

## TABLA DE CONTENIDO

|   |     |
|---|-----|
| TABLA DE CONTENIDO.....                           | iii |
| INDICE DE FIGURAS .....                           | v   |
| 1 INTRODUCCIÓN.....                               | 1   |
| 1.1 Presentación del tema.....                    | 1   |
| 1.2 Mercado .....                                 | 3   |
| 1.3 Consumo nacional.....                         | 6   |
| 2 OBJETIVOS.....                                  | 8   |
| 2.1 Definición del problema.....                  | 8   |
| 2.2 Objetivo general .....                        | 8   |
| 2.3 Objetivos específicos .....                   | 8   |
| 3 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....                    | 9   |
| 3.1 Tecnología de fusión CT .....                 | 10  |
| 3.1.1 Mata.....                                   | 14  |
| 3.1.2 Escorias.....                               | 18  |
| 3.1.3 Refractarios .....                          | 22  |
| 3.2 Refractarios.....                             | 27  |
| 3.2.1 Elaboración.....                            | 27  |
| 3.2.2 Propiedades ladrillos refractarios.....     | 36  |
| 3.2.3 Sistemas binarios de interés.....           | 38  |
| 3.2.4 Sistemas ternarios de interés .....         | 45  |
| 3.3 Mecanismos de desgaste.....                   | 50  |
| 3.3.1 Degradación Química .....                   | 50  |
| 3.3.2 Degradación térmica.....                    | 54  |
| 3.3.3 Desgaste mecánico .....                     | 57  |
| 3.4 Tipos de experimentos de laboratorio .....    | 58  |
| 3.4.1 Ensayo de inmersión o “finger test” .....   | 58  |
| 3.4.2 Ensayo de crisol o “cup test” .....         | 59  |
| 3.4.3 Ensayo de gota o “sessile drop test”.....   | 61  |
| 4 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....                 | 62  |
| 4.1 Selección de materiales nuevos.....           | 63  |
| 4.1.1 Propuestas de ladrillos refractarios.....   | 64  |
| 4.1.2 Propuestas de configuración para el CT..... | 65  |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 4.1.3 | Selección de materiales para pruebas.....   | 68  |
| 4.2   | Descripción de materiales y equipos.....  | 69  |
| 4.2.1 | Equipos.....  | 69  |
| 4.2.2 | Materiales .....  | 69  |
| 4.2.3 | Composición metal blanco y escoria .....  | 69  |
| 4.3   | Arreglo experimental .....  | 69  |
| 4.3.1 | Control de atmosfera .....  | 71  |
| 4.3.2 | Duración de la prueba .....   | 72  |
| 4.3.3 | Montaje en briquetas .....  | 72  |
| 4.3.4 | Desbaste y pulido .....   | 72  |
| 4.3.5 | Análisis SEM/EDS .....  | 73  |
| 4.4   | Procedimiento refractario actual.....   | 74  |
| 5     | RESULTADOS .....  | 75  |
| 5.1   | Refractario actual .....  | 75  |
| 5.2   | Pruebas de desgaste dinámico con metal blanco .....                               | 81  |
| 5.2.1 | Refractarios MgO.....   | 81  |
| 5.2.2 | Refractarios Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ..... | 87  |
| 5.2.3 | Refractarios SiC.....   | 95  |
| 5.2.4 | Refractarios MgO-Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....                             | 100 |
| 5.3   | Pruebas de degradación dinámica con escoria.....                                  | 115 |
| 5.3.1 | Refractarios SiC .....  | 115 |
| 5.3.2 | Refractario Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....                                  | 116 |
| 5.3.3 | Refractarios MgO-Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....                             | 118 |
| 6     | ANÁLISIS DE RESULTADOS .....  | 120 |
| 6.1   | Desgaste químico de refractario actual.....                                       | 120 |
| 6.1.1 | Causas operacionales .....  | 120 |
| 6.1.2 | Causas químicas .....   | 123 |
| 6.2   | Desgaste químico de nuevos materiales.....  | 129 |
| 6.2.1 | Refractarios MgO.....   | 129 |
| 6.2.2 | Refractarios Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ..... | 135 |
| 6.2.3 | Refractarios SiC.....   | 142 |
| 6.2.4 | Refractarios MgO-Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....                             | 146 |
| 6.2.5 | Infiltración de refractarios .....  | 152 |
| 6.3   | Propuesta de mampostería refractaria .....  | 155 |
| 7     | CONCLUSIONES .....  | 156 |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 7.1   | Mecanismos de desgaste del refractario actual .....                               | 156 |
| 7.2   | Materiales factibles de utilizar en el reactor Convertidor Teniente. ....         | 157 |
| 7.2.1 | Refractarios MgO.....   | 157 |
| 7.2.2 | Refractarios Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ..... | 158 |
| 7.2.3 | Refractarios de SIC .....   | 158 |
| 7.2.4 | Refractarios MgO-Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....                             | 158 |
| 8     | RECOMENDACIONES PARA ESTUDIOS FUTUROS.....  | 159 |
| 9     | BIBLIOGRAFIA.....   | 160 |

## INDICE DE FIGURAS

|            |  |    |
|------------|--|----|
| Figura 1.  | Estructura del presente trabajo .....  | 2  |
| Figura 2.  | Demanda porcentual de material refractario por industria.....  | 3  |
| Figura 3.  | Consumo de refractarios fabricados a partir de magnesita por región .....  | 4  |
| Figura 4.  | Consumos específicos de refractarios. (Goni <i>et al.</i> , 2006).....   | 6  |
| Figura 5.  | Costos anuales (MUS\$/año) para el consumo de refractarios .....   | 6  |
| Figura 6   | Diagrama del proceso de obtención de cobre metálico a partir de minerales sulfurados que lo contienen.....   | 9  |
| Figura 7   | Esquema General del Convertidor Teniente .....   | 12 |
| Figura 8.  | Vista del Convertidor Teniente (CT).....   | 13 |
| Figura 9   | Diagrama de fases del sistema Cu-S-Fe, 1250 °C.....  | 14 |
| Figura 10. | Diagrama binario Cu <sub>2</sub> S-FeS.....  | 15 |
| Figura 11. | Valores operacionales de Cu, Fe y S en el metal blanco .....   | 16 |
| Figura 12. | Valores operacionales de Cu, Fe, S y SiO <sub>2</sub> en el concentrado .....  | 17 |
| Figura 13  | Diagrama de fases SiO <sub>2</sub> - CaO - "FeO" (Hidayat, Hayes and Jak, 2012).....   | 19 |
| Figura 14  | Efecto de la razón Fe/SiO <sub>2</sub> en la escoria ferro-silíceo a pO <sub>2</sub> 10 <sup>-6</sup> atm.....   | 20 |
| Figura 15. | Valores operacionales de Cu, Fe, SiO <sub>2</sub> y Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> en la escoria .....   | 21 |
| Figura 16. | Valor operacional de razón Fe/SiO <sub>2</sub> en la escoria.....  | 21 |
| Figura 17. | Principales solicitaciones de un CT.....   | 22 |
| Figura 18. | Imágenes SEM ladrillo refractario nuevo usado en el CT. ....   | 24 |
| Figura 19. | Imágenes SEM ladrillo refractario, aumento (a)500X, (b) 1000X .....  | 25 |
| Figura 20. | Desgaste refractario CT1 (Fundición Caletones) zona de toberas.....  | 26 |
| Figura 21  | Desgaste refractario CT2 (Fundición Caletones) zona de toberas.....  | 26 |
| Figura 22. | Diagrama de empaquetamiento (Westman and Hugill, 1930).....  | 30 |
| Figura 23. | Curva de velocidad intrínseca de secado y la contracción del material (Perez, 2019). ....  | 31 |
| Figura 24. | Ejemplo de curva de calentamiento de refractario en un horno pirometalúrgico. Se señalan las etapas que conforman dicha curva. (Slovikovskii and Gulyaeva, 2015). .... | 33 |
| Figura 25. | Diagrama de flujo para fabricación de ladrillos (Taschler, 2004a).....   | 35 |
| Figura 26  | Diagrama de fases binario, sistema MgO-Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Muan and Osborn, 1965). ...   | 39 |
| Figura 27  | Diagrama binario, MgO-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Phillips, Bert, Somiya, Shigeyuki, Muan, 1961) .   | 40 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 28. Diagrama de fases binario, sistema MgO-SiO <sub>2</sub> . (Wu <i>et al.</i> , 1993).....  | 41 |
| Figura 29. Diagrama de fases binario, sistema MgO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Muan and Osborn, 1965)..   | 41 |
| Figura 30. Diagrama de fases binario, sistema MgO-CaO (W.J.M. van der Kemp, J.G. Blok, P.R. van der Linde, H.A.J. Oonk, 1994). .....   | 42 |
| Figura 31. Diagrama de fases binario, sistema Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Maun and Somiya, 1988)(Kulkarni, 2019).....  | 43 |
| Figura 32. Diagrama de fases binario, sistema Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> (Muan and Osborn, 1965).  | 43 |
| Figura 33. Diagrama de fases binario sistema Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -CaO(Kaiser, Sommer and Woermann, 1992).....   | 44 |
| Figura 34. Diagrama de fases binario, sistema Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Muan and Osborn, 1965) .   | 45 |
| Figura 35. Diagrama sistema MgO-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 1300°C (Smothers, 1968).....  | 46 |
| Figura 36. Diagrama de fases MgO-Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> (Keith, 1954) .....  | 47 |
| Figura 37. Diagrama MgO-Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> , Zoom del punto eutéctico ternario .....   | 47 |
| Figura 38. Diagrama de fases Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -MgO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Muan and Osborn, 1965). .....   | 48 |
| Figura 39. Diagrama de fase, sistema MgO-CaO-Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , FactSage 7.1.....  | 49 |
| Figura 40 Mecanismos de degradación del ladrillo refractario .....   | 50 |
| Figura 41. Diagrama binario Mg <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> – Fe <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> .....  | 51 |
| Figura 42 Diagrama de fases ternario isotérmico a 1300°C, sistema FeO-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -MgO.   | 52 |
| Figura 43. Diagrama de estabilidad Mg-Si-S-O a 1250[°C], FactSage 7.1.....   | 53 |
| Figura 44. (a) Perfil térmico del revestimiento refractario de un convertidor PS, temperaturas presentadas en [K] (Goñi, 2004). (b) Perfil térmico del refractario alrededor de la tobera de soplado en un CT (San Martín <i>et al.</i> , 2006).....   | 55 |
| Figura 45. Conductividad térmica del ladrillo infiltrado en función de la porosidad .....  | 56 |
| Figura 46. Evolución de la temperatura promedio del metal blanco en el CT .....  | 56 |
| Figura 47. Ensayos de inmersión. (a) Ensayo de inmersión estático, (b) Muestra de ensayo de inmersión estático(Petkov <i>et al.</i> , 2007), (c)Ensayo de inmersión dinámico , (d) Muestra de ensayo de inmersión dinámico (Malfliet, Lotfian, <i>et al.</i> , 2014) .....                                       | 59 |
| Figura 48. Tipos de ensayo de crisol. (a.1) Ensayo de crisol estático, (a.1) Muestra de ensayo cup test (Vadász and Medved, 2015), (b.1) Ensayo de horno de inducción, (b.2) Muestra de ensayo de inducción, (c.1) Ensayo rotatorio, (c.2) Realización de ensayo rotatorio (Gregurek <i>et al.</i> , 2017) ..... | 60 |
| Figura 49. Ensayo de gota .....  | 61 |
| Figura 50. Esquema de pruebas y selección de materiales refractarios .....   | 62 |
| Figura 51. Ingreso en ventas de principales empresas productoras de refractarios (RHI, 2017).....  | 63 |
| Figura 52 Identificación de refractarios según su composición base .....   | 68 |
| Figura 54 Arreglo experimental. Se observa a la izquierda el sistema de rotación de la probeta al interior del crisol por medio de la barra. ....  | 70 |
| Figura 55. Esquema del arreglo experimental (izquierda). Porta probeta soportada por barra concéntrica con crisol (derecha). .....   | 71 |
| Figura 56. Tren de gases del arreglo experimental .....  | 71 |
| Figura 57 (a) Probeta obtenida después de la prueba y (b) muestra montada en una briqueta de resina.....   | 72 |
| Figura 53 Muestra de ladrillo con uso zona de toberas.....   | 74 |
| Figura 53 Briquetas de refractario con uso .....   | 74 |
| Figura 53 Microscopio SEM/EDS.....   | 74 |
| Figura 58 Sección de ladrillo refractario de la zona de toberas del CT. (a) superficie de contacto con el siguiente ladrillo. (b) corte transversal del ladrillo.....  | 75 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 59 Microscopia 1, material adherido a la cara caliente del refractario .....  | 76  |
| Figura 60 Microscopia 2, material adherido a la cara caliente del refractario .....  | 77  |
| Figura 61 Microscopia 3, interacción material adherido a la cara caliente con el refractario .....   | 78  |
| Figura 62 Microscopia 4, Fases alteradas e infiltración en el ladrillo refractario .....   | 79  |
| Figura 63 Microscopia 4, Fases no alteradas del ladrillo refractario utilizado .....   | 80  |
| Figura 64. Muestra M1 .....  | 81  |
| Figura 65. Imagen BEI de la sección transversal a 1 cm desde la parte inferior de la probeta de prueba M1 posterior ensayo de desgaste. ....           | 81  |
| Figura 66. Imagen BEI en la zona de interacción entre la cara caliente de la probeta y el metal blanco a 1300°C. M1 posterior ensayo de desgaste. .... | 82  |
| Figura 67. Mapeo de elementos en el corte transversal de la probeta. ....  | 83  |
| Figura 68. Muestra M2 .....  | 84  |
| Figura 69. Imagen BEI de la sección transversal a 1 cm desde la parte inferior. M2 posterior ensayo de desgaste. ....                                  | 84  |
| Figura 70. Imagen BEI de la muestra M2 en la zona de interacción entre la cara caliente de la probeta y el metal blanco a 1300°C.....                  | 84  |
| Figura 71. Mapeo de elementos en el corte transversal de la probeta. ....  | 86  |
| Figura 72. Muestra M3 .....  | 87  |
| Figura 73. Imagen BEI de la sección transversal a 1 cm desde la parte inferior. M3 posterior ensayo de desgaste. ....                                  | 87  |
| Figura 74. Backscattering sobre la zona de interacción entre la cara caliente de la probeta y el metal Blanco a 1300°C .....                           | 88  |
| Figura 75. Mapeo de elementos en el corte transversal de la probeta. ....  | 89  |
| Figura 76. Muestra M4. ....  | 90  |
| Figura 77. Imagen BEI de la sección transversal a 1 cm desde la parte inferior. M4 posterior ensayo de desgaste. ....                                  | 90  |
| Figura 78. Imagen BEI en la zona de interacción entre la cara caliente de la probeta y el metal blanco a 1300°C. M3 posterior ensayo de desgaste. .... | 91  |
| Figura 79. Mapeo de elementos en el corte transversal de la probeta. ....  | 92  |
| Figura 80. Muestra M5. ....  | 93  |
| Figura 81. Imagen BEI de la sección transversal a 1 cm desde la parte inferior .....   | 93  |
| Figura 82. Imagen BEI en la zona de interacción entre la cara caliente de la probeta y el metal blanco a 1300°C. ....                                  | 94  |
| Figura 83. Mapeo de elementos en el corte transversal de la probeta. ....  | 94  |
| Figura 84. Muestra M6 .....  | 95  |
| Figura 85. Imagen BEI de la sección transversal a 1 cm desde la parte inferior. ....   | 95  |
| Figura 86. Imagen BEI en la zona de interacción entre la cara caliente de la probeta y el metal blanco a 1300°C. M6 posterior ensayo de desgaste. .... | 96  |
| Figura 87. Mapeo de elementos en el corte transversal de la probeta. ....  | 96  |
| Figura 88. Muestra M7 .....  | 97  |
| Figura 89. Imagen BEI de la sección transversal a 1 cm desde la parte inferior. ....   | 97  |
| Figura 90. Imagen BEI en la zona de interacción entre la cara caliente de la probeta y el metal blanco a 1300°C. ....                                  | 98  |
| Figura 91. Mapeo de elementos en el corte transversal de la probeta. ....  | 99  |
| Figura 92. Muestra M8 .....  | 100 |
| Figura 93. Imagen BEI de la sección transversal a 1 cm desde la parte inferior. M8 posterior ensayo de desgaste. ....                                  | 100 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 94. Imagen BEI en la zona de interacción entre la cara caliente de la probeta y el metal blanco a 1300°C. M8 posterior ensayo de desgaste. ....   | 101 |
| Figura 95. Mapeo de elementos en el corte transversal de la probeta. ....  | 102 |
| Figura 96. Muestra M9. ....  | 103 |
| Figura 97. Imagen BEI de la sección transversal a 1 cm desde la parte inferior. ....   | 103 |
| Figura 98. Imagen BEI en la zona de interacción entre la cara caliente de la probeta y el metal blanco a 1300°C. M9 posterior ensayo de desgaste. ....   | 104 |
| Figura 99. Mapeo de elementos en el corte transversal de la probeta. ....  | 105 |
| Figura 100. Muestra M10. ....  | 106 |
| Figura 101. Imagen BEI de la sección transversal a 1 cm desde la parte inferior. M9 posterior ensayo de desgaste. ....                                   | 106 |
| Figura 102. Imagen BEI refractario M10. ....   | 107 |
| Figura 103. Detalle de fases presentes en la zona de interacción. ....   | 107 |
| Figura 104. Mapeo de elementos en el corte transversal de la probeta. ....   | 108 |
| Figura 105. Muestra M11. ....  | 109 |
| Figura 106. Imagen BEI de la sección transversal a 1 cm desde la parte inferior. M11 posterior ensayo de desgaste. ....                                  | 109 |
| Figura 107. Imagen BEI en la zona de interacción entre la cara caliente de la probeta y el metal blanco a 1300°C. M11 posterior ensayo de desgaste. .... | 110 |
| Figura 108. Mapeo de elementos en el corte transversal de la probeta. ....   | 111 |
| Figura 109. Muestra M12. ....  | 112 |
| Figura 110. Imagen BEI de la sección transversal a 1 cm desde la parte inferior. M12 posterior ensayo de desgaste. ....                                  | 112 |
| Figura 111. Imagen BEI en la zona de interacción entre la cara caliente de la probeta y el metal blanco a 1300°C. M12 posterior ensayo de desgaste. .... | 113 |
| Figura 112. Mapeo de elementos en el corte transversal de la probeta. ....   | 114 |
| Figura 113. Microscopia refractario SiC. ....  | 115 |
| Figura 114. Microscopia refractario SiC. ....  | 115 |
| Figura 115. Microscopia refractario Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . ....  | 116 |
| Figura 116. Detalle microscopia refractario Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . ....  | 117 |
| Figura 117. Microscopia refractario MgO-Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . ....  | 118 |
| Figura 118. Detalle microscopia refractario MgO-Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . ....  | 118 |
| Figura 119 Velocidad de desgaste promedio de refractarios zona de toberas. ....  | 120 |
| Figura 120 Desgaste de refractarios por grupo de toberas. ....   | 121 |
| Figura 121 Desgaste de toberas por zona (junio 2018). ....   | 121 |
| Figura 122 Velocidad de desgaste de refractarios por grupo de toberas. ....  | 122 |
| Figura 123 Simulación fluidodinámica zona de agitación en el CT. ....  | 123 |
| Figura 124 Material adherido a la cara caliente del refractario usado, Tabla 17. ....  | 123 |
| Figura 125. O <sub>2</sub> requerido y PO <sub>2</sub> para conversión de 100 g de metal blanco (MB, 72%p de Cu) a 1250°C. ....                          | 124 |
| Figura 126 Binario Cu <sub>2</sub> O-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . ....   | 125 |
| Figura 127 Temperatura del gas dentro de la burbuja hasta su desprendimiento, 0.21 segundo, (Rosales, 2013),. ....                                       | 125 |
| Figura 128 Recubrimiento de magnetita para un PO <sub>2</sub> de 10 <sup>-5</sup> atm y 1300°C (González, Caley and Drew, 2005). ....                    | 126 |
| Figura 129. Microscopia de refractario zona de toberas utilizado en CT. ....   | 127 |
| Figura 130. Ternario MgO-Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Smothers, 1968). ....   | 128 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 131. Diagrama de fase pseudobinario del sistema MgO-CuO en aire. r: fase de periclasa cúbica; G <sub>A</sub> : Guggenita A, Cu <sub>2</sub> MgO <sub>3</sub> , fase ortorrómbica; G <sub>B</sub> : Guggenita B, Cu <sub>2</sub> MgO <sub>3</sub> , fase ortorrómbica; $\diamond$ region de una sola fase; * indica región de fase mixta. | 129 |
| Figura 132. Zona de interacción entre la cara caliente de la probeta y el metal blanco a 1300°C para refractario M1 y M2 alta magnesia.   | 130 |
| Figura 133. Distribución cualitativa de Cu, Fe y S en refractario M1.   | 130 |
| Figura 134. Resultado de pruebas de ángulo de mojabilidad en refractario MgO realizadas por N. Palma, (Nelson Palma, 2019).   | 131 |
| Figura 135. Distribución cualitativa de Cu, Fe y S en refractario M2.   | 131 |
| Figura 136 Diagrama de fases binario, sistema MgO-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .  | 132 |
| Figura 137. Ángulo de contacto vs tiempo durante un aumento de temperatura a 1230 C para Cu <sub>2</sub> S puro en MgO. (Parra, Voytovych and Eustathopoulos, 2007)   | 132 |
| Figura 138. Especies en equilibrio a PO <sub>2</sub> 10 <sup>-5</sup> a 10 <sup>-6</sup> atm para la mezcla de un refractario de MgO y mata a 1250°C.   | 134 |
| Figura 139. Imagen zona de interacción entre la cara caliente de la probeta y el metal blanco a 1300°C para refractario alta alúmina M3, M4 y M5.   | 135 |
| Figura 140 Diagrama de fases de a) CuO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> y Cu <sub>2</sub> O-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (S. K. Misra and A. C. D. Chaklader, 1963), b) Diagrama de fases FeO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .  | 136 |
| Figura 141 Mapeo SEM de muestra M1, M2 y M3   | 137 |
| Figura 142 Ternario Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub>  | 138 |
| Figura 143 Ternario Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> a 1500°C (Kulkarni, 2019)  | 138 |
| Figura 144 Composición de fases encontradas en las pruebas de corrosión con escoria (Muan, 1957)  | 139 |
| Figura 145. Detalle de especies en equilibrio a PO <sub>2</sub> 10 <sup>-5</sup> a 10 <sup>-6</sup> atm para la mezcla de un refractario de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> y mata de a 1250°C.  | 140 |
| Figura 146. Detalle de especies en equilibrio a PO <sub>2</sub> 10 <sup>-5</sup> a 10 <sup>-6</sup> atm para la mezcla de un refractario de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> y mata de a 1250°C.  | 141 |
| Figura 147. Resultados de microscopia de refractarios SiC.  | 142 |
| Figura 148. Especies en equilibrio a PO <sub>2</sub> 10 <sup>-5</sup> a 10 <sup>-6</sup> atm para la mezcla de un refractario de SiC y mata de a 1300°C.  | 143 |
| Figura 149. Especies en equilibrio a PO <sub>2</sub> 10 <sup>-5</sup> a 10 <sup>-6</sup> atm para la mezcla de un refractario de SiC y metal de a 1300°C.   | 144 |
| Figura 150. Corte transversal de probetas de refractarios SiC.  | 144 |
| Figura 151. Simulación FactSage para el comportamiento del refractario SiC en contacto con escoria etapa de fusión.   | 145 |
| Figura 152. Simulación del cambio de PO <sub>2</sub> , en la mezcla escoria-refractario SiC.  | 145 |
| Figura 153. Corte transversal de probetas de refractarios magnesia cromita  | 147 |
| Figura 156. Diagrama de fases Cu <sub>2</sub> O Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> SiO <sub>2</sub> para contenidos de MgO de 3%. ...   | 147 |
| Figura 157. Mapeo SEM refractario M8  | 148 |
| Figura 155. Ternario Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -MgO-Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Smothers, 1968).   | 148 |
| Figura 159. Efecto de la PO <sub>2</sub> en la reacción del metal blanco (72%p de Cu), con el refractario MgO-Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , a 1250°C.  | 149 |
| Figura 160. Efecto de la presión de soplado en la penetración y ascensión de la columna de aire de soplado en el baño.  | 150 |
| Figura 161. Simulación FactSage para el comportamiento del refractario MgO-Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> en contacto con escoria de fusión a 1300°C.   | 151 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 156. Simulación de especies en equilibrio para la mezcla de un refractario de MgO-Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> y mata a 1250°C.....            | 151 |
| Figura 157. Detalle de simulación de especies en equilibrio para la mezcla de un refractario de MgO-Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> y mata a 1250°C..... | 152 |
| Figura 162. Infiltración en función del tipos de ladrillo.....  | 154 |

## INDICE DE TABLAS

|  |     |
|--|-----|
| Tabla 1. Consumos de refractarios por segmento y consumos específicos (Routschka and Wuthnow, 2012).....       | 4   |
| Tabla 2. Valor Comparativo de diferentes refractarios en Alemania, año 2010 (Barthel and Routschka, 2012)..... | 5   |
| Tabla 3. Reacciones químicas en un CT.....   | 11  |
| Tabla 4. Parámetros y Características del Convertidor Teniente (CT).....                                       | 12  |
| Tabla 5. Solicitaciones por zona en el CT.....   | 22  |
| Tabla 6. Diferentes ladrillos magnesia-cromita usados en líneas de toberas.....                                | 23  |
| Tabla 7 Composición química ladrillo refractario %p/p (RHI, 2016).....   | 24  |
| Tabla 8 Composición química de las fases presentes en el ladrillo refractario sin atacar.....                  | 24  |
| Tabla 9 Minerales base y combinaciones para la elaboración de ladrillos refractarios ..                        | 27  |
| Tabla 10 Respuesta de empresas a solicitud de propuesta y materiales para prueba ...                           | 63  |
| Tabla 11 Materiales propuestos por proveedores y sus propiedades .....   | 64  |
| Tabla 12 Materiales propuestos por Refratechnik.....   | 65  |
| Tabla 13. Materiales propuestos por Refraline.....   | 66  |
| Tabla 14. Materiales propuestos por Verne-Krosaki .....  | 67  |
| Tabla 15. Identificación y agrupación de refractarios ensayados según su composición base.....                 | 68  |
| Tabla 16 Análisis EDS-SEM promedio para una muestra de Metal blanco y Escoria... ..                            | 69  |
| Tabla 17 Resultados microscopia 1, ladrillo refractario utilizado.....   | 76  |
| Tabla 18 Resultados microscopia 2, ladrillo refractario utilizado.....   | 77  |
| Tabla 19 Resultados microscopia 3, ladrillo refractario utilizado.....   | 78  |
| Tabla 20 Resultados microscopia 4 a ladrillo refractario utilizado.....  | 79  |
| Tabla 21 Resultados microscopia 5 a ladrillo refractario utilizado.....  | 80  |
| Tabla 22. Composición elemental EDS de las fases definidas en la Figura 65.....                                | 82  |
| Tabla 23. Composición elemental EDS refractario M2.....  | 85  |
| Tabla 24. Composición elemental EDS refractario M3.....  | 88  |
| Tabla 25. Composición elemental EDS refractario M4.....  | 91  |
| Tabla 26. Composición elemental EDS refractario M5.....  | 94  |
| Tabla 27. Composición elemental EDS refractario M6.....  | 96  |
| Tabla 28. Composición elemental EDS refractario M7.....  | 98  |
| Tabla 30. Composición elemental EDS refractario M8.....  | 101 |
| Tabla 32. Composición elemental EDS refractario M9.....  | 104 |
| Tabla 34. Composición elemental EDS refractario M10.....   | 107 |
| Tabla 35. Composición elemental EDS refractario M10.....   | 108 |
| Tabla 37. Composición elemental EDS refractario M11.....   | 110 |
| Tabla 39. Composición elemental EDS refractario M12.....   | 113 |
| Tabla 40. Composición elemental EDS refractario SiC atacado con escoria .....                                  | 116 |



|  |     |
|--|-----|
| Tabla 41. Composición elemental EDS refractario de $\text{Al}_2\text{O}_3$ atacado por escoria ..... | 117 |
| Tabla 42. Composición elemental EDS refractario $\text{MgO-Cr}_2\text{O}_3$ atacado por escoria....  | 119 |
| Tabla 43 Propiedades refractarios alta $\text{MgO}$ .....  | 129 |
| Tabla 44 Propiedades refractarios alta $\text{Al}_2\text{O}_3$ .....                                 | 135 |
| Tabla 45 Propiedades refractarios $\text{SiC}$ .....   | 142 |
| Tabla 46 Propiedades refractarios $\text{MgO-Cr}_2\text{O}_3$ .....                                  | 146 |
| Tabla 47. Resultados de infiltración pruebas de desgaste dinámico con MB.....                        | 153 |