y torque de escoria fayalítica dopada con 5% de caolinita a 1.325 °C. ..	139
Figura 82. Viscosidad y torque de escoria fayalítica dopada con 5% de caolinita a 1.300 °C. ..	140
Figura 83. Viscosidad y torque de escoria fayalítica dopada con 5% de caolinita a 1.275 °C. ..	140
Figura 84. Viscosidad y torque de escoria fayalítica dopada con 8% de caolinita a 1.350 °C. ..	141
Figura 85. Viscosidad y torque de escoria fayalítica dopada con 8% de caolinita a 1.325 °C. ..	141
Figura 86. Viscosidad y torque de escoria fayalítica dopada con 8% de caolinita a 1.300 °C. ..	142
Figura 87. Viscosidad y torque de escoria fayalítica dopada con 8% de caolinita a 1.275 °C. ..	142
Figura 88. Viscosidad y torque de escoria fayalítica dopada con 2% de montmorillonita a 1.350 °C.....	143
Figura 89. Viscosidad y torque de escoria fayalítica dopada con 2% de montmorillonita a 1.325 °C.....	143
Figura 90. Viscosidad y torque de escoria fayalítica dopada con 2% de montmorillonita a 1.300 °C.....	144
Figura 91. Viscosidad y torque de escoria fayalítica dopada con 2% de montmorillonita a 1.275 °C.....	144
Figura 92. Viscosidad y torque de escoria fayalítica dopada con 5% de montmorillonita a 1.350 °C.....	145
Figura 93. Viscosidad y torque de escoria fayalítica dopada con 5% de montmorillonita a 1.325 °C.....	145
Figura 94. Viscosidad y torque de escoria fayalítica dopada con 5% de montmorillonita a 1.300 °C.....	146
Figura 95. Viscosidad y torque de escoria fayalítica dopada con 5% de montmorillonita a 1.275 °C.....	146

Figura 96. Viscosidad y torque de escoria fayalítica dopada con 8% de montmorillonita a 1.350 °C.....	147
Figura 97. Viscosidad y torque de escoria fayalítica dopada con 8% de montmorillonita a 1.325 °C.....	147
Figura 98. Viscosidad y torque de escoria fayalítica dopada con 8% de montmorillonita a 1.300 °C.....	148
Figura 99. Viscosidad y torque de escoria fayalítica dopada con 8% de montmorillonita a 1.275 °C.....	148

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición teórica de máxima separación en la saturación con sílice (Schlesinger <i>et. al.</i> , 2011).....	7
Tabla 2. Escorias típicas de distintas etapas del proceso pirometalúrgico de cobre (Mackey P. J., 1982).....	9
Tabla 3. Propiedades físicas de escorias del proceso pirometalúrgico (Mackey P. J., 1982). .....	13
Tabla 4. Efecto de diferentes cationes en las propiedades físicas de las escorias. $\alpha, \beta$ : Coeficiente de expansión térmico lineal y volumétrico; k: Conductividad térmica; $\kappa$ : Conductividad eléctrica (Mills K.C. <i>et. al.</i> , 2011). .....	13
Tabla 5. Distribución de impurezas estimadas en un horno Flash para una mata de grado 55% Cu (Schlesinger <i>et. al.</i> , 2011).....	14
Tabla 6. Cantidad de elementos y compuestos presentes en la caolinita (Barthelmy D. 2014a). .	20
Tabla 7. Cantidad de elementos y compuestos presentes en la illita (Barthelmy D. 2014b). .....	21
Tabla 8. Cantidad de elementos y compuestos presentes en la montmorillonita (Barthelmy D. 2014c). .....	23
Tabla 9. Tipo y cantidad de arcilla asociadas a distintos yacimientos (Bulatovic S. <i>et. al.</i> , 1999). .....	24
Tabla 10. Tasa de cizalla en distintas situaciones y con distintas aplicaciones (Barnes H.A., 2000).....	27
Tabla 11. Viscosidad dinámica para diferentes materiales (Barnes H.A., 2000).....	28
Tabla 12. Viscosidad y viscosidad cinemática para el agua y el aire a 1 atm y distintas temperaturas (Bird R. <i>et. al.</i> , 1987).....	28
Tabla 13. Parámetros del plástico de Bingham para suspensiones de combustibles nucleares (Bird R. <i>et. al.</i> , 1987). .....	33
Tabla 14. Parámetros de distintos materiales para el modelo de Ostwald de Waele (Bird R. <i>et. al.</i> , 1987).....	34
Tabla 15. Parámetros de Ellis para soluciones de Carboximetil celulosa (CMC) en agua (Bird R. <i>et. al.</i> , 1987).....	35
Tabla 16. Especificaciones Anton-Paar Rheolab QC.....	39
Tabla 17. Región del espectro electromagnético y longitudes de onda correspondientes donde Hylogger-3 analiza. ....	42
Tabla 18. Especificaciones técnicas del MiniFlex 600.....	44
Tabla 19. Especificaciones técnicas del Olympus Innov-x Premium. ....	45
Tabla 20. Variables de la escoria fayalítica y experimentales para la medición de viscosidad. ...	76

Tabla 21. Variables de la escoria fayalítica dopada con caolinita y condiciones experimentales para la medición de viscosidad. ....	76
Tabla 22. Variables de la escoria fayalítica dopada con montmorillonita y condiciones experimentales para la medición de viscosidad. ....	77
Tabla 23. Variables de la escoria fayalítica dopada con caolinita o montmorillonita para la Prueba 1 y Prueba 2, respectivamente y las condiciones experimentales para la medición de viscosidad. ....	78
Tabla 24. Variables de la escoria fayalítica dopada con caolinita o montmorillonita para la Prueba 3 y Prueba 4, respectivamente, y las condiciones experimentales para la medición de viscosidad. ....	78
Tabla 25. Análisis composicional mediante XRD para la caolinita. ....	80
Tabla 26. Análisis elemental mediante XRF para la caolinita. ....	80
Tabla 27. Análisis composicional mediante XRD para la montmorillonita. ....	81
Tabla 28. Análisis elemental mediante XRF para la montmorillonita. ....	82
Tabla 29. Análisis de especies mediante XRD para la escoria sintética generada. ....	84
Tabla 30. Análisis elemental mediante XRF para la escoria sintética generada. ....	84
Tabla 31. Velocidad angular crítica para escoria sintética a distintas temperaturas experimentales. ....	86
Tabla 32. Tasa de corte y viscosidad obtenida para escoria sintética a distintas temperaturas experimentales. ....	87
Tabla 33. Análisis elemental y composicional mediante XRF y XRD, respectivamente para 1.275 y 1.300 °C. ....	88
Tabla 34. Análisis químico micrografía SEM a escoria sintética sin dopar a 1.275 °C. Espectros representativos. Nótese que los espectros de la Matriz están referidos a la micrografía de la izquierda de la Figura 44 mientras que los espectros del Cristal a la micrografía de la derecha de la misma figura. ....	89
Tabla 35. Análisis químico micrografía SEM a escoria sintética sin dopar a 1.300 °C. Espectros representativos. Los espectros del cristal están referidos a los colores verde-amarillo mientras que los espectros de la matriz al color azul en la Figura 46. ....	90
Tabla 36. Velocidad angular crítica para cada temperatura experimental y caolinita adicionada a la escoria. ....	90
Tabla 37. Rango de tasas de corte donde se obtiene la viscosidad experimental al adicionar 2, 5 y 8% de caolinita a la escoria Fayalítica para todas las temperaturas probadas. ....	91
Tabla 38. Resultados del análisis elemental y composicional obtenidos por XRF y XRD, respectivamente, de escoria Fayalítica dopada con caolinita a 1.275 y 1.300 °C. ....	91
Tabla 39. Análisis químico micrografía SEM a la escoria sintética dopada con 8% de caolinita a 1.275 °C. ....	92
Tabla 40. Velocidad angular crítica para cada temperatura experimental y montmorillonita adicionada a la escoria. ....	94
Tabla 41. Rango de tasas de corte donde se obtiene la viscosidad experimental al adicionar 2, 5 y 8% de montmorillonita a la escoria Fayalítica para todas las temperaturas probadas. ....	95
Tabla 42. Análisis composicional mediante XRD para 1.275 y 1.300 °C a distintas cantidades de montmorillonita adicionada. ....	95
Tabla 43. Análisis químico micrografía SEM a la escoria sintética dopada con 2% de montmorillonita a 1.275 °C. ....	97

Tabla 44. Razón Fe/SiO <sub>2</sub> para distintas cantidades de caolinita adicionada y su consecuente viscosidad a 1.275 y 1.300 °C. ....	103
Tabla 45. Viscosidad experimental y modelada para distintas temperaturas y cantidades de caolinita adicionadas con sus respectivos errores.....	104
Tabla 46. Razón Fe/SiO <sub>2</sub> para distintas cantidades de montmorillonita adicionada y su consecuente viscosidad a 1.300 °C y 1.275 °C. ....	110
Tabla 47. Viscosidad experimental y modelada para distintas temperaturas y cantidades de montmorillonita adicionadas con sus respectivos errores. ....	111
Tabla 48. Contraste entre valores de viscosidad obtenidos al utilizar la geometría real, la modificada y el error entre los valores. ....	133
Tabla 49. Temperatura experimental, tasa de corte y viscosidad para la escoria estudiada.....	134
Tabla 50. Análisis químico micrografía SEM a escoria sintética sin dopar a 1.275 °C.....	149
Tabla 51. Análisis químico micrografía SEM a escoria sintética sin dopar a 1.300 °C.....	150
Tabla 52. Micrografía SEM escoria sintética dopada con 2% de montmorillonita a 1.275 °C...	151