



# ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



## FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

### CARACTERIZACIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO DE MATRIZ ALEACIÓN DE ALUMINIO-SILICIO REFORZADA CON PARTÍCULAS DE CARBURO DE SILICIO

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
MAGÍSTER EN DISEÑO, PRODUCCIÓN Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL

GUSTAVO ALFREDO BARONA LÓPEZ  
barona\_gustavo@hotmail.com

JUAN CARLOS GUILCAMAIGUA PADILLA  
juanguilqui@hotmail.com

DIRECTOR: Ing. Willan Leopoldo Monar Monar, M.Sc.  
william.monar@epn.edu.ec

Quito, Abril, 2018

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por los señores Gustavo Alfredo Barona López y Juan Carlos Guilcamaigua Padilla, bajo mi supervisión.

---

**Ing. Willan Monar M, M.Sc.**

**DIRECTOR DE PROYECTO**

## **DECLARACIÓN**

Nosotros, Gustavo Alfredo Barona López y Juan Carlos Guilcamaigua Padilla, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

**Gustavo Alfredo Barona López**

---

**Juan Carlos Guilcamaigua Padilla**

## **AGRADECIMIENTOS**

Doy un especial agradecimiento a la Señora Martha Antonieta López Peñaloza y al Señor Luis Alfredo Barona Sánchez, mis padres.

Un agradecimiento a Diana Carolina Posso Pasquel y Lorena Barona, quienes formaron parte de este proyecto de investigación.

También, agradezco a mis hermanos Gisela, Pablo, Efraín, Eulalia, Paulina, Carolina y Ximena, como a mi cuñado Patricio López por ser parte de mi familia.

Un agradecimiento a mis cuñados Edwin Zumbana y a Juan Morales Manzano.

Al Ing. Willan Monar M.Sc., por ser nuestro director de tesis, que con su paciencia y tranquilidad, me transmitió la confianza para sacar adelante este proyecto.

Al Tlgo. Fabián Peñaloza, Ing. Oscar Sotomayor M.Sc., Ing. Fausto Oviedo M.Sc., e Ing. Javier Montalvo M.Sc., por toda la libertad, apertura, confianza, y además de crear un ambiente agradable en el Laboratorio de Fundición de la Facultad de Ingeniería Mecánica, donde se desarrolló la mayor parte de este proyecto de investigación y fabricación de un material compuesto.

A la Ing. Enith Vanessa Yánez por su ayuda mientras cursaba la maestría, al Ing. Kleber Campaña por su esfuerzo con los análisis de microscopía electrónica de barrido, al Técnico Luis Guamán por su ayuda en el Laboratorio de Máquinas Herramientas, y a mi compañero de tesis.

A todos los laboratorios que fueron pilar fundamental para la fabricación y caracterización del material compuesto realizado en este proyecto de investigación.

Un agradecimiento a todos los autores, industrias, organizaciones y compañías, que aportaron con sus investigaciones para el desarrollo de este proyecto de investigación. Y que han sido citadas a lo largo de la redacción y en las referencias bibliográficas.

**Gustavo Alfredo Barona López**



## **AGRADECIMIENTOS**

Mi eterna gratitud a Dios por darme la sabiduría y el Don de entendimiento para poder culminar con éxito este trabajo, a mi director de Tesis el M.Sc. Willan Monar por su guía y contribución, a mis padres por ser ese pilar fundamental en todo lo propuesto, a mis hermanos y sobrinas por sus consejos y sus palabras de apoyo, a mi esposa por su ayuda incondicional, a mi compañero de tesis por su apoyo y amistad que me permitieron aprender mucho más, al laboratorio de fundición de la facultad de Ingeniería Mecánica por prestarnos todas las facilidades necesarias para elaborar con éxito este proyecto y en general mil gracias a todas las personas que de una u otra manera contribuyeron para finalizar con éxito esta carrera.

**Juan Carlos Guilcamaigua Padilla**

## **DEDICATORIA**

Este proyecto de investigación va dedicado a aquellas personas y profesionales que se apasionan por la investigación con el fin de obtener no solo nuevos conocimientos, sino que van más allá de sus dudas e inquietudes para encontrar un conocimiento más profundo que logre darles respuestas hasta sentir felicidad. Para aquellas personas que tienen una meta, la construyen y la perfeccionan todos los días hasta conseguirla. A todos los profesionales que encuentran en su fortuna la ciencia, reconociendo con respeto que para hacer ciencia aplicada va de la mano un conocimiento teórico como un conocimiento experimental, ni el uno es más, ni el otro es menos. A las personas que entienden que un conocimiento más profundo es a la vez difícil y gratificante de conseguir. Por último, va dedicado a las personas que ayudan a contribuir con el desarrollo de la sociedad sin ningún interés económico, lo cual tiene un valor que no se mide en dinero.

**Gustavo Alfredo Barona López**

## **DEDICATORIA**

Este trabajo va dedicado con mucho cariño a mis padres Gustavo y María Hortensia que me han apoyado, guiado y han sabido darme las virtudes necesarias para ser un hombre de bien.

A mis sobrinas Karen, Maryuri, Carolina, Monserrat, Samanta, Michael y en especial a mi querida Joselyn que desde el cielo ha guiado correctamente mis pasos durante esta etapa de mi vida

A mi esposa y su hija Layla por su cariño y por la paciencia prestada que permitieron terminar este trabajo.

A mis hermanos Cristian, Jorge Amparito, Wilmer y Marcelo por darme la fuerza necesaria, de corazón que Dios los bendiga y les de muchos años más de vida.

**Juan Carlos Guilcamaigua Padilla**

# ÍNDICE

Certificación.....	ii
Declaración.....	iii
Agradecimientos .....	iv
Dedicatoria.....	vi
Índice.....	viii
Índice de figuras.....	xv
Índice de tablas .....	xix
Resumen .....	xxii
Abstract.....	xxiii
Introducción.....	xxiv
Objetivo general .....	xxv
Objetivos específicos .....	xxv
Alcance .....	xxvi
<b>1. ALUMINIO Y SUS ALEACIONES .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Historia del aluminio .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Obtención del aluminio a nivel industrial.....</b>	<b>2</b>
1.2.1. Bauxita .....	2
1.2.2. Alúmina (óxido de aluminio).....	3
1.2.3. Aluminio primario .....	3
1.2.4. Aluminio secundario.....	4
1.2.5. Reciclaje de aluminio.....	4
<b>1.3. Industria del aluminio .....</b>	<b>5</b>
1.3.1. Grados de pureza del aluminio.....	5
1.3.2. Aleaciones de aluminio.....	6
1.3.3. Series para identificación del aluminio y sus aleaciones .....	7
1.3.4. Designación para tratamientos del aluminio y sus aleaciones .....	9
<b>1.4. Propiedades del aluminio y silicio.....</b>	<b>9</b>
1.4.1. Propiedades de aluminio.....	10
1.4.2. Propiedades del silicio.....	10
1.4.3. Efecto del silicio en las propiedades tecnológicas de las aleaciones fundidas aluminio-silicio .....	11

<b>1.5. Aplicaciones industriales de aleaciones Al-Si.....</b>	<b>12</b>
<b>1.6. Procesos de fabricación por fundición de Al-Si.....</b>	<b>13</b>
1.6.1. Métodos de fundición para aleaciones aluminio-silicio .....	13
1.6.2. Fundición en molde desechable de arena aglutinada.....	13
1.6.3. Fundición en molde desechable de arena aglomerada .....	14
1.6.4. Fundición en molde permanente die casting.....	15
1.6.5. Fundición en molde permanente con proceso híbrido squeeze casting .....	16
<b>2. MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ METÁLICA.....</b>	<b>17</b>
<b>2.1. Historia de los materiales compuestos de matriz metálica (MCMM) .....</b>	<b>17</b>
<b>2.2. Clasificación actual de los materiales .....</b>	<b>17</b>
<b>2.3. Materiales compuestos (MC).....</b>	<b>18</b>
2.3.1. Material compuesto (composite) .....	18
2.3.2. Componentes de los materiales compuestos .....	18
2.3.3. Clasificación de los materiales compuestos (composite) .....	19
<b>2.4. Material compuesto de matriz metálica (MCMM).....</b>	<b>19</b>
2.4.1. Componentes de un MCMM .....	19
2.4.2. Clasificación de los MCMM.....	20
2.4.3. Criterio para seleccionar matriz metálica y refuerzo .....	21
2.4.4. Función de la matriz metálica, refuerzo e interfaz .....	22
2.4.5. Codificación para MCMM de aluminio y sus aleaciones.....	23
<b>2.5. Matrices metálicas de aleación aluminio-silicio .....</b>	<b>23</b>
<b>2.6. Refuerzos empleados para matrices metálicas.....</b>	<b>24</b>
2.6.1. Refuerzo tipo fibras y tipo partículas.....	24
2.6.2. Refuerzo tipo partículas de carburo de silicio .....	24
2.6.3. Comparación de refuerzos tipo partículas y tipo fibras .....	25
<b>2.7. Interfaz matriz metálica-refuerzo cerámico.....</b>	<b>25</b>
2.7.1. Unión química metal-cerámica .....	26
2.7.1.1. Mojabilidad de líquidos sobre sólidos .....	27
2.7.1.2. Mojadura por inmersión de partículas de SiC en aleaciones líquidas de Al-Si .....	28
2.7.1.3. Parámetros para mejorar la mojabilidad entre matrices de aleación de Al-Si y refuerzos tipo partículas de SiC .....	28
2.7.2. Reacción química matriz metálica-refuerzo cerámico.....	30
2.7.2.1. Reacción química de aleaciones fundidas de aluminio con partículas sólidas de SiC .....	31
2.7.2.2. Control para evitar la formación de la interfaz Al <sub>4</sub> C <sub>3</sub> y mejora de la mojabilidad .....	33
<b>2.8. Procesos de fabricación de MCMM .....</b>	<b>35</b>
<b>2.9. Agitación para la obtención de MCMM.....</b>	<b>37</b>
2.9.1. Agitación y mezcla .....	37

2.9.2. Tipos de agitadores .....	37
2.9.3. Teoría de la suspensión de partículas sólidas en líquidos agitados.....	37
2.9.3.1. Tipo y dimensiones de las aspas del agitador.....	38
2.9.3.2. Velocidad de rotación de las aspas del agitador .....	38
<b>2.10. Parámetros que afectan y mejoran el proceso de fabricación del MCM Al-Si reforzada con partículas de SiC vía stir casting.....</b>	<b>39</b>
2.10.1. Porosidad a causa de la presencia de hidrógeno.....	39
2.10.2. Control de la porosidad a causa de la presencia de hidrógeno .....	41
2.10.3. Porosidad por la incompleta combustión del horno .....	42
2.10.4. Formación de escoria e inclusiones no metálicas causantes de pérdidas de material fundido .....	43
2.10.5. Control de escoria e inclusiones no metálicas que evita pérdidas de material por procesos de fusión de chatarra.....	44
2.10.6. Recubrimiento de herramientas utilizadas en la aleación fundida.....	44
2.10.7. Aplicación de fundentes para la limpieza y mejora de la aleación fundida .....	44
2.10.8. Formación de la interfaz carburo de aluminio ( $Al_4C_3$ ) y mejora de la mojabilidad.....	45
2.10.9. Control para evitar la formación de $Al_4C_3$ .....	45
2.10.10. Porosidad por efecto de la adición de partículas de SiC .....	45
2.10.11. Calentamiento de las partículas de SiC antes de ser adicionadas a la matriz líquida .....	46
2.10.12. Efectos de la adición de magnesio a una aleación Al-Si+Mg .....	46
2.10.13. Tipo de molde utilizado en el colado.....	47
<b>2.11. Moldura de fundición .....</b>	<b>47</b>
<b>3. MATERIAL COMPUESTO DE MATRIZ ALEACIÓN ALUMINIO-SILICIO ANSI AA 365.0 REFORZADA CON PARTÍCULAS DE CARBURO DE SILICIO MALLA #400 .....</b>	<b>48</b>
<b>3.1. Matriz metálica de aleación Al-Si ANSI AA 365.0 .....</b>	<b>48</b>
3.1.1. Selección de la aleación Al-Si ANSI AA 365.0.....	48
3.1.2. Composición química de la aleación ANSI AA 365.0.....	52
3.1.3. Propiedades de la aleación comercial ANSI AA 365.0 .....	53
<b>3.2. Refuerzo cerámico tipo partículas de SiC malla #400.....</b>	<b>56</b>
3.2.1. Selección del refuerzo cerámico SiC .....	56
3.2.2. Selección del tamaño de las partículas cerámicas de SiC .....	57
3.2.3. Propiedades del polvo de SiC malla #400.....	59
<b>3.3. Materiales secundarios para mejorar el proceso de fabricación del MCM 365.0 reforzada con partículas de SiC malla #400 .....</b>	<b>59</b>
<b>3.4. Selección del proceso de fabricación stir casting .....</b>	<b>61</b>
<b>3.5. Solidificación de lingotes cilíndricos de aleación 365.0 y de MC 365.0/SiC/%p en molde de arena .....</b>	<b>61</b>

3.5.1. Macroestructura del lingote 365.0 solidificado en un molde de arena .....	62
3.5.2. Solidificación del lingote Al-Si 365.0 .....	63
3.5.3. Solidificación del lingote de MC 365.0/SiC/%p .....	64
<b>3.6. Construcción del equipo stir casting para la dispersión de las partículas de SiC malla #400 en la matriz fundida Al-Si 365.0.....</b>	<b>65</b>
3.6.1. Proceso de fabricación vía stir casting .....	65
3.6.2. Selección del horno de fundición.....	66
3.6.3. Diseño de la moldura de fundición del composite 365.0/SiC/%p.....	67
3.6.4. Determinación de la masa de la moldura de fundición .....	68
3.6.5. Construcción del equipo stir casting .....	69
3.6.5.1. Estructura del stir casting.....	70
3.6.5.2. Motor eléctrico.....	70
3.6.5.3. Variador de frecuencia .....	71
3.6.5.4. Estructura solidaria del motor eléctrico.....	71
3.6.5.5. Acople eje motor-eje agitador.....	71
3.6.5.6. Rodamiento de brida NSK UCP201-08 .....	72
3.6.5.7. Soporte para rodamiento de brida .....	72
3.6.5.8. Base apoyo.....	72
3.6.5.9. Tapa del crisol .....	73
3.6.5.10. Crisol tipo ensamble .....	73
3.6.5.11. Agitador .....	74
3.6.5.12. Ensamble del stir casting .....	77
<b>3.7. Colado del composite 365.0/SiC/%p en molde de arena aglomerada con resina orgánica autofraguante .....</b>	<b>78</b>
3.7.1. Ventajas al utilizar un aglomerante orgánico en la arena de moldeo .....	78
3.7.2. Elaboración del modelo de madera.....	78
3.7.3. Elaboración del molde de arena aglomerada con resina orgánica autofraguante.....	79
<b>3.8. Microestructura de aleaciones Al-Si y de MCM</b> .....	<b>79</b>
<b>3.9. Aplicaciones industriales .....</b>	<b>80</b>
<b>4. FABRICACIÓN DE LINGOTES CILÍNDRICOS Y PREPARACIÓN DE PROBETAS DE MCM ANSI AA 365.0 REFORZADA CON PARTÍCULAS DE SiC MALLA #400.....</b>	<b>82</b>
<b>4.1. Elementos y materiales utilizados en las pruebas preliminares .....</b>	<b>82</b>
<b>4.2. Pruebas preliminares para la dispersión del polvo de SiC malla #400.....</b>	<b>87</b>
4.2.1. Prueba preliminar 01 .....	87
4.2.2. Prueba preliminar 02 .....	88
4.2.3. Prueba preliminar 03 .....	91
4.2.4. Prueba preliminar 04 .....	92

4.2.5. Prueba preliminar 05 .....	94
4.2.6. Prueba preliminar 06 .....	95
4.2.7. Prueba preliminar 07 .....	98
4.2.8. Prueba preliminar 08 .....	101
4.2.9. Prueba preliminar 09 .....	102
4.2.10. Prueba preliminar 10 .....	104
4.2.11. Prueba preliminar 11 .....	105
4.2.12. Prueba preliminar 12 .....	109
4.2.13. Prueba preliminar 13 .....	111
4.2.14. Observaciones .....	115
<b>4.3. Codificación para lingotes cilíndricos y probetas.....</b>	<b>116</b>
<b>4.4. Constituyentes y materiales utilizados para la fabricación de lingotes cilíndricos de MCMM ANSI AA 365.0 reforzada con partículas de SiC malla #400.....</b>	<b>117</b>
<b>4.5. Proceso de fabricación de lingotes cilíndricos de MCMM Al-Si 365.0 reforzada con partículas de SiC malla #400 vía stir casting .....</b>	<b>119</b>
4.5.1. Preparación del constituyente matriz aleación Al-Si 365.0.....	120
4.5.2. Preparación del constituyente refuerzo SiC malla #400 .....	121
4.5.3. Preparación de los materiales secundarios .....	121
4.5.4. Preparación del horno de fundición .....	121
4.5.5. Preparación de herramientas.....	122
4.5.6. Preparación de las cantidades en masa de los constituyentes y materiales .....	124
4.5.7. Preparación del molde de arena para colar el composite.....	126
4.5.8. Limpieza del horno de fundición y crisol tipo ensamble .....	127
4.5.9. Montaje de la estructura del stir casting .....	127
4.5.10. Montaje de los elementos de rotación del stir casting .....	127
4.5.11. Centrado de las aspas del agitador en el interior del crisol .....	128
4.5.12. Calentamiento del polvo SiC malla #400.....	129
4.5.13. Encendido del horno de fundición .....	129
4.5.14. Calentamiento del horno-crisol-matriz 365.0 .....	130
4.5.15. Introducción de la matriz Al-Si 365.0 en el interior del crisol.....	130
4.5.16. Fusión de la matriz Al-Si 365.0 en el interior del crisol .....	131
4.5.17. Adición del magnesio sólido en la matriz fundida 365.0 .....	132
4.5.18. Adición del afinador de grano en la matriz fundida 365.0.....	133
4.5.19. Aplicación de la segunda carga de escorificante .....	133
4.5.20. Aplicación del desgasificante apartagas H7-50.....	134
4.5.21. Introducción de las aspas en la matriz fundida 365.0 y colocación de la tapa en el crisol	135
4.5.22. Adición del polvo cerámico SiC para reforzar la matriz fundida 365.0 .....	135
4.5.23. Desgasificación con gas argón de la masa fundida aleación Al-Si 365.0-SiC malla #400	136



4.5.24. Colado de la masa fundida Al-Si 365.0-SiC en molde de arena.....	137
4.5.25. Extracción de los lingotes de material compuesto del molde de arena .....	138
<b>4.6. Materiales y parámetros utilizados en el proceso de fabricación de lingotes cilíndricos 365.0, 365.0/SiC/2p, 365.0/SiC/4p y 365.0/SiC/6p .....</b>	<b>138</b>
4.6.1. Lingotes cilíndricos de material 365.0.....	138
4.6.2. Lingotes cilíndricos de MCMM 365.0/SiC/2p .....	140
4.6.3. Lingotes cilíndricos de MCMM 365.0/SiC/4p .....	141
4.6.4. Lingotes cilíndricos de MCMM 365.0/SiC/6p .....	142
4.6.5. Lingotes cilíndricos previo maquinado para la preparación de probetas .....	143
<b>4.7. Preparación de probetas para ensayo de tracción .....</b>	<b>143</b>
<b>4.8. Preparación de probetas para ensayo de dureza .....</b>	<b>144</b>
<b>4.9. Preparación de probetas para ensayo metalográfico mediante microscopio óptico ....</b>	<b>146</b>
<b>4.10. Costo del proyecto de fabricación del composite.....</b>	<b>147</b>
4.10.1. Costo de materiales mecánicos y eléctricos .....	147
4.10.2. Costo de componentes y elementos disponibles en el mercado .....	148
4.10.3. Costos indirectos.....	149
4.10.4. Costo de manufactura de elementos y partes del stir casting.....	149
4.10.5. Costo de manufactura de herramientas utilizadas para el desarrollo de pruebas preliminares y el proceso de fabricación del composite .....	150
4.10.6. Costo de manufactura de elementos y partes utilizadas para el desarrollo de las pruebas preliminares.....	151
4.10.7. Costo de materiales para el desarrollo de pruebas preliminares.....	153
4.10.8. Costo de ingeniería.....	153
4.10.9. Costo de elaboración de probetas y ensayos de laboratorio .....	154
4.10.10. Costo de materiales para la obtención de tres lingotes cilíndricos de MC 365.0/SiC/6p .	154
4.10.11. Costos de oficina y coordinación.....	155
4.10.12. Costo total del proyecto de investigación.....	155
<b>5. CARACTERIZACIÓN DEL LOS MATERIALES FABRICADOS .....</b>	<b>156</b>
<b>5.1. Resultados del ensayo de tracción .....</b>	<b>156</b>
<b>5.2. Resultados del ensayo de dureza Brinell.....</b>	<b>157</b>
<b>5.3. Resultados del ensayo metalográfico mediante microscopio óptico .....</b>	<b>158</b>
<b>5.4. Resultados de la densidad .....</b>	<b>160</b>
<b>5.5. Análisis y comparación de resultados .....</b>	<b>160</b>
5.5.1. Valores de las propiedades de los materiales fabricados.....	160
5.5.2. Análisis de los valores de tracción .....	161
5.5.3. Análisis de la dureza.....	163
5.5.4. Análisis microestructural del ensayo metalográfico mediante microscopio óptico .....	163

5.5.4.1. Análisis de la microestructura 365.0 .....	163
5.5.4.2. Análisis de la microestructura 365.0/SiC/2p .....	165
5.5.4.3. Análisis de la microestructura 365.0/SiC/4p .....	166
5.5.4.4. Análisis de la microestructura 365.0/SiC/6p .....	167
<b>5.6. Potenciales aplicaciones y comparaciones de los MC 365.0/SiC/6p y C-365.0/SiC/6p con diversos materiales.....</b>	<b>169</b>
<b>6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>171</b>
<b>6.1. Conclusiones.....</b>	<b>171</b>
<b>6.2. Recomendaciones.....</b>	<b>173</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>174</b>
Anexos .....	180
Anexo A1. Norma ANSI H35.1 standards para la designación de tratamientos .....	181
Anexo A2. Potenciales aplicaciones de los MCM .....	182
Anexo A3. Características principales de los agitadores según el tipo de rodete .....	184
Anexo A4. Partes automotrices adquiridas para el proyecto de investigación .....	185
Anexo A5. Resultados del análisis de elementos químicos del block de un automóvil Honda civic y del cabezote 4ZD1 de un automóvil Isuzu .....	186
Anexo A6. Resultado del análisis de elementos químicos del cabezote de un automóvil Honda civic .....	187
Anexo A7. Hoja de compra del polvo de SiC malla #400 y ficha de presentación de propiedades principales .....	188
Anexo A8. Análisis de la distribución del tamaño de partícula del SiC malla #400 mediante dispersión dinámica de luz .....	189
Anexo A9. Ficha técnica del fundente escorificante alu fundex extra .....	191
Anexo A10. Ficha técnica del fundente desgasificante apartagas H7-50 .....	193
Anexo A11. Ficha técnica de la pintura refractaria injemaq AI 397 .....	196
Anexo A12. Planos del equipo stir casting .....	198
Anexo A13. Ficha técnica del molde de arena aglomerada con resina orgánica autofraguante ...	208
Anexo A14. Ficha técnica del polvo de magnesio .....	209
Anexo A15. Resultados del análisis químico semi-cuantitativo del aro de rueda para automóvil .	210
Anexo A16. Resultados de la difracción de rayos x al residuo sólido de MC 365.0/SiC/5p .....	211
Anexo A17. Planos de maquinado de los lingotes cilíndricos para la obtención de probetas .....	213
Anexo A18. Diagramas esfuerzo deformación de las probetas realizadas el ensayo de tracción .	217
Anexo A19. Informe técnico de ensayos de tracción.....	222
Anexo A20. Informe técnico de ensayos de dureza .....	224
Anexo A21. MC C-365.0/SiC/6p colado en coquilla de acero .....	225

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Proceso de obtención de aluminio primario a partir de la alúmina. ....	4
Figura 1.2. Diagrama de flujo del aluminio y su reciclaje en los Estados Unidos. ....	5
Figura 1.3. Porción de metal de Al formado por estructuras cristalinas CCC. ....	10
Figura 1.4. Fundición en molde desechable de arena aglutinada. ....	14
Figura 1.5. Fundición de un block de cilindros en molde desechable de arena aglomerada. ....	15
Figura 1.6. Fundición en molde permanente die casting. ....	16
Figura 1.7. Fundición en molde permanente squeeze casting. ....	16
Figura 2.1. Clasificación actual de los materiales incluidos los composites según Ashby. ....	18
Figura 2.2. Elementos que conforman un material compuesto. ....	19
Figura 2.3. Clasificación de los MCMM según su tipo de refuerzo. ....	20
Figura 2.4. Codificación para MCMM de aluminio y sus aleaciones. ....	23
Figura 2.5. Clases de mojadura. ....	26
Figura 2.6. Mojabilidad de una gota líquida sobre una superficie sólida (a) sistema que moja y (b) sistema que no moja o moja parcialmente. ....	27
Figura 2.7. Micrografía de un MC AA 356/SiC/10p al: (a) 0,4%, (b) 1% y (c) 3,2% de Mg. ....	30
Figura 2.8. Formación de $Al_4C_3$ y Si por reacción de aluminio con las partículas de SiC. ....	32
Figura 2.9. Microestructura del MC AA 2014/SiC/13p donde se formó $Al_4C_3$ a temperaturas de fundición de: (a) mantenida a 750 °C por 20 min y (b) mantenida a 850 °C por 30 min. ....	32
Figura 2.10. Microestructura del MC AA 1170/SiC/30p que muestra formación de $Al_4C_3$ alrededor de las partículas de SiC: (a) mantenida a 900 °C por 20 min y (b) mantenida a 900 °C por 60 min. ....	33
Figura 2.11. MEB del MC AA 1170/SiC/30p con sus partículas de SiC oxidadas a 1200 °C por 2 h. ....	35
Figura 2.12. Mecanismos de disolución de hidrógeno en el aluminio fundido a partir de la humedad en la atmosfera. ....	40
Figura 2.13. Solubilidad de hidrógeno en varios tipos de aluminio. ....	41
Figura 2.14. Química del aluminio fundido. ....	43
Figura 2.15. Elementos que conforman la moldura de fundición. ....	47
Figura 3.1. Block, cabezote y múltiples de escape y admisión de un automóvil Honda Civic 1973. ....	50
Figura 3.2. Cabezote 4ZD1 de un motor de automóvil Isuzu. ....	50
Figura 3.3. Temperatura de fusión referente para la fundición de la matriz 365.0 a partir del diagrama de fases Al-Si. ....	54
Figura 3.4. Diagrama de fases pseudo-binario Al-Mg <sub>2</sub> Si. ....	55
Figura 3.5. Polvo de SiC malla #400 para reforzar la matriz metálica 365.0. ....	58
Figura 3.6. Fundentes alu fundex extra (rosado) apartagas H7-50 (azul) y Al5TiB (plateado). ....	60
Figura 3.7. Posible macroestructura de un lingote cilíndrico solidificado en molde de arena. ....	62
Figura 3.8. Microestructura de la aleación hipoeutéctica Silafont-36. ....	64
Figura 3.9. Solidificación de un composite. ....	65

Figura 3.10. Diseño esquemático del equipo stir casting. ....	66
Figura 3.11. Horno de fundición alimentado por gas con crisol intercambiable. ....	67
Figura 3.12. Diseño de la moldura de fundición para el colado de los lingotes cilíndricos de MC. ....	68
Figura 3.13. Volumen de la moldura de fundición para el cálculo de su masa. ....	69
Figura 3.14. Diseño y construcción de la estructura del stir casting. ....	70
Figura 3.15. Motor eléctrico para la rotación del eje del agitador. ....	70
Figura 3.16. Variador de control de frecuencia. ....	71
Figura 3.17. Estructura solidaria del motor eléctrico. ....	71
Figura 3.18. Diseño y construcción del acople eje motor-eje agitador. ....	72
Figura 3.19. Rodamiento de brida NSK UCP201-08. ....	72
Figura 3.20. Diseño y construcción del soporte para rodamiento de brida. ....	72
Figura 3.21. Diseño y construcción de la base apoyo. ....	73
Figura 3.22. Diseño y construcción de la tapa del crisol. ....	73
Figura 3.23. Diseño y construcción del crisol tipo ensamble. ....	74
Figura 3.24. Diseño y construcción del agitador tipo paletas planas. ....	76
Figura 3.25. Ensamble motor eléctrico-estructura solidaria-agitador. ....	76
Figura 3.26. Ensamble final de partes y elementos diseñados. ....	77
Figura 3.27. Montaje del diseño del equipo stir casting en el horno de fundición. ....	77
Figura 3.28. Ensamble final de partes y elementos fabricados. ....	78
Figura 3.29. Fabricación del modelo de madera para la elaboración del molde de arena. ....	79
Figura 3.30. Molde de arena aglomerada con resina orgánica autofraguante. ....	79
Figura 4.1. Sistema de agitación stir casting. ....	83
Figura 4.2. Tapa del stir casting. ....	83
Figura 4.3. Crisol arcilla-grafito #18 marca diamant con sus debidas dimensiones. ....	83
Figura 4.4. Estructura de acero para el calentamiento del polvo de SiC en plato de arcilla. ....	84
Figura 4.5. Molde de arena para colada horizontal. ....	84
Figura 4.6. Molde de arena para colada vertical. ....	84
Figura 4.7. Pistones utilizados como material matriz en las pruebas preliminares. ....	85
Figura 4.8. Herramientas construidas para el manejo de la fundición. ....	86
Figura 4.9. Embudo de acero para la adición del polvo de SiC en la matriz fundida. ....	90
Figura 4.10. Lingotes de MC con masa residual además del corte y fractura del lingote 2A. ....	90
Figura 4.11. Microestructura por MEB a una probeta del lingote 2A. ....	91
Figura 4.12. Lingotes de MC 3A y 3B. ....	92
Figura 4.13. Lingotes de MC con corte y fractura del lingote 4C. ....	94
Figura 4.14. Lingotes de MC con corte y fractura del lingote 5D. ....	95
Figura 4.15. Microestructura por MEB a una probeta del lingote 5D. ....	95
Figura 4.16. Lingotes de MC con corte y fractura del lingote 6B. ....	97
Figura 4.17. Microestructura por MEB a una muestra del lingote 6A. ....	97
Figura 4.18. Horno de resistencia eléctrica con los recipientes utilizados para calentar el SiC. ....	99
Figura 4.19. Polvo metálico de magnesio. ....	99
Figura 4.20. Lanza para el desgasificado del MC. ....	100

Figura 4.21. Lingotes de MC con corte y fractura del lingote 7B. ....	100
Figura 4.22. Microestructura por MEB a una probeta del lingote 7A. ....	100
Figura 4.23. Óxido de magnesio formado sobre la superficie de la matriz fundida. ....	101
Figura 4.24. Aro de rueda de aleación Mg-Al (93%Mg-7%Al). ....	103
Figura 4.25. Lingotes de MC con corte transversal y una fractura en el lingote 10A. ....	105
Figura 4.26. Molde de arena aglomerada y lingotes de MC 365.0/SiC/5p. ....	107
Figura 4.27. Microestructura por MEB a una muestra del lingote central. ....	108
Figura 4.28. Residuo sólido del MC 365.0/SiC/5p y limallas obtenidas. ....	108
Figura 4.29. Tapa de acero del crisol. ....	110
Figura 4.30. Polvo de SiC colocado en la tapa del crisol para adicionarlo a la matriz fundida. ....	110
Figura 4.31. Lanza de desgasificado rediseñada. ....	111
Figura 4.32. Lingotes de MC con corte y fractura del lingote 12C. ....	111
Figura 4.33. Microestructura por MEB a una muestra del lingote 12B. ....	111
Figura 4.34. Crisol de acero con su tapa. ....	113
Figura 4.35. Campana de argón construida con conexión a su tanque. ....	114
Figura 4.36. Lingotes de MC con corte y fractura del lingote 13A. ....	115
Figura 4.37. Microestructura por MEB a una muestra del lingote 13A. ....	115
Figura 4.38. Block de cilindros Al-Si 365.0 removido la suciedad superficial. ....	120
Figura 4.39. Block de cilindros Al-Si 365.0: (a) cortado en pedazos y (b) limpieza total del material. ....	120
Figura 4.40. SiC malla #400 puesto en un envase plástico. ....	121
Figura 4.41. Horno de fundición antes de realizar el proceso de fabricación de los lingotes. ....	121
Figura 4.42. Recubrimiento de la pared interna del horno. ....	122
Figura 4.43. Herramientas construidas y utilizadas en el proceso de fundición. ....	123
Figura 4.44. Detalle de las campanas de escorificación. ....	123
Figura 4.45. Ubicación de las herramientas y accesorios antes de iniciar el proceso de fundición. ....	124
Figura 4.46. Preparación de la matriz Al-Si 365.0 al 93%. ....	125
Figura 4.47. Preparación del refuerzo SiC malla #400 al 6%. ....	125
Figura 4.48. Preparación del magnesio sólido. ....	125
Figura 4.49. Preparación de las cantidades en masa de los fundentes alu fundex extra (rosado), apartagas H7-50 (azul) y afinador de grano Al5TiB (plateado). ....	126
Figura 4.50. Preparación del molde de arena aglomerada. ....	126
Figura 4.51. Montaje de la estructura del stir casting. ....	127
Figura 4.52. Montaje de los elementos de rotación motor-agitador del stir casting. ....	128
Figura 4.53. Centrado de las aspas del agitador en el interior del crisol de acero. ....	128
Figura 4.54. Calentamiento del polvo de SiC malla #400. ....	129
Figura 4.55. Calentamiento horno-crisol-matriz 365.0. ....	130
Figura 4.56. Introducción de la matriz 365.0 en el interior del crisol. ....	131
Figura 4.57. Fusión de la matriz Al-Si 365.0. ....	131
Figura 4.58. Controlador de temperatura digital con termocupla tipo probeta K. ....	132

Figura 4.59. Multímetro DT9208A con termocupla tipo K.....	132
Figura 4.60. Introducción del pedazo de Mg sólido en la matriz fundida 365.0.....	132
Figura 4.61. Introducción del pedazo de Al <sub>5</sub> TiB sólido en la matriz fundida 365.0.....	133
Figura 4.62. Introducción del escorificante alu fundex extra en la campana de hierro y posterior sumergimiento en la matriz fundida.....	134
Figura 4.63. Introducción del apartagas H7-50 en la campana de hierro y posterior sumergimiento en la matriz fundida.....	134
Figura 4.64. Introducción de aspas en la matriz fundida 365.0 y colocación de la tapa en el crisol.....	135
Figura 4.65. Adición del polvo de SiC malla #400 en la matriz fundida Al-Si 365.0 a través del embudo de la tapa del crisol.....	136
Figura 4.66. Desgasificación de la masa fundida mediante gas argón.....	137
Figura 4.67. Colado de la masa fundida matriz Al-Si 365.0 reforzada al 6% de SiC malla #400 en molde de arena aglomerada.....	137
Figura 4.68. Extracción de los tres lingotes de MC 365.0/SiC/6p del molde de arena.....	138
Figura 4.69. Lingotes obtenidos de MCMM 365.0.....	139
Figura 4.70. Lingotes obtenidos de MCMM 365.0/SiC/2p.....	140
Figura 4.71. Lingotes obtenidos de MCMM 365.0/SiC/4p.....	141
Figura 4.72. Lingotes obtenidos de MCMM 365.0/SiC/6p.....	142
Figura 4.73. Lingotes cilíndricos previa preparación de probetas.....	143
Figura 4.74. Probeta ET4.3-365.0/SiC/6p para ensayo de tracción obtenida a partir de un lingote cilíndrico L4.3-365.0/SiC/6p.....	143
Figura 4.75. Probeta ED4.1-365.0/SiC/6p para ensayo de dureza obtenida a partir del lingote cilíndrico L4.1-365.0/SiC/6p.....	145
Figura 4.76. Probeta EMO4.3-365.0/SiC/6p para ensayo metalográfico mediante microscopio óptico obtenida a partir del lingote cilíndrico L4.3-365.0/SiC/6p.....	146
Figura 5.1. Microestructura de la matriz 365.0 con aumento a 100X.....	159
Figura 5.2. Microestructura del composite 365.0/SiC/2p con aumento a 100X.....	159
Figura 5.3. Microestructura del composite 365.0/SiC/4p con aumento a 100X.....	159
Figura 5.4. Microestructura del composite 365.0/SiC/6p con aumento a 100X.....	160
Figura 5.5. Comparación del esfuerzo de fluencia de los materiales fabricados.....	161
Figura 5.6. Comparación de la resistencia a la tracción de los materiales fabricados.....	162
Figura 5.7. Comparación de los % de elongación de los materiales fabricados.....	162
Figura 5.8. Comparación de dureza de los materiales fabricados.....	163
Figura 5.9. Microestructura 365.0.....	164
Figura 5.10. Microestructura 365.0/SiC/2p.....	165
Figura 5.11. Microestructura 365.0/SiC/4p.....	166
Figura 5.12. Microestructura 365.0/SiC/6p.....	167

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Formas estructurales de la bauxita a partir del mineral alúmina. ....	3
Tabla 1.2. Composición de minerales de la bauxita. ....	3
Tabla 1.3. Grados de pureza del aluminio según standard USA. ....	5
Tabla 1.4. Norma ANSI H35.1 standards para la designación de series numéricas de aluminio y sus aleaciones para procesos de materiales trabajados y colados. ....	8
Tabla 1.5. Propiedades físicas, térmicas, mecánicas y de arreglo atómico del silicio y del aluminio. ....	11
Tabla 1.6. Efecto del Silicio en las propiedades tecnológicas de sus aleaciones. ....	11
Tabla 1.7. Aplicaciones industriales de aleaciones Al-Si. ....	12
Tabla 1.8. Métodos de fundición para aleaciones Al-Si. ....	13
Tabla 2.1. Clasificación de los MCMM según el tipo de refuerzo. ....	20
Tabla 2.2. Parámetros para la selección del material matriz. ....	21
Tabla 2.3. Parámetros para la selección del material refuerzo. ....	21
Tabla 2.4. Compatibilidad matriz-refuerzo. ....	22
Tabla 2.5. Funciones que desempeñan la matriz metálica, refuerzo e interfaz. ....	22
Tabla 2.6. Comparación de propiedades de refuerzos para matrices metálicas. ....	25
Tabla 2.7. Tensión superficial de metales y cerámicos. ....	29
Tabla 2.8. Inconvenientes por el producto de reacción $Al_4C_3$ . ....	31
Tabla 2.9. Parámetros para controlar la formación de la interfaz $Al_4C_3$ . ....	33
Tabla 2.10. Procesos de fabricación de MCMM. ....	36
Tabla 2.11. Dimensiones recomendadas para un agitador tipo paletas planas. ....	38
Tabla 3.1. Parámetros para la selección del material matriz aleación Al-Si. ....	49
Tabla 3.2. Composición química de la aleación ANSI AA 365.0. ....	52
Tabla 3.3. Composición química standard de la aleación comerciales Silafont-36 y Castaman-35. ....	52
Tabla 3.4. Propiedades de la aleación comercial Silafont-36 de serie numérica EN AC 43500 (ANSI AA 365.0) para die casting y un prototipo en molde de arena. ....	53
Tabla 3.5. Parámetros para la selección del material refuerzo SiC. ....	57
Tabla 3.6. Características del tamaño de las partículas de refuerzo. ....	58
Tabla 3.7. Variación de las propiedades según el tamaño de las partículas de refuerzo. ....	58
Tabla 3.8. Propiedades físicas del polvo SiC malla #400 dado por la industria Saint Gobain. ....	59
Tabla 3.9. Medidas y especificaciones del agitador tipo paletas planas. ....	76
Tabla 3.10. Microestructuras de aleaciones Al-Si y de MCMM de Al-Si reforzadas con partículas de SiC indicando las fases que forma el Al con sus aleantes principales. ....	80
Tabla 3.11. Propiedades y aplicaciones de MC, aleaciones Al-Si, fundiciones grises y hierros dúctiles. ....	81
Tabla 4.1. Materiales y parámetros para la prueba preliminar 01. ....	87

Tabla 4.2. Materiales y parámetros para la prueba preliminar 02. ....	89
Tabla 4.3. Materiales y parámetros para la prueba preliminar 03. ....	91
Tabla 4.4. Materiales y parámetros para la prueba preliminar 04. ....	93
Tabla 4.5. Materiales y parámetros para la prueba preliminar 05. ....	94
Tabla 4.6. Materiales y parámetros para la prueba preliminar 06. ....	96
Tabla 4.7. Materiales y parámetros para la prueba preliminar 07. ....	98
Tabla 4.8. Materiales y parámetros para la prueba preliminar 10. ....	104
Tabla 4.9. Materiales y parámetros para la prueba preliminar 11. ....	106
Tabla 4.10. Materiales y parámetros para la prueba preliminar 12. ....	109
Tabla 4.11. Materiales y parámetros para la prueba preliminar 13. ....	112
Tabla 4.12. Hoja de ruta para la codificación de lingotes y probetas para los respectivos ensayos. .....	117
Tabla 4.13. Constituyentes y materiales con sus respectivas cantidades en porcentaje y masa para la fabricación de lingotes de MCM Al-Si 365.0 reforzada con partículas de SiC malla #400. ....	118
Tabla 4.14. Ficha técnica de las balanzas analíticas. ....	124
Tabla 4.15. Materiales y parámetros para la fabricación de lingotes 365.0. ....	139
Tabla 4.16. Materiales y parámetros para la fabricación de lingotes 365.0/SiC/2p. ....	140
Tabla 4.17. Materiales y parámetros para la fabricación de lingotes 365.0/SiC/4p. ....	141
Tabla 4.18. Materiales y parámetros para la fabricación de lingotes 365.0/SiC/6p. ....	142
Tabla 4.19. Dimensiones de la probeta para ensayo de tracción según norma ASTM E8/E8M-16a. .....	144
Tabla 4.20. Costo de materiales mecánicos y eléctricos. ....	148
Tabla 4.21. Costos de componentes y elementos disponibles en el mercado. ....	148
Tabla 4.22. Costos indirectos. ....	149
Tabla 4.23. Costo de manufactura de elementos y partes del stir casting. ....	150
Tabla 4.24. Costo de manufactura de herramientas utilizadas para el desarrollo de pruebas preliminares y el proceso de fabricación del MC. ....	151
Tabla 4.25. Costo de manufactura de elementos y partes utilizados para las pruebas preliminares. .....	152
Tabla 4.26. Costo de materiales para el desarrollo de las pruebas preliminares. ....	153
Tabla 4.27. Costos de ingeniería. ....	154
Tabla 4.28. Costo de ensayos de laboratorio. ....	154
Tabla 4.29. Costos de materiales para la obtención de 3 lingotes de MC 365.0/SiC/6p. ....	155
Tabla 4.30. Costo total del proyecto de investigación. ....	155
Tabla 5.1. Valor promedio de las propiedades mecánicas del material aleación 365.0 sometida al ensayo de tracción. ....	157
Tabla 5.2. Valor promedio de las propiedades mecánicas del composite 365.0/SiC/2p sometida al ensayo de tracción. ....	157
Tabla 5.3. Valor promedio de las propiedades mecánicas del composite 365.0/SiC/4p sometida al ensayo de tracción. ....	157



Tabla 5.4. Valor promedio de las propiedades mecánicas del composite 365.0/SiC/6p sometida al ensayo de tracción. ....	157
Tabla 5.5. Valor promedio de dureza Brinell de los materiales fabricados. ....	158
Tabla 5.6. Densidad de los materiales fabricados. ....	160
Tabla 5.7. Valores de las propiedades de los materiales fabricados. ....	161
Tabla 5.8. Parámetros del proceso de fabricación del material 365.0. ....	164
Tabla 5.9. Parámetros del proceso de fabricación del material 365.0/SiC/2p. ....	165
Tabla 5.10. Parámetros del proceso de fabricación del material 365.0/SiC/4p. ....	166
Tabla 5.11. Parámetros del proceso de fabricación del material 365.0/SiC/6p. ....	167
Tabla 5.12. Potenciales aplicaciones y comparación de los MC 365.0/SiC/6p y C-365.0/SiC/6p con aleaciones Al-Si, fundiciones grises y hierros dúctiles. ....	170

## RESUMEN

El presente proyecto tiene por objetivo caracterizar un material compuesto de matriz aleación aluminio-silicio reforzada con partículas de carburo de silicio. Para esto, se fabricaron materiales compuestos (MC) de baja densidad a partir de una matriz aleación Al-Si 365.0 y un refuerzo cerámico de SiC malla #400, obteniendo una combinación de propiedades que requiere la industria automotriz para reducir el consumo de combustible. Para la aleación 365.0 se utilizó un block de cilindros de un automóvil Honda, seleccionada de entre las series ANSI 3xx.x. El SiC es un polvo particulado, seleccionado a partir de  $Al_2O_3$ ,  $B_4C$ , TiC. Se construyó un equipo stir casting para las pruebas preliminares de dispersión del SiC en la matriz fundida 365.0, desarrollándose un proceso de fabricación de lingotes colados por fuerza de gravedad en molde de arena aglomerante, obteniéndose los MC 365.0/SiC/2p (2%SiC), 365.0/SiC/4p (4%SiC), 365.0/SiC/6p (6%SiC). Mediante fundición del block se obtuvo la matriz 365.0. A partir de estos materiales, bajo normas ASTM, se prepararon probetas para ensayos de tracción, dureza y microscopia. Se caracterizó las probetas 365.0, 365.0/SiC/2p, 365.0/SiC/4p y 365.0/SiC/6p, obteniendo valores de resistencia [MPa]-dureza [HBW] de 108-46, 101-52, 119-56 y 131-58, respectivamente, concluyendo que al incrementar el porcentaje de SiC en la matriz 365.0 la resistencia y dureza van incrementándose. El ensayo microestructural muestra las fases presentes de los MC. Finalmente, se desarrolló un MC C-365.0/SiC/6p (6%SiC) colado en molde de acero, su resistencia es de 217 MPa y la dureza 78 HBW, presentando mejores propiedades en comparación al MC 365.0/SiC/6p.

**Palabras claves:** AlSi10Mn-SiC<sub>p</sub>, caracterización MCMM Al-Si/SiC<sub>p</sub>, fabricación MCMM Al-Si/SiC, material compuesto Al-Si 365.0, Suspensión SiC en Al-Si, 365.0/SiC/6p.

## ABSTRACT

This project aims at characterize an aluminium-silicon alloy matrix composite reinforced with silicon carbide particles. For this, low density composites were obtained from a matrix alloy Al-Si 365.0 and a ceramic reinforcement of SiC mesh #400, obtaining a combination of properties required by the automotive industry to reduce fuel consumption. For the 365.0 alloy, a cylinders block of a Honda automobile was used, selected from the ANSI 3xx.x series. SiC is a particulate powder, selected from ceramics of  $Al_2O_3$ ,  $B_4C$ , TiC. A stir casting equipment was built for the preliminaries tests of the dispersion of SiC particles in the melted matrix 365.0. In addition, a fabrication process of ingots was developed by stir casting with gravitational pouring in a binder sand mold, obtaining composites 365.0/SiC/2p (2%SiC), 365.0/SiC/4p (4%SiC), 365.0/SiC/6p (6%SiC). By melting the block the matrix 365.0 was obtained. From these materials, under ASTM Standard, specimens were prepared for tensile, hardness and microscopy tests. The 365.0, 365.0/SiC/2p, 365.0/SiC/4p y 365.0/SiC/6p specimens were characterized, obtaining values of strength [MPa]-hardness [HBW] of 108-46, 101-52, 119-56 and 131-58, respectively, concluding that the increase of the percentage of SiC in the matrix 365.0 the strength and hardness are increasing. The microstructural test shows the phases present of the composites. Finally, a composite C-365.0/SiC/6p (6%SiC) was also developed but pouring in steel mold, its strength is 217 MPa and hardness 78 HBW, presenting better properties compared to composite 365.0/SiC/6p.

**Keywords:** AlSi10Mn-SiC<sub>p</sub>, Characterization Al-Si/SiC-MMC<sub>s</sub>, manufacturing Al-Si/SiC-MMC<sub>s</sub>, composite Al-Si 365.0, suspension SiC into Al-Si, 365.0/SiC/6p.

## INTRODUCCIÓN

Aunque en la actualidad se utilizan materiales metálicos, aleaciones, súper aleaciones, cerámicos, estos no están siendo suficientes para suplir las nuevas exigencias del mundo actual, en la que no solo se requiere de sus propiedades, sino que necesitan incorporar las de otro material muy distinto a él. Esta situación ha originado la creación de los materiales compuestos (MC) o composites. Un MC es un sistema material integrado por la combinación de dos o más materiales, pudiendo ser una matriz y uno o más refuerzos, que difieren en forma y composición química, además de ser insolubles entre sí. Son clasificados según su material matriz pudiendo ser metálica, cerámica y polimérica, combinados con un material refuerzo en forma de partículas, fibras, láminas o preformas.

A nivel mundial el desarrollo de materiales compuesto de matriz metálica (MCMM) está creciendo de manera vertiginosa, a tal punto que en la nueva clasificación de materiales están presentes estos materiales de nueva generación. Los MCMM surgen en la década de los sesenta y setenta, en los Estados Unidos, como un proyecto de investigación espacial y defensa. Pero fue en Japón, en el año de 1982, donde se lo introdujo a escala industrial en un pistón de motor diésel marca Toyota. Desde entonces el interés por estos MC se ha dado por la industria militar, automotriz y aeroespacial. Un ejemplo claro de un problema actual es el consumo de combustible de los motores de combustión interna de automóviles estadounidenses, su consumo promedio en automóviles de turismo es de 11,5 a 13,18 km por litro de gasolina. Esto originó que el 19 de mayo de 2009, el presidente Barack Obama estableciera una política nacional de eficiencia de consumo de combustible, que permitirá en un futuro reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, al establecer un estándar promedio de rendimiento de 23,17 Km por litro de gasolina a partir del año 2025 en autos de turismo. Esta política permitirá a las casas de manufactura de motores, mejorar las investigaciones de los MCMM. Teniendo como una de las estrategias cambiar el material del block de cilindros por un MCMM de aleación Al-Si reforzada con partículas de material cerámico. Ya que en la mayoría de vehículos de turismo, buses, camiones y maquinaria pesada es de hierro fundido, y en menores porcentajes es utilizada aleaciones de Al-Si para pequeños motores de automóviles de turismo y de carreras. Este MCMM deberá conjugar entre sí propiedades de bajo peso, excelente transferencia de calor, alta resistencia a la tracción, gran tenacidad, resistente a procesos de desgaste, resistente a la corrosión, entre otras, dando como resultado un alto rendimiento con un menor consumo de combustible.

En la actualidad los procesos de fabricación para obtener un MCMM son por medio vía sólida como pulvimetalurgia o unión por difusión; estado líquido o semisólido como stir casting, rheocasting, compocasting, infiltración de preformas; procesos in situ y procesos vía atomización. Sin embargo, estos procesos de producción industrial a pesar de su desarrollo no pueden competir aún con procesos de fabricación en serie de partes y elementos mecánicos que utilizan aleaciones tradicionales como las de Al, Mg o Fe, debido a que su fabricación si en algunos casos es costosa en otros es compleja. Los procesos de fabricación de MCMM en estado líquido en el que se funde una aleación y se adiciona partículas cerámicas mediante agitación mecánica, son utilizados especialmente a nivel de laboratorio por ser uno de los procesos más económicos y viables. Sin embargo, su utilización en un futuro para la producción en masa es promisoria. En el país no se conoce si se está aprovechando o utilizando elementos fabricados con MCMM, también se desconoce si a nivel nacional industrias como las de fundición o las de productos manufacturados, realizan algún tipo de investigaciones sobre estos materiales. Por esta razón, la caracterización de un material compuesto de matriz aleación de aluminio-silicio reforzada con partículas de carburo de silicio será un aporte tanto para las industrias fundidoras del país como para al mejoramiento de las propiedades de las aleaciones Al-Si que son requeridas en industrias automotrices, aeroespaciales u otras.

## **Objetivo general**

Caracterizar un material compuesto de matriz aleación de aluminio-silicio reforzada con partículas de carburo de silicio.

## **Objetivos específicos**

- Desarrollar dos capítulos iniciales que estructuren una base teórica concerniente a aluminio secundario, aleaciones Al-Si, procesos de fabricación, así como un estudio de la interfaz matriz metálica-refuerzo cerámico, que sirvan de aporte para fabricar un material compuesto de matriz metálica Al-Si reforzada con partículas de SiC.
- Seleccionar un material matriz de aleación Al-Si a partir de una de las series ANSI 3xx.x, 4xx.x o 4xxx, por medio del reciclaje de blocks, cabezotes, pistones de motores de combustión interna, o toda clase de material reciclable, o a través de la adquisición de lingotes que producen las industrias de fundición.
- Construir un equipo de agitación (equipo stir casting) que permita dispersar las partículas de carburo de silicio en la aleación fundida de aluminio-silicio.

- Realizar pruebas preliminares para lograr dispersar las partículas de carburo de silicio en la matriz fundida Al-Si.
- Determinar a partir de las pruebas preliminares los porcentajes de refuerzo de partículas de carburo de silicio con los que se va a realizar la fabricación de los materiales compuestos.
- Desarrollar un proceso de fabricación de lingotes cilíndricos de material compuesto de matriz aleación de aluminio-silicio reforzada con partículas de carburo de silicio mediante el método de fabricación stir casting con colado en molde de arena.
- Fabricar lingotes cilíndricos de material compuesto de matriz aleación de aluminio-silicio reforzada con partículas de carburo de silicio.
- Elaborar a partir de los lingotes cilíndricos fabricados probetas para ensayos de tracción, dureza y metalográficos bajo la norma ASTM.
- Realizar a las probetas de material compuesto ensayos normalizados de tracción, dureza y metalográficos mediante microscopio óptico.
- Analizar y comparar, a partir de los ensayos de dureza, tracción y metalográficos, las propiedades del material compuesto obtenido frente a su matriz metálica.
- Presentar potenciales aplicaciones industriales del material compuesto fabricado así como compararlo con materiales compuestos semejantes y otras aleaciones.

## **Alcance**

La caracterización de un material compuesto de matriz aleación de aluminio-silicio reforzada con partículas de carburo de silicio permitirá fabricar un material compuesto a partir de la creación e innovación de un proceso de fabricación de lingotes cilíndricos mediante la técnica stir casting con colado en molde desechable, tomando en cuenta que el proyecto de investigación y fabricación debe ser asequible para el sector industrial del país. El material compuesto fabricado deberá ser caracterizado mediante ensayos normalizados de tracción, dureza y microscopía, en donde los valores de sus propiedades mecánicas y microestructurales, sean analizadas con el fin de determinar potenciales aplicaciones industriales. Además, se pretenderá tener una excelente base científica y práctica sobre estos materiales, con el propósito de continuar la investigación y fabricar un nuevo material compuesto de matriz metálica de baja densidad, que cumpla y supere las nuevas exigencias del mundo industrial automotriz, aeronáutico, entre otros.

# CAPÍTULO 1

## ALUMINIO Y SUS ALEACIONES

El presente capítulo da a conocer una breve historia del aluminio. En donde su descubrimiento, permitió, después de más de medio siglo, la obtención del aluminio a nivel industrial, a partir de los procesos Hall-Hérault y Bayer, que sirvieron de base para el desarrollo de la industria del aluminio en beneficio de la sociedad. Parte de este desarrollo son las fundiciones de aluminio-silicio, que permiten crear elementos, para varias aplicaciones industriales sustentada en los procesos de fabricación por fundición.

### 1.1. Historia del aluminio

Remontarse a la historia de este elemento químico, es recordar a un conocido científico romano de nombre Pliny, conocido como el Viejo Pliny, nacido en el año 23 d.C. Quien en sus escritos, ya mencionaba a un compuesto que lo llamo alumen, que se cree, que era una sal conformada de una mezcla de sulfato de aluminio y sulfato de hierro, empíricamente utilizada para teñir. Sin embargo, países como Egipto e Irak alrededor del año 5000 a.C, ya utilizaban sustancias que contenían aluminio. Después de los trabajos del científico Pliny, alrededor del siglo VIII, se elaboró un alumen tipo roca, que se lo llamo roca de alum, constituido de un sulfato de aluminio con sulfato de potasio [1], [2].

En el transcurso del avance científico, el químico alemán, Andreas Marggraff, en 1754, basándose en sus propios y anteriores estudios, definió una arcilla blanca, que la separó en sílice y en una tierra llamada alumen, que más tarde, en 1820, se le dio el nombre de alúmina, utilizada para el descubrimiento del aluminio [1].

Algunos artículos adjudican el descubrimiento del aluminio al químico británico Humphry Davy, alrededor de 1807. Quien empleando procedimientos electrolíticos en la alúmina pretendió aislar el metal, que en primera instancia lo bautizo como alumium y después como aluminium, sin fortuna. Sin embargo, los intentos por aislar este elemento de la alúmina, continuaron por parte del físico químico Hans Christian Oersted, el cual en 1824, aisló aluminio no totalmente puro. Hasta que dos años más tarde, en 1827, el científico Friedrich Wohler, modificando los experimentos de Oersted, logró obtener aluminio en forma de polvo gris metalizado, atribuyéndose el descubrimiento de este elemento. A pesar de que Friedrich Wohler, en 1845, estableció la densidad del aluminio, el químico

francés, Henri Sainte-Claire Deville, en 1855, mejora el método de Wöhler, con la obtención de un lingote de aluminio, creando el primer proceso de obtención comercial, pero su precio era demasiado alto para permitir su utilización a nivel industrial [1].

En el año 1886 dos científicos, Paul Louis Toussaint Héroult, francés, y Charles Martín Hall, estadounidense, inventan simultáneamente un nuevo proceso electrolítico llamado Hall-Héroult, que en 1888 dio el desarrollo industrial del aluminio, siendo actualmente el principal método de producción industrial [2].

## **1.2. Obtención del aluminio a nivel industrial**

La industrialización del aluminio empieza con el tratamiento del mineral bauxita, sometida al proceso Bayer, inventado por Karl Bayer, para la obtención de alúmina. Posteriormente, la alúmina, mediante el proceso Hall-Héroult, es convertida en aluminio primario, que sirve de materia prima para la fabricación de productos acabados. A partir de todos estos procesos se genera aluminio secundario, conocido como chatarra, el cual necesita de su reciclaje para reducir el impacto ambiental [2].

### **1.2.1. Bauxita**

Es un mineral descubierto en la ciudad de Les Baux, Francia, fue identificado por el geólogo Pierre Berthier, en 1821, llamándola bauxita en honor a aquella ciudad; su color viene en pardo oscuro, amarillo pálido, rosado y rojizo; siendo explotada de sus yacimientos a cielo abierto. Con su refinación se obtiene óxido de aluminio (alúmina), que es reducida electrolíticamente para obtener aluminio primario [2].

El aluminio es el tercer elemento más abundante en la corteza terrestre, constituye el 8% de su corteza. Existe en la naturaleza formando parte de minerales como alunitas, bauxitas, criolitas, lazulitas, caolinita y muchos más, tan abundantemente no sólo para formar masas montañosas, sino también, para ser la base de suelos arcillosos. La bauxita y la criolita son los minerales más utilizados para la obtención de alúmina, sin embargo, en la actualidad las industrias prefieren la bauxita, debido a que se puede obtener entre un 60 a 85% de alúmina. Existe tres formas estructurales de la bauxita, formada a partir del mineral alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), y se clasifican dependiendo del número de moléculas de agua de hidratación (formas hidratadas), como de su forma cristalina. Estos tres minerales derivados de la bauxita son la gibbsita, boehmita y diáspora [3], [4]. En la Tabla 1.1 [4] se puede observar las principales formas estructurales de la bauxita.



Tabla 1.1. Formas estructurales de la bauxita a partir del mineral alúmina.

Composición	Gibbsita	Boehmita	Diáspora
		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .3H <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .H <sub>2</sub> O
Contenido máximo en alúmina wt%	65,4	85	85
Sistema cristalino	Monoclínico	Ortorrómico	Ortorrómico
Densidad g/cm <sup>3</sup>	2,42	3,01	3,44

(Fuente: Totten and MacKenzie, 2003, pág. 13 [4])

La bauxita, además de estar conformada por el mineral alúmina, en sus tres formas estructurales, también se constituye por minerales de titanio, hierro, silicio y otros más, como se muestra en la Tabla 1.2 [3].

Tabla 1.2. Composición de minerales de la bauxita.

Minerales de aluminio				Minerales de titanio			
Gibbsita	$\alpha\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ : $\gamma\text{Al}(\text{OH})_3$			Anatasa	TiO <sub>2</sub>	Leucoxeno	Producto de
Boehmita	$\alpha\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ : $\gamma\text{AlOOH}$			Rutilo	TiO <sub>2</sub>		alteración de
Diáspora	$\beta\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ : $\alpha\text{AlOOH}$			Ilmenita	FeTiO <sub>2</sub>		la ilmenita
Minerales de hierro				Minerales de silicio			
Hematites	$\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$	Magnetita	$\gamma\text{Fe}_3\text{O}_4$	Caolinita	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$		
Goethita	$\alpha\text{FeOOH}$	Ilmenita	FeTiO <sub>3</sub>	Cuarzo	Compuesto principal SiO <sub>2</sub>		
Hematites aluminico	(AlFe) <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Maghemita	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Otros	Pirita, marcasita, clorita, circón, cromita, piroxeno, halloysita, mica, apatita, corindón y mineral orgánico.		
Goethita aluminica	(AlFe)OOH						

(Fuente: Rubinos, 2007, p. 38 [3])

### 1.2.2. Alúmina (óxido de aluminio)

La obtención de alúmina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) se realiza mediante el proceso Bayer, a partir de la refinación de la bauxita, que es lavada, pulverizada y disuelta en sosa caustica (NaOH), resultando una disolución de aluminato de sodio (NaAlO<sub>2</sub>), residuos de óxido de hierro, silicio y titanio, que caen al fondo de su depósito. Posteriormente en la disolución de aluminato de sodio se añaden partículas finas de alúmina que originan la precipitación de partículas de alúmina pura, que a su vez pasan por un horno rotatorio a 1100 °C donde es eliminada su humedad, resultado un polvo blanco denominado alúmina [3]-[5].

### 1.2.3. Aluminio primario

La producción de aluminio primario se realiza mediante el proceso Hall-Héroult, en el cual la alúmina, obtenida por el proceso Bayer, es disuelta en un baño electrolítico de criolita fundida (Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>), contenida en un recipiente de acero y recubierto de grafito. Este recipiente conocido como crisol o cuba actúa como cátodo, mientras que de ánodos se utilizan electrodos de carbón. Una vez obtenido el sistema ánodo-electrolito-cátodo, se

hace circular una corriente eléctrica, cercana a los 150000 A, a través de la solución electrolítica, que está a unos 960 °C, rompiendo los enlaces de la alúmina para obtener aluminio que se deposita en el fondo del crisol, y oxígeno que se deposita sobre los electrodos de carbón, quemándose y originando CO<sub>2</sub>. La pureza de aluminio que se puede conseguir con este proceso es de 99,5 a 99,9%, con impurezas de Fe, Si, Ti, V y Mn [3], [4], [6]. En la Figura 1.1 [6] se muestra la obtención de aluminio primario.

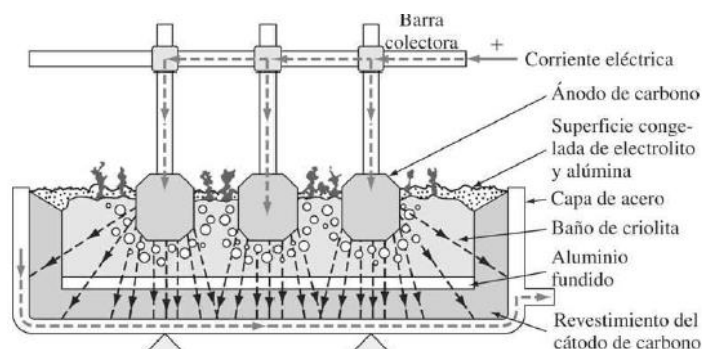


Figura 1.1. Proceso de obtención de aluminio primario a partir de la alúmina.  
(Fuente: Smith y Hashemi, 2006, p. 61 [6])

#### 1.2.4. Aluminio secundario

El aluminio secundario tiene que ver con la chatarra y la escoria que se genera desde el primer proceso en que es obtenido el aluminio primario, hasta el último en que es convertido en un bien de consumo. Este proceso genera cinco clases de desperdicios. La escoria que se forma al obtener aluminio primario por parte de la industria minera. Los retazos de material y productos defectuosos provenientes de semielaborados como láminas, planchas, barras, varillas, perfiles, bobinas, productos colados, originados en la propia industria minera, y conocida como chatarra nueva. Los retazos de material y productos defectuosos, por parte de las industrias de manufactura, al momento de utilizar semielaborados (materia prima) para obtener un bien de consumo. A partir del reciclaje de chatarra (partes de automóviles, camiones, máquinas, etc.). Todo tipo de producto que ha cumplido su ciclo de vida [5], [7].

#### 1.2.5. Reciclaje de aluminio

El reciclaje de chatarra de aluminio y sus aleaciones:

...es un proceso complejo que implica centros de acopio, productores primarios, fundiciones secundarias, procesadores de metales, y los consumidores. La Figura 1.2 describe el flujo del metal originado en las operaciones de fusión primaria a través de las diversas actividades de reciclaje [7, p. 3331].

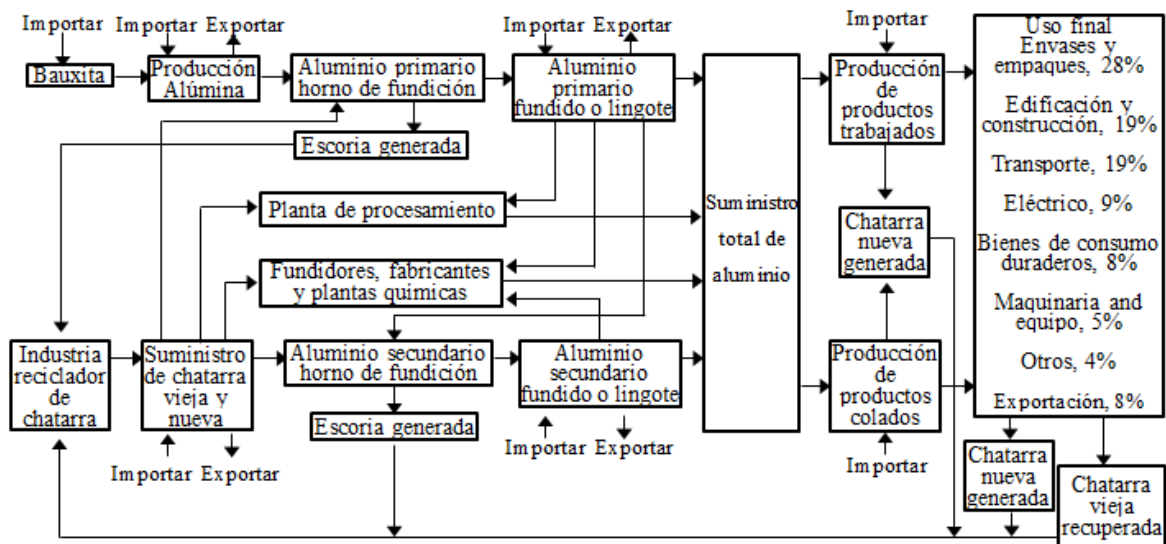


Figura 1.2. Diagrama de flujo del aluminio y su reciclaje en los Estados Unidos.  
(Fuente: ASM HANDBOOK Vol.2, 1990, p. 3332, [7])

### 1.3. Industria del aluminio

La industria del aluminio manufactura este elemento químico con altos grados de pureza, el cual sirve de base para la obtención de sus aleaciones. Mediante la norma ANSI H35.1 los materiales de aluminio y sus aleaciones son identificados según su designación de serie numérica, que también va seguida de una designación para tratamientos térmicos.

#### 1.3.1. Grados de pureza del aluminio

Las industrias dedicadas a la obtención de aluminio tienen dos clasificaciones dependiendo de la cantidad de impurezas: aluminio comercialmente puro de 99 a 99,9% de pureza obtenido por el proceso Hall-Hérout, y aluminio de alta pureza de más de 99,97% de pureza producido a partir de una posterior refinación, llamada electrólisis de tres capas o electrólisis en celdas Hoopes, pudiéndose alcanzar una pureza de 99,999999%. [2]. Sin embargo existe una clasificación de varios grados de pureza que son aceptados en los estados unidos, como se puede apreciar en la Tabla 1.3 [4].

Tabla 1.3. Grados de pureza del aluminio según standard USA.

% de Aluminio	De 99.5000 a 99.7900	De 99.8000 a 99.9490	De 99.9500 a 99.9959	De 99.9960 a 99.9990	>99.9990
Designación	Pureza comercial	Alta Pureza	Súper pureza	Pureza extrema	Ultra pureza

(Fuente: Totten and MacKenzie, 2003, p. 35, [4])

El aluminio en estado puro posee bajas propiedades mecánicas, tanto de resistencia como de dureza, lo que dificulta su uso al ser sometido a grandes exigencias mecánicas.

Por esta razón, para mejorar sus propiedades mecánicas, es adicionado en ciertos porcentajes de Cu, Si, Mg, Zn, Mn y Sn, formando las denominadas aleaciones de aluminio, permitiéndole competir con aleaciones Fe-C (aceros), e incluso superarlo en propiedades como relación peso/resistencia, mejor disipación de calor, resistencia a la corrosión, facilidad de conformación, fluidez al ser colado en moldes [7], [8], [9].

### **1.3.2. Aleaciones de aluminio**

Las industrias mineras dedicadas a refinar la alúmina y a reprocesar la chatarra de aluminio, obtienen tanto aluminio primario como secundario en estado líquido, Este aluminio es trasladado a la sección de colado, en donde es vertido en hornos de almacenaje para añadir elementos metálicos al aluminio primario, o realizar el afinado de elementos químicos si es un aluminio secundario. De esta manera se obtienen las diversas aleaciones de aluminio en estado líquido, y que son coladas de dos formas:

La primera es la colada tradicional (semicontinua). Actualmente poco utilizada en la elaboración de productos semielaborados. Esta colada es vertida en moldes que giran por medio de una cinta transportadora (lingoteras), en donde se solidifican y se obtienen lingotes de medidas y pesos pequeños (6 kg, 8 kg, 10 kg, 22 kg, 475 kg, 680 kg), que son utilizados en industrias de manufactura de refundición y colado para obtener productos acabados como pistones, aros de ruedas, etc. La colada que es vertida en grandes moldes estáticos solidifica para obtener lingotes de gran peso (aproximadamente 10 T) con forma de planchón, palanquilla o tocho. Cuando los lingotes están totalmente solidificados pasan a hornos de recalentamiento, en donde alcanzan la fluidez necesaria para dar inicio al proceso primario de deformación plástica por trenes de laminación, en donde son deformados volumétricamente para obtener productos semielaborados como láminas, planchas, barras, varillas, perfiles, bobinas, tubería y otros más, Estos semielaborados posteriormente pasan a industrias de manufactura de todo el mundo, para que en un proceso secundario de fabricación como forja, extrusión, estirado, conformado de chapa, maquinado, y unión, con trabajo en frío o en caliente, terminen como productos acabados o bienes de consumo [6], [7], [10]-[12].

La segunda, y que actualmente más utilizada, gracias a su alta productividad y eficacia, es la colada continua, a partir de este proceso se puede obtener lingotes para refundición y lingotes para procesos primarios de deformación plástica por trenes de laminación. En el proceso de colada continua el material líquido fluye continuamente por un molde hueco, cuya sección transversal tiene la forma geométrica del lingote (planchón,

palanquilla o tocho), y al mismo tiempo es enfriada con agua. Con esto se consigue un lingote de la forma deseada, con la fluidez necesaria, y recalentado, que al instante es sometido a un proceso primario de deformación plástica por trenes de laminación, en donde se obtiene productos semielaborados como láminas, planchas, barras, varillas, perfiles, bobinas, tubería y otros más. Estos semielaborados, mediante un proceso secundario de fabricación, son transformados en bienes de consumo. Los lingotes para refundición son utilizados en industrias de manufactura, aquí son nuevamente fundidos y colados en moldes, para obtener productos acabados [6], [7], [10]-[12].

### **1.3.3. Series para identificación del aluminio y sus aleaciones**

El aluminio y sus aleaciones son identificados mediante la norma ANSI H35.1 standards, siendo la más aceptada a nivel mundial. Esta norma fue elaborada por la American National Standards Institute (ANSI), y es adoptada por la Aluminum Association (AA) que la menciona en su página oficial ([www.aluminum.org](http://www.aluminum.org)). El standard ANSI H35.1, en conjunto con la Aluminum Association, identifican al aluminio y sus aleaciones, mediante sus elementos químicos y la forma en que son obtenidos, además, lo han dividido en dos categorías las trabajadas y las coladas [7], [13]:

El aluminio y sus aleaciones trabajadas:

...son productos semielaborados que posteriormente son conformadas mediante cinco categorías para obtener productos acabados, estas categorías son: la primera productos laminados planos (hojas, láminas y papel de aluminio); la segunda varilla, barra y alambre; la tercera productos tubulares, la cuarta formas y la quinta forjado [7, p. 138].

El aluminio y sus aleaciones colados, corresponden a productos acabados como blocks, cabezotes, bastidores de camiones, entre otros. Estos productos acabados son obtenidos en fábricas dedicadas a la refundición de lingotes provenientes de colada continua o semicontinua (productos semielaborados). Los lingotes provenientes de colada continua o semicontinua se les asigna las serie numérica xxx.1 o xxx.2, pero cambian a la serie numérica xxx.0 porque denotan que fueron refundidos y colados en molde para obtener un producto acabado [7].

Cabe mencionar que la diferencia entre una misma aleación de la categoría colada con una refundida radica en que:

...los elementos aleantes y límites de impurezas para lingotes son los mismos que aquellos para colada (productos acabados) de la misma aleación, excepto que, cuando el lingote es refundido y

colado, para fabricar piezas fundidas, el contenido de hierro y zinc tiende a incrementar y el contenido de magnesio tiende a decrecer [7, p. 488].

La Tabla 1.4 [7], [12], [14] muestra la interpretación de la norma ANSI H35.1 standards y las principales propiedades para las series del Al y sus aleaciones, tanto para materiales trabajados como colados.

Tabla 1.4. Norma ANSI H35.1 standards para la designación de series numéricas de aluminio y sus aleaciones para procesos de materiales trabajados y colados.

Materiales colados	Materiales trabajados																										
<p><b>A 2xx.x</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>0 Indica que lingotes xxx.1 o xxx.2 fueron refundidos para ser transformados en un producto acabado</li> <li>1 Lingote estándar (producto semielaborado), obtenido en lingoteras con límites de composición química, comúnmente son refundidos en el taller de fundición</li> <li>2 Es un lingote casi similar al estándar, difiriendo en los límites de composición química</li> </ul> <p>Si es 1xx.x se trata de Al puro, indica el porcentaje decimal que hay que sumar al 99% mínimo de pureza, expresado con una exactitud del 0,01%</p> <p>Si es de 2xx.x a 9xx.x no tiene significado numérico en la composición de la aleación, solo la identifica individualmente dentro de la familia de series</p> <table border="1" data-bbox="284 1003 849 1102"> <tr> <td rowspan="4">Identifica al principal elemento constituyente de la aleación de Al, según su número</td> <td>1 Al Puro</td> <td>5 Al-Mg</td> <td>9 Al+otro</td> </tr> <tr> <td>2 Al-Cu</td> <td>6 No utilizado elemento</td> <td></td> </tr> <tr> <td>3 Al-Si+Cu y/o Mg</td> <td>7 Al-Zn</td> <td></td> </tr> <tr> <td>4 Al-Si</td> <td>8 Al-Sn</td> <td></td> </tr> </table> <p>Letra prefijo, denota actualización de la serie, con variaciones muy pequeñas en su composición, como para requerir un cambio en toda la serie numérica, cada letra va actualizándose en orden alfabético; se omite I, O, Q para evitar confusiones; la X se reserva para series experimentales</p>	Identifica al principal elemento constituyente de la aleación de Al, según su número	1 Al Puro	5 Al-Mg	9 Al+otro	2 Al-Cu	6 No utilizado elemento		3 Al-Si+Cu y/o Mg	7 Al-Zn		4 Al-Si	8 Al-Sn		<p><b>1xxx</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Si es 1xx.x se trata de Al puro, indica el porcentaje decimal que hay que sumar al 99% mínimo de pureza, expresado con una exactitud del 0,01%</li> <li>Si es de 2xx.x a 9xx.x no tiene significado numérico en la composición de la aleación, solo la identifica individualmente dentro de la familia de series</li> </ul> <p>0 Significa que no se controla los límites de impurezas naturales del Al o de sus aleaciones</p> <p>De 1 a 9 asignados progresivamente, según sea su actualización, representa modificaciones en sus límites de impurezas del Al o de sus aleaciones</p> <table border="1" data-bbox="890 974 1423 1072"> <tr> <td rowspan="4">Identifica al principal elemento constituyente de la aleación de Al, según su número</td> <td>1 Al Puro</td> <td>5 Al-Mg</td> <td>9 No utilizado</td> </tr> <tr> <td>2 Al-Cu</td> <td>6 Al-Mg-Si</td> <td></td> </tr> <tr> <td>3 Al-Mn</td> <td>7 Al-Zn</td> <td></td> </tr> <tr> <td>4 Al-Si</td> <td>8 Al+otro elemento</td> <td></td> </tr> </table>	Identifica al principal elemento constituyente de la aleación de Al, según su número	1 Al Puro	5 Al-Mg	9 No utilizado	2 Al-Cu	6 Al-Mg-Si		3 Al-Mn	7 Al-Zn		4 Al-Si	8 Al+otro elemento	
Identifica al principal elemento constituyente de la aleación de Al, según su número		1 Al Puro	5 Al-Mg	9 Al+otro																							
		2 Al-Cu	6 No utilizado elemento																								
		3 Al-Si+Cu y/o Mg	7 Al-Zn																								
	4 Al-Si	8 Al-Sn																									
Identifica al principal elemento constituyente de la aleación de Al, según su número	1 Al Puro	5 Al-Mg	9 No utilizado																								
	2 Al-Cu	6 Al-Mg-Si																									
	3 Al-Mn	7 Al-Zn																									
	4 Al-Si	8 Al+otro elemento																									
<p><b>Serie 1xx.x, Al puro, características principales:</b>            No termotratable. Resistencia a la tracción aprox. 70 MPa.            Se utiliza principalmente en barras conductoras de energía y anillos colectores, rotores de motores eléctricos.</p>	<p><b>Serie 1xxx, Al puro, características principales:</b>            No termotratable. Resistencia a la tracción aprox. 70 MPa. Se utiliza en conductores eléctricos, envoltura alimenticia, intercambiadores de calor.</p>																										
<p><b>Serie 2xx.x, Al-Cu, características principales:</b>            Son termotratables cuando la aleación contiene entre 4 a 5% de Cu. Resistencia a la tracción: 130-450 MPa.            La adición de Cu mejora la resistencia y la dureza a temperaturas altas, pero tienen mediana fluidez haciendo difícil obtener piezas que posean formas complejas.            Se utiliza en pistones de motores diésel, culata de motor de aviones, piezas para vehículos aeroespaciales.</p>	<p><b>Serie 2xxx, Al-Cu, características principales:</b>            Termotratable. Resistencia a la tracción: 190-430 MPa.            No tiene buena resistencia a la corrosión, son propensas a sufrir corrosión intergranular.            Algunas series tienen facilidad para ser soldadas.            Se utiliza en ruedas de camiones y aeronaves, piezas de suspensión, fuselaje y elementos estructurales de aviones.</p>																										
<p><b>Serie 3xx.x, Al-Si + Cu y/o Mg, características:</b>            Termotratables. Resistencia a la tracción: 130-345 MPa.            Excelente fluidez y adoptan la forma del molde al ser colados.            Al-Si+Cu: Si brinda excelentes características de moldeo, el Cu imparte una resistencia moderadamente alta, aunque se tenga una reducción de la ductilidad y la resistencia a la corrosión.            Se utiliza en tanques de gasolina, caja de engranes; pistones, blocks, múltiples y cabezotes de motores de autos.            Al-Si+Mg: se endurecen a causa del silicio de magnesio (Mg<sub>2</sub>Si), tiene excelente maleabilidad, soldabilidad, estanqueidad a la presión y resistencia a la corrosión.            Utilizado en bastidores de avión, cajas de transmisión, aros de ruedas de autos, piezas de industria marina y aeroespacial.            Al-Si+Mg+Cu: la combinación de Mg y Cu ofrece mayor aumento en la resistencia, durante el tratamiento térmico, sacrificando ductilidad y resistencia a la corrosión.            Se utiliza en pistones de motor, pistones de compresor de aire, piezas para la industria aeroespacial.</p>	<p><b>Serie 3xxx, Al-Mn, características principales:</b>            No termotratable.            Resistencia a la tracción: 110-285 MPa.            El límite de Mn es de 1,5%, con excelente trabajabilidad, resistente a la corrosión.            A causa de su buena soldabilidad las aleaciones de esta serie son usadas tanto en soldadura fuerte como en soldadura blanda.            Se utiliza en latas de bebida, utensilios de cocina, equipo químico, señales de carretera, techados, aplicaciones arquitectónicas, intercambiadores de calor tanques de almacenamiento, radiadores de automóviles.</p>																										

Tabla 1.4. Continuación.

<p><b>Serie 4xx.x, Al-Si, características principales:</b>                  Son termotratables y no termotratables. Resistencia a la tracción: 120-175 MPa.                  Aleación hipoeutéctica (&lt;12%Si), buena ductilidad, resiste la corrosión y estanqueidad a la presión, gran ductilidad cuando es tratada térmicamente, alta resistencia al impacto. Se utiliza en utensilios de cocina, cuerpos de carburador.                  Aleación eutéctica (12%Si), excelente moldeabilidad y estanqueidad a la presión, buena resistencia a la corrosión. Se utiliza en pistones de motor fuera de borda, equipo dental.                  Aleación hipereutéctica (&gt;12%Si), tiene notable resistencia al desgaste lo que dificulta su maquinado, bajo coeficiente de expansión térmica y buenas características al moldeo. Se utiliza en fabricación de pistones de motores.</p>	<p><b>Serie 4xxx, Al-Si, características principales:</b>                  No termotratable, y algunas son termotratables. Resistencia a la tracción: 175-380 MPa.                  Su contenido límite de Si es 12%, logrando bajar su punto de fusión sin provocar fragilidad con excelente fluidez.                  Las aleaciones que contienen solo silicio no son muy resistentes, pero tienen excelente fluidez al ser trabajadas. Aleaciones que incluyen Cu y/o Mg son resistentes, debido al tratamiento térmico de solución y envejecimiento.                  Se utiliza en émbolos de motor, también como alambre de soldadura.</p>
<p><b>Serie 5xx.x, Al-Mg, características principales:</b>                  No termotratable. Resistencia a la tracción: 120-175 MPa.                  Excelente resistencia a la corrosión, sus propiedades de resistencia y tenacidad son de moderadas a altas, son idóneas para conjuntos soldados, su moldeabilidad es baja.                  Se utiliza en equipos lácteos, accesorios para arquitectura, sección de bastidores de camiones y autobuses, bastidores de vagón de ferrocarril, piezas para aviación y marina.</p>	<p><b>Serie 5xxx, Al-Mg, características principales:</b>                  No termotratable y algunas son termotratables. Resistencia a la tracción: 125-350 MPa.                  Resistencia de moderada a grande, son muy duras, absorbiendo mucha energía durante la fractura.                  Creadas como aleaciones marinas de alta resistencia a los ambientes salados, también presentan buena soldabilidad.                  Se utiliza en aplicaciones estructurales de botes, barcos, tanques criogénicos y chasis de automóviles.</p>
<p><b>Serie 7xx.x, Al-Zn, características principales:</b>                  Termotratable. Resistencia a la tracción: 210-380 MPa.                  Envejecen de forma natural a temperatura ambiente, lo que aumenta su dureza, útil cuando se elabora fundiciones con formas difíciles sin que se agrieten o deformen. Tiene problemas de moldeabilidad. Se utiliza en piezas que son ensambladas por soldadura fuerte, herramientas de granja.</p>	<p><b>Serie 6xxx, Al-Mg-Si, características principales:</b>                  Termotratable. Resistencia a la tracción: 125-400 MPa.                  Buena formabilidad y soldabilidad, resistentes a corrosión, extruibles, pueden ser endurecidas por temple.                  Se utiliza en marcos de bicicleta, barandas de puentes, estructuras de techos para estadios, chasis de vehículos, tubos extruidos para de suspensión de automóviles.</p>
<p><b>Serie 8xx.x, Al-Sn, características principales:</b>                  Termotratable. Resistencia a la tracción: 105-210 MPa.                  Tiene gran capacidad de soportar carga, resistencia a la fatiga, resistente a la corrosión y buena maquinabilidad.                  Se utiliza en bielas de motor diésel, cojinetes de rodillos para camiones, cojinetes de trenes, rodamientos, bujes.</p>	<p><b>Serie 7xxx, Al-Zn, características principales:</b>                  Termotratable. Resistencia a la tracción: 220-610 MPa.                  Contiene de 1 a 8% de Zn, existe aleaciones ligeramente envejecidas que mejoran la resistencia mecánica, la tenacidad a la fractura y la resistencia a la corrosión.                  Se utiliza en bastidores de avión y en aeronáutica.</p>

(Fuente: Elaboración propia basada en [7], [12], [14])

### 1.3.4. Designación para tratamientos del aluminio y sus aleaciones

La designación para tratamientos del aluminio y sus aleaciones se expresa mediante una designación básica. La cual es una letra mayúscula que indica si es un tratamiento mecánico o térmico. En ocasiones cada letra tiene una subdivisión que se indica posterior a ella mediante uno, dos o más dígitos. Esta designación va después de la serie que identifica al material, y separadas por un guion. La norma para designar el tratamiento es también la norma ANSI H35.1, utilizada en productos trabajados o colados, excepto en productos que son hechos lingotes, a ellos no se les aplica un tratamiento. La norma ANSI para los tratamientos, se muestra en la Tabla del Anexo A1 [4], [7], [14].

## 1.4. Propiedades del aluminio y silicio

Las aplicaciones comerciales de las aleaciones Al-Si pertenecientes a las series 3xx.x y 4xx.x están determinados por las propiedades del aluminio y del silicio, su combinación proporcional en peso forma materiales polifásicos de microestructura compuesta. El

efecto del silicio en las propiedades tecnológicas de las aleaciones fundidas Al-Si es de vital importancia en los procesos de fabricación [15].

#### 1.4.1. Propiedades de aluminio

El átomo de aluminio (Al) tiene 13 electrones, de los cuales 3 están en su órbita externa (electrones de valencia). Cuando los átomos se enlazan unos con otros tienen que donar cada uno sus 3 electrones de valencia para poder formar un enlace metálico que origina una porción de metal, el cual posee un ordenamiento atómico repetitivo denominado celda unitaria, que es una estructura cristalina cubica centrada en las caras (CCC), teniendo 4 átomos por celda unitaria. Esto se muestra en la Figura 1.3 [15], [16].

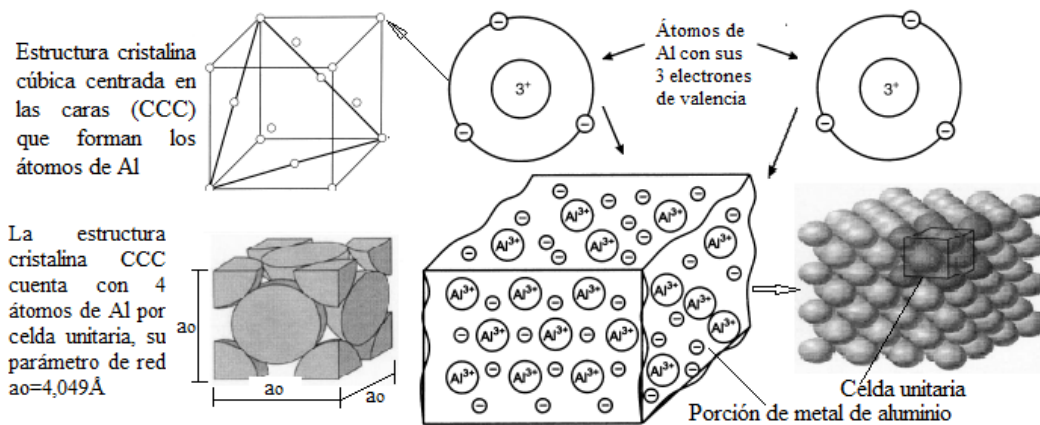


Figura 1.3. Porción de metal de Al formado por estructuras cristalinas CCC.  
(Fuente: Elaboración propia basada en [15], [16])

#### 1.4.2. Propiedades del silicio

El silicio (Si) es el tercer elemento más abundante en la corteza terrestre (28%), existe en forma de óxido de silicio (sílice  $\text{SiO}_2$ ) y silicatos. La sílice forma parte de minerales como el cuarzo, cristobalita y tridimita, y es el elemento principal de la arena. Los silicatos son componentes principales de arcillas, rocas y suelo, en forma de feldespatos, anfíboles, zeolitas piroxenos y micas, y de piedras semipreciosas como olivino, granate, turmalina zircón y topacio. El Si se utiliza para fabricar elementos electrónicos, también forma parte en ladrillos y cemento. En forma cristalina es dura y de color grisáceo, sus propiedades son intermedias entre metales y no metales, pudiendo formar un material monocristalino o policristalino [17], [18]. El Si metalúrgico tiene un bajo nivel de pureza, su forma cristalina se obtiene por reducción de sílice de alta pureza en carbono mediante hornos de arco eléctrico a temperaturas de 2000 °C, sin embargo en el proceso de reacción se produce un polvo de sílice amorfa. Es utilizado para obtener las diversas aleaciones Al-Si,



al añadir ciertos porcentajes en el aluminio fundido [17]. La Tabla 1.5 [8], [18] muestra las propiedades físicas del silicio y aluminio como elementos químicos [17].

Tabla 1.5. Propiedades físicas, térmicas, mecánicas y de arreglo atómico del silicio y del aluminio.

Propiedades	Silicio	Aluminio
Símbolo	Si	Al
Densidad, g/cm <sup>3</sup>	2,33(20 °C)	2,69(20°C)/2,35(700 °C)
Radio atómico, Å/mm	1,32/1,32 × 10 <sup>-7</sup>	1,43/1,43 × 10 <sup>-7</sup>
Número atómico	13	14
Peso atómico, u	28,086	26,981
Electrones de valencia	4	3
Punto de Fusión, °C	1410	660
Conductividad térmica a 25°C, W/(m.°C)	83,68	237
Coeficiente de expansión térmica (26°-126°C), °C <sup>-1</sup>	(2,5-3,1) × 10 <sup>-6</sup>	(23,2-24,9) × 10 <sup>-6</sup>
Resistencia última a la tracción del policristal, MPa	5300	44 (99,999%Al)
Dureza, Mohs	6,5	2,75
Familia	Metaloides o semimetales	Metal
Estructura cristalina que forman sus átomos	Cúbica de diamante CD formada por 4 celdas unitarias tetraédricas	Cúbica centrada en las caras CCC
Número de coordinación	4	12
Átomos por celda unitaria	8	4
Número de empaquetamiento	0,34	0,74
Parámetro de red, Å	5,4307	4,0495
Tipo de enlace	Covalente	Metálico

(Fuente: Elaboración propia basada en [8], [18])

### 1.4.3. Efecto del silicio en las propiedades tecnológicas de las aleaciones fundidas aluminio-silicio

Basado sobre los efectos de los elementos aleantes, algunas generalizaciones pueden ser hechas sobre las propiedades tecnológicas de las series fundidas de las aleaciones de Al. Estos efectos se pueden ver y comparar entre las distintas series por medio de la Tabla 1.6 [14]. Además, se observa como las aleaciones fundidas de las series 3xx.x y 4xx.x, que contiene como aleante principal el silicio, son la que mejores características de fluidez poseen al momento de ser colados en moldes de compleja e intrincada geometría.

Tabla 1.6. Efecto del Silicio en las propiedades tecnológicas de sus aleaciones.

Serie	Propiedades tecnológicas					
	Fluidez para ser colados	Agrietamiento en caliente	Hermeticidad	Corrosión	Acabado	Soldabilidad
1xx.x(Al)				1	1	1
2xx.x(Al-Cu)	3	4	3	4	1-3	2-4
3xx.x(Al-Si+Cu y/o Mg)	1-2	1-2	1-2	2-3	3-4	1-3
4xx.x(Al-Si)	1	1	1	2-3	4-5	1
5xx.x(Al-Mg)	5	4	4-5	3	1-2	3
7xx.x(Al-Zn)	3	4	4	4	1-2	4
8xx.x(Al-Sn)	4	5	5	5	3	5

1=calificación más alta, 5=calificación más baja. Estas calificaciones son generalizaciones y algunas aleaciones individuales pueden exhibir algún comportamiento diferente.

(Fuente: Kaufman, 2000, p. 34 [14])

## 1.5. Aplicaciones industriales de aleaciones Al-Si

En la Tabla 1.7, elaborada a partir de ASM Handbook Volume 2 [7], son mostradas las aplicaciones industriales de varias aleaciones de las series 3xx.0 y 4xx.0, donde el elemento de aleación principal es el silicio. Cada grupo de aplicaciones industriales tiene su serie numérica, composición, tipo de moldeo y tratamiento, propiedades mecánicas y térmicas. Esta base teórica servirá para identificar qué tipo de elementos y partes contienen un alto contenido de silicio, los cuales serán buscados y adquiridos como chatarra, para ser utilizados como material matriz en este proyecto de investigación.

Tabla 1.7. Aplicaciones industriales de aleaciones Al-Si.

Serie ANSI AA	Composición en %, con Al al balance	Tipo de moldeo/ tipo de tratamiento	$\sigma_y$ MPa	$\sigma_u$ MPa	HB	E GPa	% ε	$k$ W/m°C 25°C	$\lambda \cdot 10^{-6}$ °C <sup>-1</sup> 20-100°C	Aplicaciones industriales
308.0	5-6Si/4-5Cu/ 0,1Mg	Molde permanente/F	110	193	70	71	2	142	21,5	Rejillas ornamentales, reflectores, para usos generales.
319.0	5,5-6,5Si/ 3-4Cu/0,1Mg	Arena de moldeo/T6 Molde Permanente/T6	165 185	250 280	80 95	74	2 3	109	21,5	Blocks, cabezotes y cárteres de motores de combustión interna, tanques de gasolina.
332.0	8,5-10,5Si/2-4 Cu/0,5-1,5Mg	Molde permanente/T5	193	248	105	---	1	104	20,7	Pistones diésel, poleas, garruchas.
336.0	11-13Si/0,5-1,5 Cu/0,7-1,3Mg	Arena de moldeo/T551 Molde permanente/T65	193 296	248 324	105 125	73	0,5 0,5	117	19	Pistones diésel, pistones para autos, poleas.
354.0	8,6-9,4Si/1,6-2 Cu/0,4-0,6Mg	Molde permanente/T61	285	380	---	73,1	6	128	20,9	Aplicaciones que requieren gran resistencia y tratamiento térmico.
355.0	4,5-5,5Si/1-1,5 Cu/0,4-0,6Mg	Arena de moldeo/T6 Molde Permanente/T6	170 185	240 290	80 90	70,3	3 4	152	22,4	Bombas de combustible, pistones de compresores de aire, cabezotes con refrigeración líquida, cárteres de motores de aviones.
356.0	6,5-7,5Si/0,25 Cu/0,2-0,45Mg	Arena de moldeo/T6 Molde permanente/T6	165 185	228 262	70 80	72,4	3,5 5	151	21,5	Bombas de aviones, cajas de transmisión de autos, blocks de cilindros refrigerados por agua.
A356.0	6,5-7,5Si/0,2 Cu/0,25-0,45Mg	Arena de moldeo/F Arena de moldeo/T6 Molde Permanente/T61	83 207 207	159 278 283	---	72,4	6 6 10	151	21,5	Blocks y cabezotes de motores de autos de competición, aros de ruedas de autos, carcasas de ejes traseros, chasis de camión, ruedas de aeronaves, cárteres de aceite.
357.0	6,5-7,5Si/0,05 Cu/0,45-0,6Mg	Arena de moldeo/T6 Molde permanente/T6	296 295	345 360	90 100	71,7	2 5	152	21,6	Aplicaciones aeroespaciales, blocks de motores de autos.
359.0	8,5-9,5Si/0,2 Cu /0,5-0,7Mg	Molde permanente/T61	255	325	90	72,4	7	138	20,9	Piezas de gran resistencia para la industria aeroespacial.
360	9-10Si/0,6Cu/ 0,4-0,6Mg	Die casting/F	170	325	75	71	3	113	21	Piezas de motor fuera de borda, piezas para aviación y marina
380	7,5-9,5Si/3-4 Cu/0,1Mg	Die casting/F	165	330	80	71	3	109	21,2	Aspiradoras, encendedoras, cajas de engranes.
384.0	10,5-12Si/3-4,5 Cu/0,1Mg	Die casting/F	172	325	85	---	1	96	20,3	Pistones y transmisiones automáticas.
390.0	16-18Si/4-5Cu/ 0,45-0,65Mg	Die casting/T5	260	295	125	81,2	1	134	18	Blocks y cabezotes para autos, compresores de aire y de freón,
A390.0	16-18Si/4-5Cu 0,45-0,65Mg	Arena de moldeo/F,T5 Die casting/F	179 240	179 283	100 ---	81,2	1 1	134	18	bombas de resistencia abrasiva, zapatas de freno.
413.0	11-13Si/1Cu/ 0,1Mg	Die casting/F	145	296	80	---	2,5	121	20,4	Pistones fuera de borda, cubiertas de alumbrado.
443.0	4,5-6Si/0,6Cu/ 0,05Mg	Arena de moldeo/F Die casting/F	55 110	130 228	40 65	71	8 9	146	22,1	Utensilios de cocina, accesorios marinos, cuerpitos de carburador.

$\sigma_y$ =Esfuerzo de fluencia al 0.2% offset.  $\sigma_u$ =Resistencia última.  $k$ =Conductividad térmica,  $\lambda$ =Coef. de expansión térmica  
HB=Dureza Brinell realizada con una bola de Ø10 mm y carga de 500 kgf. E=Módulo de elasticidad o módulo de Young  
ε=% de elongación con una longitud de calibración de la probeta de 50mm

(Fuente: Elaboración propia basada en [7])

## 1.6. Procesos de fabricación por fundición de Al-Si

Los métodos de fundición para aleaciones de Al-Si son parte de los procesos de fabricación de elementos mecánicos, los cuales son de cuatro tipos: fundición en molde desechable de arena aglutinada o arena aglomerada, fundición en molde permanente die casting o con procesos híbridos [19]-[21].

### 1.6.1. Métodos de fundición para aleaciones aluminio-silicio

Los métodos de fundición para las aleaciones Al-Si generalmente son clasificados por el tipo de molde utilizado al momento de realizar la colada fundida, siendo desechables o permanentes [19]. Los moldes desechables se elaboran con arena de moldeo aglutinada o aglomerada, y su colada se la realiza por técnicas como fuerza de gravedad o a baja presión [20]-[22]. Los moldes permanentes se elaboran a partir de matrices metálicas o de grafito. Su colada se puede realizar por dos métodos: el primero, es el die casting, que se subdivide de acuerdo a la presión que ejerce la fundición sobre la cavidad del molde, siendo a baja o alta presión y por fuerza de gravedad, cuando se la realiza por fuerza de gravedad es llamada simplemente moldeo permanente; el segundo, son procesos híbridos, como squeeze casting, rheocasting (forja semisólida) y osprey process (atomizado de polvo metálico) [19]. La Tabla 1.8 [19], [21]-[23] muestra un resumen de los métodos de fundición para aleaciones Al-Si, tanto para moldes desechables y permanentes, debido a que estos métodos son utilizados en la fabricación de partes sometidos a altas exigencias mecánicas como blocks, bancada de cojinetes, cabezotes.

Tabla 1.8. Métodos de fundición para aleaciones Al-Si.

Técnica de colado	Tipo de molde		
	Molde desechable de arena	Molde permanente de coquilla de acero con núcleos de arena	Molde permanente de coquillas de acero
Fuerza de gravedad	X Moldeo desechable	X Moldeo permanente	X Moldeo permanente
Baja presión	X Moldeo desechable	X Die casting baja presión	X Die casting
Alta presión		X Die casting alta presión	X Die casting
Comprimida			X Squeeze Casting

Coquilla: es un molde permanente que puede ser fabricado en acero o grafito sólido.

(Fuente: Elaboración propia basada en[19], [21]-[23])

### 1.6.2. Fundición en molde desechable de arena aglutinada

Esta fundición utiliza un molde que está constituido por una mezcla de arena base que puede ser sílice, cromita, circón u olivino, con un aglutinante que casi siempre es arcilla del grupo montmorillonitas (bentonitas), y agua. Entre el aglutinante y el agua se originan

atracciones electrostáticas, que son fuerzas físicas no muy fuertes, responsables de la cohesión de los granos de arena que le dan características mecánicas bajas. Este molde no es recomendable para colar piezas de gran responsabilidad. En ocasiones el molde puede tener corazones de arena (núcleos o machos). Para su colada se utiliza técnicas de fuerza de gravedad o de baja presión. Solidificada la aleación su arena es desmoronada para la extracción del elemento fabricado, en estas circunstancias el molde no es reutilizable a lo que se atribuye el nombre desechable, destructible o perdido. Este método de fundición se aplica en producción de series pequeñas [20], [22], [23]. La Figura 1.4 [23] muestra la fundición de un elemento, que ha sido colado por fuerza de gravedad en un molde desechable de arena aglutinada.

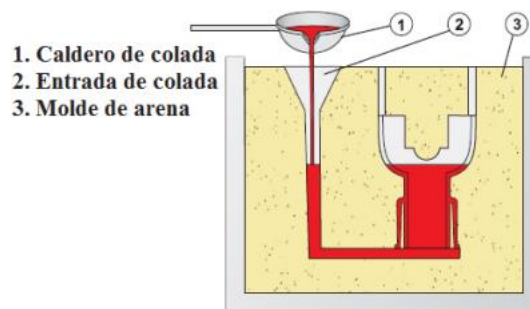


Figura 1.4. Fundición en molde desechable de arena aglutinada.  
(Fuente: Schilling and Schnaibel, 2009, p. 10 [23])

### 1.6.3. Fundición en molde desechable de arena aglomerada

Esta fundición utiliza un molde que está constituido por una mezcla de arena base que puede ser sílice, cromita, circón u olivino, con un aglomerante tipo resina orgánica o inorgánica. El mecanismo de aglomeración envuelve cada uno de los granos de arena, y también, produce una reacción química a su alrededor, que además de unirlos, los hace fraguar como un cemento, lo que confiere gran resistencia al molde o al macho fabricado, permitiéndole fundir geometrías complejas, además de darle una alta productividad al proceso. La forma de obtener el molde se conoce como moldeo químico [20]. Los moldes aglomerados son colados por fuerza de gravedad o baja presión. Solidificada la aleación, su arena es desmoronada para extraer la pieza fabricada, quedando el molde inutilizable (desechable). Estas arenas por su gran resistencia se utilizaron inicialmente para fabricar núcleos, pero con el paso del tiempo han sido utilizadas para elaborar moldes, que llevan en su cavidad gran número de machos de varios tamaños [20], [21], [24], [25]. La Figura 1.5 muestra la fundición de un block de 4 cilindros, que ha sido colado por fuerza de gravedad en un molde constituido por el ensamble de núcleos de arena aglomerada.



Figura 1.5. Fundición de un block de cilindros en molde desechable de arena aglomerada.  
(Fuente: <https://www.youtube.com/watch?v=Z8MaVaqNr3U>)

#### 1.6.4. Fundición en molde permanente die casting

Esta fundición utiliza un molde permanente, fabricado en acero para herramientas, hierro fundido, o grafito sólido. Su colada es realizada de acuerdo a la presión que ejerce la aleación fundida sobre la cavidad del molde siendo a baja presión, alta presión o por fuerza de gravedad. La colada adopta la forma interna de la cavidad del molde, y una vez solidificada es expulsada de su cavidad para obtener el elemento mecánico. Como el molde no es desechado, y sirve en cientos de fundiciones más, se lo llama permanente. Con esta fundición se obtiene gran precisión dimensional, alto acabado superficial, rápido enfriamiento, estructuras de grano fino y una alta producción. Por lo que, es utilizada en elementos que son sometidos a grandes exigencias mecánicas [10], [19], [22], [26].

La fundición en molde permanente colado por fuerza de gravedad, es conocida por algunas fuentes científicas simplemente como fundición en molde permanente. En otras no entra en la técnica de fundición die casting. Su colado se lo realiza a mano o con máquinas automatizadas. Cuando se utiliza núcleos de arena el proceso es llamado fundición en molde semipermanente [19], [26].

La fundición en molde permanente colado a baja presión utiliza sobrepresiones de 0,2 a 0,5 atm, La aleación fundida asciende en el molde sin generar turbulencias, lo que origina muy poca porosidad y microestructuras de excelentes propiedades mecánicas [23], [26].

La fundición en molde permanente colado a alta presión utiliza presiones de 70 a 1000 atm. Se aplica para producir partes de gran tamaño, formas complejas, alta resistencia, excelente acabado superficial, nítidos contornos, precisión dimensional [10], [23]. La Figura 1.6 [23] muestra esquemática la fundición die casting con sus tres tipos de colada.

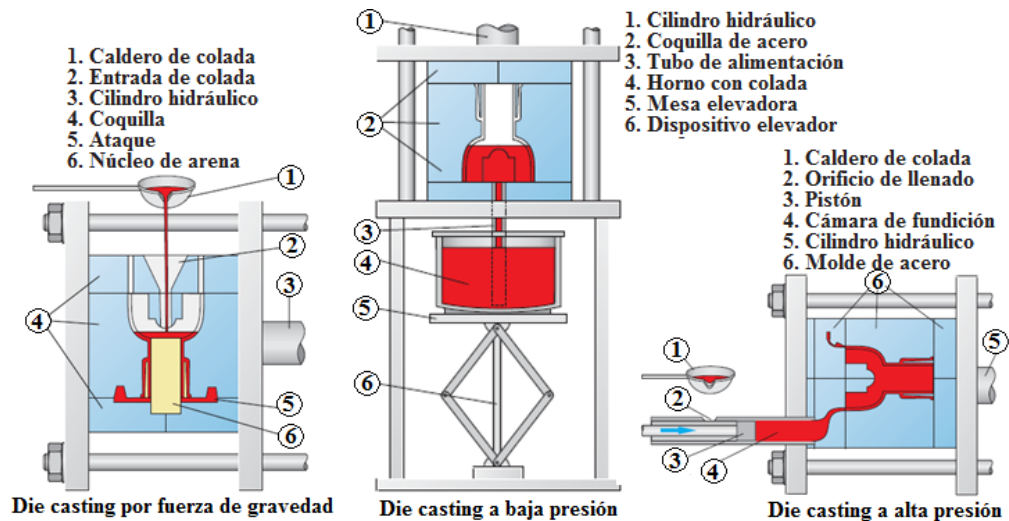


Figura 1.6. Fundición en molde permanente die casting.  
(Fuente: Schilling and Schnabel, 2009, p. 11, 12, 13 [23])

### 1.6.5. Fundición en molde permanente con proceso híbrido squeeze casting

Esta fundición utiliza un molde permanente que puede fabricarse en acero para herramientas, hierro fundido, o grafito sólido. Es conocido por algunas fuentes como fundición prensada, comprimida o estampada, o forja de metal líquido. Se trata de un proceso híbrido que combina la forja con la colada líquida, que consiste en llenar toda la cavidad interna de un molde precalentado con metal líquido, para posteriormente con la presión de una prensa hidráulica solidifique el líquido hasta obtener un elemento sólido. En este proceso la colada líquida sufre la forja de la prensa hidráulica, ejerciendo presiones que van desde 500 a 1000 atm, permitiendo que la solidificación se ejecute paralelamente a la acción de la forja, con este tipo de fundición se pueden obtener blocks de motores, cabezotes, aros de ruedas, cilindro maestro [19], [21], [26]. En la Figura 1.7 [26] se muestra la fundición por squeeze casting.

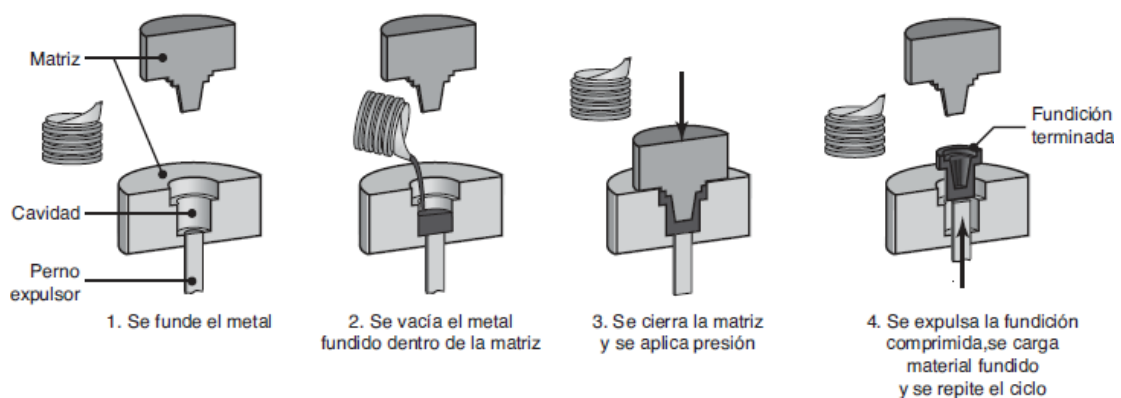


Figura 1.7. Fundición en molde permanente squeeze casting.  
(Fuente: Kalpakjian y Schmid, 2008, p. 311 [26])

## **CAPÍTULO 2**

### **MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ METÁLICA**

En este capítulo se presenta una breve historia de los materiales compuestos de matriz metálica (MCMM). Además de su ubicación dentro de la clasificación actual de los materiales. Se realiza una base teórica que permitirá fabricar un material compuesto de matriz metálica Al-Si reforzada con partículas de SiC. El capítulo presenta un estudio de la interfaz matriz metálica-refuerzo cerámico que es de gran importancia para el éxito de la fabricación. Se da a conocer los procesos de fabricación de MCMM, donde el proceso stir casting será utilizado para la agitación y dispersión del refuerzo en la matriz fundida. También se describen los parámetros que afectan y mejoran el proceso de fabricación del MCMM Al-Si reforzada con partículas de SiC vía stir casting. Por último, se presenta el concepto de moldura de fundición que es aplicado para calcular la masa de la moldura.

#### **2.1. Historia de los materiales compuestos de matriz metálica (MCMM)**

Surgen de la necesidad de obtener una combinación de propiedades que es difícil de hallar en los tradicionales materiales metálicos, cerámicos y polímeros. Por ejemplo, se requiere materiales de baja densidad, dúctiles y rígidos, resistentes al impacto a la abrasión y corrosión, propiedades que rara vez se dan juntas, pero en un MCMM es dable. Este tipo de material está formado por una matriz metálica, es por eso su denominación de MCMM, al cual se le añade un material refuerzo [27], [28].

Los MCMM aparecieron en la década de los 60 y 70 en USA, como un proyecto de investigación espacial y defensa. Siendo en Japón, en 1983, donde se lo introdujo a escala industrial, en un pistón de motor diésel para un automóvil Toyota, específicamente en las ranuras donde se alojan los anillos del pistón, material que estuvo formado por una matriz de aleación Al-Si reforzada con fibras de alúmina. Desde entonces, su interés se ha dado en la industria militar, automotriz y aeroespacial, con el objetivo de reducir el peso de partes para un menor consumo de combustible [27]-[29].

#### **2.2. Clasificación actual de los materiales**

Tradicionalmente los materiales se clasifican en metálicos, cerámicos, polímeros, semiconductores y composites. La combinación entre los cuatro primeros da origen a los composites o materiales compuestos. Sin embargo, con el desarrollo de nuevos materiales, se ha comenzado a dar una nueva clasificación, una de ellas es dada por

Michael Ashby [30], quien ha ubicado a los composites dentro de los denominados materiales híbridos, esto se muestra en la Figura 2.1.



Figura 2.1. Clasificación actual de los materiales incluidos los composites según Ashby.  
(Fuente: Ashby, 2011, p. 340 [30])

## 2.3. Materiales compuestos (MC)

Un material compuesto se define en función de los elementos que lo integran. Los componentes de los materiales compuestos son tres; matriz, refuerzo e interfaz. Su clasificación de forma general se la puede realizar en función de su matriz.

### 2.3.1. Material compuesto (composite)

Un composite es un sistema material, integrado por la combinación razonada de dos o más materiales tradicionales como los metálicos, cerámicos, polímeros y semiconductores, que difieren entre si en forma y composición química, y siendo insolubles al momento de mezclarlos, originando que sus materiales individuales mantengan su identidad en un único material con altas propiedades. Sus propiedades son la combinación individual de cada elemento, y según la función de cada uno de ellos, se los denomina matriz o refuerzo [28], [31], [32].

### 2.3.2. Componentes de los materiales compuestos

Un material compuesto está conformado por tres elementos, una matriz, uno o más refuerzos y una interfaz, como se muestra en la Figura 2.2 [33], [34]. Sus funciones principales dentro del composite son las siguientes [33]-[35].

La matriz o material base es la fase continua o dispersante (fase primaria), agregada en mayor porcentaje. Sirve de aglomerante otorgando consistencia y continuidad. Sus propiedades físicas, químicas, eléctricas y mecánicas, influyen en gran medida en el MC.



El refuerzo es la fase discontinua o dispersa (fase secundaria). Refuerza y mejora las propiedades de la matriz aparte de contribuir con las suyas. Soporta las solicitaciones mecánicas cuando en el composite a través de su matriz es sometida a cargas.

La interfaz es la superficie de contacto que existe entre la matriz y refuerzo. Permite que el refuerzo este fuertemente unido a su matriz para que la carga aplicada al composite se transmita desde su matriz hacia el refuerzo.

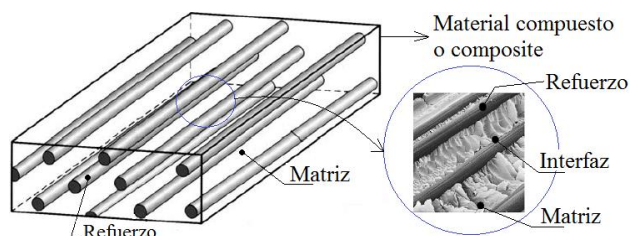


Figura 2.2. Elementos que conforman un material compuesto.  
(Fuente: Elaboración propia basada en [33], [34])

### 2.3.3. Clasificación de los materiales compuestos (composite)

Los materiales compuestos son clasificados según el tipo de material matriz, la cual está en mayor porcentaje de peso, pudiendo ser matriz metálica, cerámica o polimérica, y cada una subdividida según el tipo de refuerzo que es adicionado a su matriz. El tipo de refuerzo puede ser en forma de partículas, fibras, láminas y preformas [28].

## 2.4. Material compuesto de matriz metálica (MCMM)

Los componentes de un MCMM son: un material de tipo metálico y uno o más refuerzos. El metálico siempre va estar en mayor porcentaje que el refuerzo, y su combinación debe ser en porcentajes razonados. La clasificación de los MCMM está en función del tipo de refuerzo adicionado. Para el éxito en la fabricación de este tipo de materiales se debe tener en cuenta un criterio para seleccionar la matriz metálica y el refuerzo, además de cumplir cada una con su función dentro del composite. Actualmente matrices de Al y sus aleaciones son utilizadas por sus excelentes propiedades, a tal punto que la Aluminum Association (AA) ha elaborado una codificación para la interpretación de este tipo de MC.

### 2.4.1. Componentes de un MCMM

Un MCMM está conformado por una matriz que puede ser un metal, aleación o superaleación, más la adición de uno o más refuerzos de tipo cerámico, semiconductor o metálico, sea en forma de partículas, fibras, láminas o preformas, La adición del refuerzo

mejora las propiedades físicas y mecánicas sobre la matriz monolítica, y también origina la llamada interfaz en el composite [28], [36]. La investigación, para su uso industrial, se viene dando 60 años atrás, pero por problemas de incompatibilidad entre matriz-refuerzo, y su compleja y costosa fabricación, no ha permitido aún su utilización masivamente [27].

## 2.4.2. Clasificación de los MCMM

Los MCMM son clasificados según el tipo de refuerzo (partículas, fibras, láminas o preformas) que es agregado a su matriz [36]-[39], Figura 2.3 [36], [37], [39]. En la Tabla 2.1 [28], [36]-[39] se muestra su clasificación, con algunas posibles formas de refuerzos que sirven para reforzar a las diversas matrices citadas.

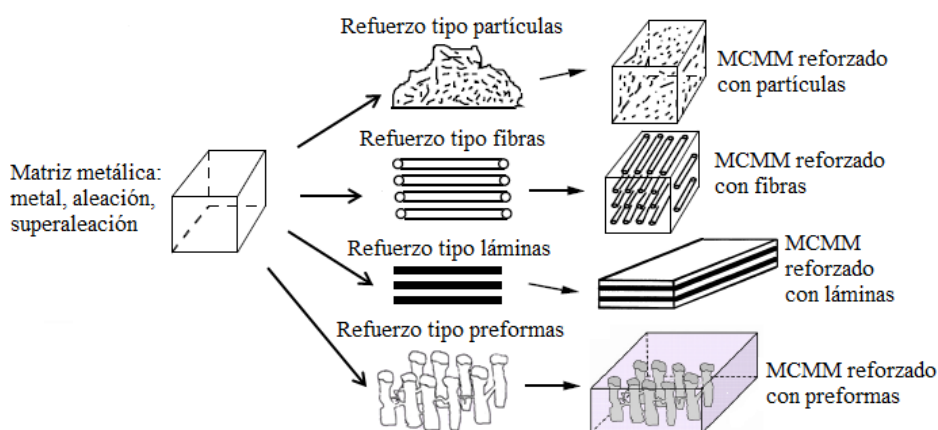


Figura 2.3. Clasificación de los MCMM según su tipo de refuerzo.  
(Fuente: Elaboración propia basada en [36], [37], [39])

Tabla 2.1. Clasificación de los MCMM según el tipo de refuerzo.

Matriz metálica	Tipo de refuerzo en la matriz	
Aluminio Magnesio Zinc Cobre Berilio Plomo Cobalto Titanio  Aleaciones de Fe Aleaciones de Al Aleaciones de Cu Aleaciones de Mg Aleaciones de Co Aleaciones de Ti	Reforzado con partículas	<b>Discontinuas (dispersas o aleatorias):</b> Finas, medias, gruesas Esferas huecas
	Reforzado con fibras	<b>Continuas alineadas:</b> Fibras continuas Filamentos Monofilamentos Alambres
		<b>Discontinuas (alineadas o aleatorias):</b> Fibras cortas o picadas Whiskers
	Reforzado con láminas	Hojas laminadas Capas (Tipo sánduche)
Superalaciones	Reforzado con preformas	Formas ordenadas

Materiales para refuerzos discontinuos	
Alúmina	Carburo de tungsteno
Grafito (carbono)	Nitruro de aluminio
Carburo de silicio	Nitruro de titanio
Nitruro de silicio	Carburo de titanio
Magnesio	Carburo de boro
Ti	
Materiales para refuerzos continuos	
Alúmina	Nitruro de boro
Aluminuros	Carburo de boro
Magnesio	Boro
Di boruro de titanio	Niobio
Carburo de silicio	Zafiro
Grafito (carbono)	Ti
Materiales para refuerzos tipo láminas y tipo preformas	
Pueden ser, como los usados para refuerzos continuos y discontinuos	

(Fuente: Elaboración propia basada en [28], [36]-[39])

### 2.4.3. Criterio para seleccionar matriz metálica y refuerzo

Cuando se trata de seleccionar estos dos materiales, para crear un composite, se puede realizar tomando en cuenta tres criterios:

El primer criterio es la selección de la matriz metálica, que depende de varios parámetros que el composite va a poseer. Estos parámetros son mostrados en la Tabla 2.2 [27], [28], [40], [41], que será utilizada para seleccionar la matriz en este proyecto de investigación.

Tabla 2.2. Parámetros para la selección del material matriz.

Parámetros del composite	Consideraciones para la selección del material matriz
Aplicación industrial que se desea obtener	Se debe considerar que el composite puede ser aplicado en elementos automotrices, aeroespaciales, hidráulicos, eléctricos, entre otros. Según estas aplicaciones se seleccionará una matriz metálica o sus aleaciones sea de Al, Mg, Ti, W, Cu, u otras. Las tablas del Anexo A2 brindan una ayuda para seleccionar la matriz, ya que muestran las aplicaciones industriales de materiales compuestos, tomando en cuenta el tipo de material matriz y refuerzo, propiedades requeridas y el proceso de fabricación.
Fácil de adquirir y económica	La matriz se puede adquirir como materia prima o chatarra reciclada, siendo el costo de la primera es mayor. En cambio, si se compra ciertas cantidades de chatarra esta tiene que realizarse un examen de elementos químicos para saber su composición, pero, si se desea obtener una cierta aleación se tendrá que realizar un afino de elementos químicos, lo que a escala industrial resulta más económico que comprar materia prima. Por lo tanto, la manera de adquisición repercute en el costo de fabricación del composite.
Proceso de fabricación	Su selección tiene directa incidencia en el costo del MC. Además, se debe tomar en cuenta la tecnología que se posee para el proceso de fabricación.

(Fuente: Elaboración propia basada en [27], [28], [40], [41])

El segundo criterio es la selección del refuerzo, que depende de las propiedades que va a aportar a la matriz, como también de los efectos que tenga sobre el composite a fabricar. Este criterio se fundamenta en varios parámetros que se muestran en la Tabla 2.3 [38], [40], que será utilizada para seleccionar el refuerzo en este proyecto de investigación.

Tabla 2.3. Parámetros para la selección del material refuerzo.

Parámetros	Consideraciones para la selección del material refuerzo
Aportación de propiedades a la matriz.	La aportación de las propiedades del refuerzo a la matriz, mejora las propiedades del composite, o también le permite adquirir alguna en especial. Por lo general los refuerzos cerámicos tienen un bajo coeficiente de dilatación térmica, estabilidad térmica, alta resistencia a la tracción y compresión, mayor módulo de Young, resistencia a procesos de abrasión.
Fácil de adquirir y barata	Seleccionar un refuerzo de fácil adquisición y económico, en el mercado, repercute en el costo de fabricación del composite.
Morfología y tamaño	Inciden en las propiedades finales del MC. Sin embargo, en el mercado, este parámetro es de difícil selección, ya que refuerzos como SiC, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , C, B o TiC, en forma de partículas, fibras o láminas, no se fabrican en el país. Por lo que tienen que ser importados por unas pocas empresas, que lo venden en forma y tamaño definidos.
Proceso de fabricación	El proceso de fabricación del MC depende de la morfología del refuerzo, esto se debe a que el material refuerzo puede tener forma de partículas, fibras, laminas o preformas, y no cualquier proceso se adapta a trabajar con estas formas. Este parámetro incide directamente en el costo del MC. Sin embargo, para su selección se debe tener en cuenta la tecnología que se posee para el proceso de fabricación. La Tabla 2.10 es una guía para seleccionar este parámetro.

(Fuente: Elaboración propia basada en [38], [40])

Para aplicar el tercer criterio, una vez selecciona la matriz metálica y su refuerzo, se tiene que ver la compatibilidad entre estos dos elementos, lo que permitirá asegurar que al momento de mezclarlos sean insolubles entre si. La Tabla 2.4 [36] sirve de ayuda para seleccionar la compatibilidad matriz-refuerzo.

Tabla 2.4. Compatibilidad matriz-refuerzo.

Matrices	Refuerzos														
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / SiO <sub>2</sub>	B	Grafito	Mo	Nb	SiC	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Acero	Ti	TiB <sub>2</sub>	TiC	W	Y	Zr
Aluminio	•	•	•	•			•	•				•		•	•
Beriliuros		•				•	•	•		•	•	•		•	•
Cobre				•			•				•		•		
Hierro									•						
Aluminuros de hierro						•	•			•	•			•	•
Plomo	•									•					
Magnesio	•			•				•							
Aluminuros de níquel		•				•	•	•		•	•	•		•	•
Superaleaciones					•	•			•				•		
Titanio				•			•			•	•	•			
Aluminuros de titanio		•				•	•	•		•	•	•		•	•

(Fuente: BDM Federal, 1993, p. 10 [36])

#### 2.4.4. Función de la matriz metálica, refuerzo e interfaz

El buen desempeño de un composite siempre va a depender de la interacción de sus componentes, y de las funciones que cada uno tenga que desempeñar, es así que en la Tabla 2.5 [32], [33] se dan las funciones que cada uno debe cumplir.

Tabla 2.5. Funciones que desempeñan la matriz metálica, refuerzo e interfaz.

Componentes	Funciones
Matriz metálica	Aglutina a los refuerzos, para protegerlo contra los efectos del medio ambiente. Englobar y sostener al refuerzo, otorgando consistencia y continuidad al material. Transferir las cargas aplicadas sobre la matriz hacia los refuerzos. Proveer soporte lateral contra la posibilidad de pandeo bajo cargas de compresión, cuando el refuerzo sea tipo fibras. Influir en las propiedades físicas, químicas, eléctricas y mecánicas del composite. Aportar el carácter dúctil-tenaz, para la transmisión de esfuerzos hacia el refuerzo. Poseer la aptitud de mojabilidad sobre el refuerzo, para formar la unión matriz/refuerzo.
Refuerzo	Aportar con propiedades según los requerimientos del composite. Mejorar las propiedades de la matriz, según la aplicación a la cual va estar sometido el MC. Soportar los esfuerzos, cuando al composite, a través de su matriz, es sometido a cargas. Mitigar los fallos de la matriz, cuando el MC esté sometido a elevadas temperaturas. Frenar o detener la propagación de grietas.
Interfaz matriz-refuerzo	Garantizar la unión entre los constituyentes Transmitir y repartir las cargas aplicadas desde la matriz al refuerzo, si la unión no es buena, la matriz soportará la mayor parte de las tensiones y la función de los refuerzos será nula. Permitir que la superficie del refuerzo sea mojada (impregnada) por la superficie de la matriz en estado líquido al momento de combinar estos dos elementos.

(Fuente: Elaboración propia basada en [32], [33])

## 2.4.5. Codificación para MCMM de aluminio y sus aleaciones

La codificación para MCMM de Al y sus aleaciones es dada por la AA mediante la norma ANSI H35.5, que utiliza una nomenclatura para su identificación, tomando en cuenta su material, forma y proporción, mostrada en la Figura 2.4 [13], [39].

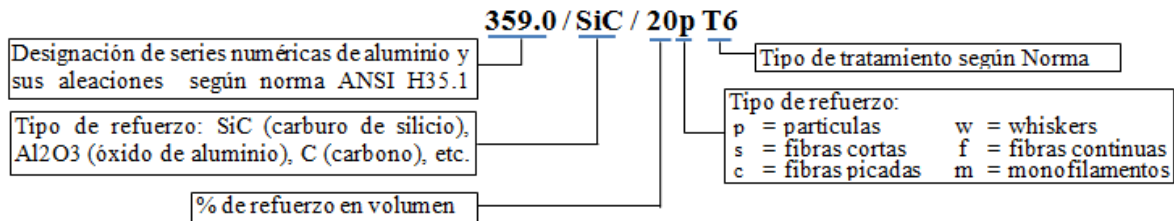


Figura 2.4. Codificación para MCMM de aluminio y sus aleaciones.

(Fuente: Elaboración propia basada en [13], [39])

## 2.5. Matrices metálicas de aleación aluminio-silicio

Hoy en día, las matrices metálicas de aleaciones de Al-Si y Ti, para la fabricación de composites, son las más empleadas en la industria automotriz y aeroespacial, debido a que en comparación con otros materiales los hace ideales en aplicaciones donde el material requiera bajo peso sometido a grandes solicitaciones mecánicas [38].

Las matrices de aleación Al-Si son utilizadas en la industria automotriz, gracias a que poseen excelentes propiedades, debido a la extensa cantidad de aleaciones que pueden formar. En comparación al acero, hierro fundido y superaleaciones, los hacen ideales para la fabricación de composites, por su alta relación resistencia-densidad, lo cual reduce el peso del vehículo con el consecuente ahorro de combustible [28], [38].

Las matrices más extensamente empleadas son aleaciones coladas de Al-Si:

...las cuales se utilizan para producir lingotes fundidos. El alto contenido de Si en las aleaciones de Al-Si mejora la colabilidad y reduce al mínimo la interacción química con los refuerzos de carburo de silicio durante la fusión. Comúnmente se emplean matrices de aleaciones coladas de Al-Si como de las series 359, 360 y 380. La infiltración de colada también es a menudo utilizada en aleaciones Al-Si, como la A356, usualmente utilizadas en requerimientos térmicos [28, p. 51].

Las propiedades de las aleaciones Al-Si fueron investigadas en el Capítulo 1. Además, en su Tabla 1.7 se detallan propiedades y aplicaciones de aleaciones 359, 360, 380, A356, entre otras. Esto se realizó con el objetivo de buscar y seleccionar una matriz de aleación Al-Si para reforzarla con un cerámico de carburo de silicio.

## **2.6. Refuerzos empleados para matrices metálicas**

Los refuerzos tipo fibras y partículas son empleados en las diferentes matrices metálicas, pero actualmente los refuerzos tipo partículas de SiC son más utilizados en matrices de Al y sus aleaciones, gracias a las propiedades que aporta a la matriz en comparación de refuerzos tipo partículas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{B}_4\text{C}$ , TiC, o tipo fibras de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  o C.

### **2.6.1. Refuerzo tipo fibras y tipo partículas**

Las fibras continuas, debido a su alto volumen y dirección paralela a su matriz, incrementan las propiedades mecánicas del composite (módulos de Young mayores a 150 GPa y cercanos al acero con 200 GPa), pero fibras de B o C limitan su uso por las reacciones químicas con la matriz fundida a altas temperaturas, pudiendo originar una interfaz frágil que reduce las propiedades del composite, Por tal motivo su manipulación requiere cuidado, teniendo que recurrir a técnicas como infiltración de preformas que encarece su costo. En cambio, las fibras cortas y picadas, y whiskers, son más versátiles en su uso, pudiendo emplearse en forma dispersa o alineada, consiguiendo módulos de Young similares a los composites reforzados con fibras continuas. Los refuerzos más utilizados en fibras continuas, cortas, picadas y whiskers, son  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , SiC y C [42], [43].

Las partículas dificultan o impiden el movimiento de las dislocaciones de la matriz metálica, haciendo que la matriz soporte la mayor parte de carga aplicada. Los refuerzos más empleados en matrices metálicas son el SiC,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , C, B y TiC, por su bajo costo y favorable combinación de propiedades. Los refuerzos de SiC son utilizados en matrices Al-Si, debido a su baja reactividad química cuando son expuestos a altas temperaturas, además, sus diversos tamaños, formas cristalinas y niveles de pureza, los convierte en los refuerzos más prometedores para procesos de fundición en serie [33], [41], [43].

### **2.6.2. Refuerzo tipo partículas de carburo de silicio**

El carburo de silicio (SiC) es un compuesto que se puede denominar una aleación sólida entre el silicio y carbono. Fue sintetizado por primera vez por Acheson en 1891, calentando una arcilla que contenía sílice ( $\text{SiO}_2$ ) y carbono (C), en un horno de arco eléctrico aproximadamente a 1600 °C. Su estructura básica está formada por un tetraedro donde cada átomo de C está rodeado por cuatro átomos de Si, y a su vez, cada átomo de Si está rodeado de cuatro átomos de C, lo que origina que este compuesto posea polimorfismo y según la forma de apilamiento de los tetraedros puede originar politipismo [44], [45].

Las formas polimórficas del SiC son dos, una de tipo  $\alpha$ -SiC de estructura cristalina hexagonal (H) y romboédrica (R), y otra de tipo  $\beta$ -SiC de estructura cúbica diamante (C). La de tipo  $\alpha$ -SiC presenta más de 200 politipos siendo los más comunes el 2H, 4H, 6H y 15R, y la de tipo  $\beta$ -SiC solo presenta un politipo 3C [44], [46].

Las partículas de SiC se presentan en forma de polvo, y son utilizadas como refuerzo en matrices de Al, Cu, Ti, y sus aleaciones, gracias a sus excelentes propiedades como alta resistencia a la tracción y compresión, baja expansión térmica, alta dureza, excelente resistencia al choque térmico y a la corrosión, pero con baja conductividad térmica, y frágil y poco tenaz a la vez. Para tener una idea de sus propiedades se ha elaborado Tabla 2.6 donde es comparado con otros tipos de refuerzo.

### 2.6.3. Comparación de refuerzos tipo partículas y tipo fibras

Los refuerzos de SiC o  $Al_2O_3$ , se utilizan especialmente en la industria automotriz y aeroespacial, para reforzar matrices de aleaciones de aluminio [38]. Las propiedades de estos refuerzos y otros más, se comparan en la Tabla 2.6, varios refuerzos muestran polimorfismo, que son diferenciados con los símbolos  $\alpha$  y  $\beta$ , con su respectiva estructura cristalina.

Tabla 2.6. Comparación de propiedades de refuerzos para matrices metálicas.

Tipo de refuerzo	Nombre Comercial	Estructura cristalina	$\varnothing$ $\mu m$	$\delta$ $g/cm^3$	Pto. de fusión $^{\circ}C$	$\sigma_u$ MPa	E GPa	Dureza HV/Mohs	$k$ W/m $^{\circ}C$	$\lambda \cdot 10^{-6}$ $^{\circ}C^{-1}$	Ref.
SiC ( $\alpha$ ) partícula 98%SiC	--	H (6H)	45	3,2	2300	--	430	2000/9,7	---	---	[28], [38], [47]
SiC ( $\beta$ ) fibra 99.8%SiC	Hi Nicalon S	CD (3C)	12	3,1	2830	2600	420	3980	42 a 20 $^{\circ}C$ 33 a 600 $^{\circ}C$	4,70 20-1500 $^{\circ}C$	[8], [28], [44]
$Al_2O_3$ ( $\alpha$ ) partícula 99,4% $Al_2O_3$	--	H con celdas R	45	3,9	2100	---	350	1800/6,5	25 a 20 $^{\circ}C$ 9 a 600 $^{\circ}C$	8,45 0-1427 $^{\circ}C$	[8], [28], [47]
$Al_2O_3$ ( $\alpha$ ) fibra 99% $Al_2O_3$	Nextel 610	H con celdas R	14	3,88	2100	2900	373	1500	25 a 20 $^{\circ}C$ 9 a 600 $^{\circ}C$	8,45 0-1427 $^{\circ}C$	[8], [28], [48]
C (Grafito) fibra	Panex	HC	8	1,74	3650	3600	228	---	129 a 20 $^{\circ}C$	---	[8], [28]
$B_4C$ partícula	--	R	22,8	2,52	2450	--	450	--/9,5	29 a 20 $^{\circ}C$ 83 a 425 $^{\circ}C$	6,02 25-1500 $^{\circ}C$	[8], [28], [38]
TiC partícula	--	CCC	22,8	4,93	3140	--	320	--/9,5	29 a 20 $^{\circ}C$	7,4 a 20 $^{\circ}C$	[28], [38]

H=Hexagonal. CD=Cubica diamante. R=Romboédrica. CCC=Cubica centrada en las caras.  $\sigma_u$ =Resistencia última.  
 $k$ =Conductividad térmica.  $\lambda$ =Coeficiente de expansión térmica. Partículas: es un polvo constituido por granos de ciertas dimensiones.

(Fuente: Elaboración propia basada en [8], [28], [38], [44], [47], [48])

## 2.7. Interfaz matriz metálica-refuerzo cerámico

Las propiedades mecánicas de un MC dependen en gran medida del comportamiento de la interfaz matriz metálica-refuerzo cerámico, debido a que estos dos elementos están en

contacto o unión íntima, lo que produce fenómenos físico-químicos que están en función de la naturaleza de sus materiales y del proceso de fabricación. Se puede considerar tres tipos de mecanismos de unión para la formación de la interfaz metal-cerámico: unión mecánica (las propiedades de la interface suele ser bastante reducida), unión química y reacción química (comúnmente se forman en proceso de fabricación en estado líquido como stir casting, o en estado semisólido como compocasting y rheocasting), ya que matriz y refuerzo se someten a altas temperaturas, que originan fenómenos químicos. Por lo tanto, una buena interfaz se da cuando el flujo de metal en fase líquida se extiende sobre el cerámico en fase sólida, lo que se llama mojado, lo cual involucra en procesos de fundición la unión y la reacción química [41], [49].

### 2.7.1. Unión química metal-cerámica

La unión química es un enlace entre dos estructuras en el que sólo existe transporte de carga y no de masa, a través de la intercara formada por el contacto metal-cerámico (contacto interatómico). La energía necesaria para su formación está relacionada con los valores de las energías superficiales del metal y el cerámico, siendo en general, más baja la de estos últimos [49].

Para que exista unión química debe existir el contacto de un líquido con una superficie sólida, lo que se llama mojado, que da lugar a tres tipos de mojadura: adhesión, extensión e inmersión. Cada tipo de mojadura se representa de manera esquemática en la Figura 2.5 [42].

La mojadura de adhesión se da cuando la superficie de un material sólido se aproxima a un material líquido hasta poner ambos en contacto. En cambio la mojadura por extensión se da cuando el material en estado líquido avanza sobre la superficie sólida de otro material. Mientras que la mojadura por inmersión ocurre cuando un material sólido es sumergido en un estado líquido [42].

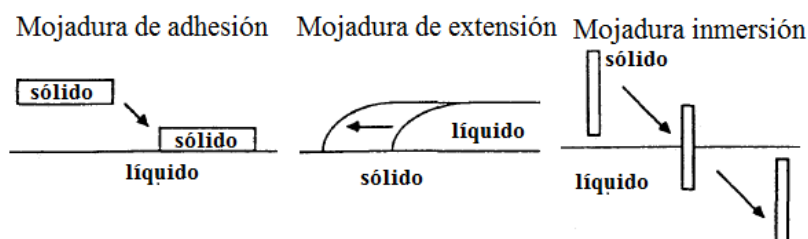


Figura 2.5. Clases de mojadura.  
(Fuente: Suárez, 1994, p. 16 [42])



### 2.7.1.1. Mojabilidad de líquidos sobre sólidos

La mojabilidad se define como la habilidad de un líquido para extenderse en una superficie sólida, o penetrar por los pequeños poros o grietas que ésta posea, que depende de las interacciones intermoleculares entre las moléculas superficiales de ambos materiales. Las fuerzas de adhesión entre el líquido y el sólido provocan que el líquido se extienda por la superficie sólida; mientras que las cohesivas del líquido, hacen que éste se abulte y tienda a evitarla. En un sistema compuesto de dos fases, una líquida y otra sólida, la líquida mojará a la sólida hasta un nivel dictado por sus energías superficiales del sistema. Cuando una gota líquida reposa sobre una superficie sólida, Figura 2.6, el ángulo de contacto  $\theta$  caracteriza la mojabilidad, la cual tiene una relación con la energía superficial de los materiales en el fenómeno de mojabilidad, esta relación fue introducida por la Ecuación 2.1 de Young-Dupre [41], [42].

La Figura 2.6 [42] muestra una gota líquida sobre una superficie sólida. En el sistema que moja, el material líquido se extiende sobre la superficie del material sólido. En el sistema que moja parcialmente, el material líquido se extiende con dificultad sobre la superficie sólida, o peor aún no logra la mojabilidad.

$$\gamma_{sv} = \gamma_{sl} + \gamma_{lv} \cdot \cos\theta \quad (2.1)$$

Donde:

- $\gamma_{sv}$  = Energía superficial de la interfaz sólido vapor.
- $\gamma_{sl}$  = Energía superficial de la interfaz líquido sólido.
- $\gamma_{lv}$  = Energía superficial de la interfaz líquido vapor.
- $\theta$  = Ángulo de contacto o de Young.
- si  $\theta = 0^\circ$  existe perfecta mojabilidad.
- si  $\theta = 180^\circ$  no existe mojabilidad.
- si  $0^\circ < \theta < 180^\circ$  existe parcial mojabilidad.

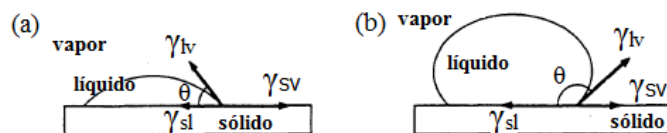


Figura 2.6. Mojabilidad de una gota líquida sobre una superficie sólida (a) sistema que moja y (b) sistema que no moja o moja parcialmente.

(Fuente: Suárez, 1994, p. 15 [42])

A cada una de las energías superficiales de la Ecuación 2.1, se las conoce como energía de interfaz o de intercara, se mide en  $J/m^2$ , por lo que es una densidad superficial de energía, que se puede definir como la energía almacenada por unidad de área. Desde el punto de vista mecánico, la energía superficial tiene correlación con la tensión superficial

o tensión interfacial, la razón es porque ambas son matemáticamente equivalentes, las unidades de la tensión superficial son N/m que corresponde a la fuerza por unidad de longitud ejercida sobre la interfaz. En cambio, la energía superficial representa la energía por unidad de superficie, siendo sus unidades  $J/m^2$  equivalente a N.m/m.m (trabajo realizado por la tensión interfacial al aumentar su área interfacial). Cuando se hace referencia a interfaces fluidas o flexibles es empleado el término de tensión superficial, mientras que para interfaces rígidas que tienen por lo menos una fase sólida se emplea el término de energía superficial [50].

La mojabilidad de cerámicos sobre materiales metálicos es muy compleja y aún en vía de desarrollo, sin embargo en:

...estudios experimentales realizados por diferentes autores demuestran que la mojabilidad de los cerámicos por metales es, en general, pobre debido al carácter no metálico de su enlace. En los cerámicos, el movimiento de electrones está restringido por la ionicidad o covalencia de sus redes, mientras que en los metales los electrones de enlace están deslocalizados. Por tanto, la creación de una interface metal-cerámica origina una discontinuidad electrónica y la energía asociada con esta discontinuidad es mayor que la que se precisa para la formación de la superficie libre de la cerámica. Por tanto  $\gamma_{metal} > \gamma_{cerámico}$ , lo que conduce a que no haya mojabilidad [49, p. 358].

#### **2.7.1.2. Mojadura por inmersión de partículas de SiC en aleaciones líquidas de Al-Si**

La introducción de una capa de partículas de SiC en una aleación líquida de Al-Si, es un ejemplo de mojadura por inmersión, al momento de fabricar un MC. El contacto inicial de las partículas con la fase líquida se logra sustituyendo la interfaz sólido-gas por una interfaz sólido-líquido. La posterior solidificación de la interfaz partícula-aleación líquida se sustituye por otra entre partícula y matriz sólida, hasta completar la solidificación, que es influenciada por el gradiente de temperatura, composición de la aleación, velocidad de enfriamiento, forma, tamaño y distribución de las partículas de SiC en la aleación líquida. Las propiedades mecánicas del MC dependen de la microestructura formada durante la solidificación y la interacción que se establezca entre las partículas y la matriz sólida [42].

#### **2.7.1.3. Parámetros para mejorar la mojabilidad entre matrices de aleación de Al-Si y refuerzos tipo partículas de SiC**

Los inconvenientes que se presentan al momento de dispersar el refuerzo tipo partículas de SiC en una matriz de aleación Al-Si mediante procesos de fabricación en estado líquido para la obtención de un MC son: una distribución no uniforme del refuerzo en su matriz (problemas de segregación), reacciones indeseables que se generan entre

matriz/refuerzo, y una pobre unión entre matriz/refuerzo [41], [51]. Estos inconvenientes pueden ser evitados mediante la mejora de la mojabilidad de las partículas de SiC. Para esto se puede aplicar técnicas como: el revestir las partículas con metales como Ni y Cu, oxidación de las partículas de SiC mediante el calentamiento de las mismas para formar una capa de SiO<sub>2</sub> alrededor de ellas, y la adición de un tensioactivo como el magnesio [51], [52]. De estas tres técnicas la que evita en mejor medida los inconvenientes expuestos anteriormente, es la adición de un tensioactivo, que aparte de ser económico, resulta menos complejo su adición en la matriz.

La adición de un tensioactivo o surfactante, como el magnesio (Mg), al ser un elemento reactivo que reduce la tensión superficial de la matriz fundida de Al o aleación de Al, mejora la mojabilidad del Al sobre las partículas sólidas de SiC, formando una unión química entre sus constituyentes [52]. La mejora de la mojabilidad al añadir Mg está basada en tres parámetros [51], [52]: Incremento de la energía superficial del sólido (partículas de SiC), disminución de la tensión superficial de la matriz líquida de Al o sus aleaciones y disminución de la energía interfacial matriz/refuerzo.

El Mg como tensioactivo disminuye o expulsa la capa de oxígeno que tienen las partículas de SiC alrededor de ellas, ya que forma compuestos como MgO y MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> de acuerdo a su contenido en la aleación de Al [51]. Los valores de tensión superficial tienen un papel fundamental en la mojabilidad de la matriz líquida sobre el refuerzo sólido, ya que la adición de Mg en la matriz líquida de Al o sus aleaciones, reduce la tensión superficial, evitando el rechazo de las partículas de SiC por parte de la matriz fundida [51]. La Tabla 2.7 [49], [51], [53]-[55] muestra la tensión superficial y la densidad, de algunos materiales metálicos y cerámicos, que interactúan entre si al fabricar un MC.

Tabla 2.7. Tensión superficial de metales y cerámicos.

Material	Temperatura de fusión °C	Densidad promedio g/cm <sup>3</sup>	Energía superficial promedio J/m <sup>2</sup>
SiC	2300	3,2	1,8 a Tf / 3,8 a Ta
SiO <sub>2</sub>	2230	2,63	0,3 a Tf / 0,31 a 1300 °C
Al	660	2,71	0,871 a Tf
Al-Si	577 eutéctico/1415 máx	2,74	0,725 a 577 °C / 0,725 a 1415 °C
Mg	650	1,74	0,577 a Tf
Tf=Temperatura de fusión    Ta=Temperatura ambiente			

(Fuente: Elaboración propia basada en [49], [51], [53]-[55])

Sukuraman *et al.* [52], estudiaron el efecto de la adición de magnesio durante la síntesis de un composite AA 356/SiC/10p obtenido por la técnica de fabricación stir casting (fundición mediante agitación), el cual contenía insuficiente cantidad de Mg en su matriz.

Para esto, adicionó a la masa fundida matriz-refuerzo, el elemento Mg, llegando a porcentajes totales de 0,4, 1 y 3,2% en peso de Mg, y concluyendo lo siguiente: La óptima adición de Mg para obtener la mejor dispersión de las partículas de SiC (evitar la segregación) en la matriz de aleación de aluminio AA 356, y maximizar las propiedades del composite, es alrededor del 1% de Mg, este porcentaje fue suficiente para mejorar la mojabilidad de la matriz hacia el refuerzo. En cambio, con cantidades del 0,4% de Mg se forma segregación o aglomeración del dispersante (SiC), además de una pobre uniformidad en la matriz. Cantidades de 3,2% de Mg conducen a la formación de la fase  $Mg_5Al_8$ , obtenida a un punto de fusión de 450 °C, con excesivas cantidades de la fase  $Mg_2Si$  que deterioran las propiedades mecánicas del MC. Las micrografías de la Figura 2.7 [52] muestran el composite AA 356/SiC/10p que contiene 0,4%, 1% y 3,2% de Mg.

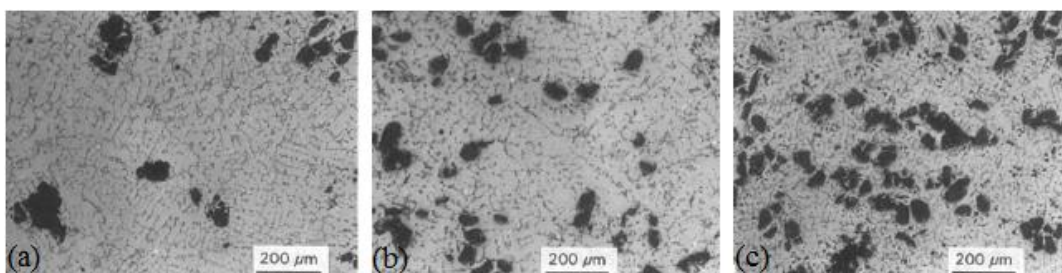


Figura 2.7. Micrografía de un MC AA 356/SiC/10p al: (a) 0,4%, (b) 1% y (c) 3,2% de Mg.  
(Fuente: Sukumaran *et al.*, 1995, p. 1471 [52])

Una técnica para incentivar la mojabilidad de aleaciones líquidas de Al-Si sobre partículas cerámicas de SiC, es mediante la agitación de la masa fundida matriz-refuerzo, ya que produce un íntimo contacto entre estos dos elementos. Siendo no muy aceptada como técnica, ya que más bien dispersa, y también evita la sedimentación o flotación del SiC en la aleación fundida Al-Si.

### 2.7.2. Reacción química matriz metálica-refuerzo cerámico

La formación de una reacción química en la intercara metal-cerámico implica la transferencia de materia a través de la propia intercara. Lo que conduce si no son controlados ciertos parámetros a la formación de capas interfaciales, que son una barrera que dificulta la mojabilidad de la matriz hacia el refuerzo, lo cual reduce las propiedades del composite. Entre la matriz metálica y el refuerzo cerámico, se pueden formar nuevas fases de reacción, que depende de varios parámetros de fabricación como termodinámicos, cinéticos, temperatura y tiempo de fundición, presión o composición química de los constituyentes [49], [56].

### 2.7.2.1. Reacción química de aleaciones fundidas de aluminio con partículas sólidas de SiC

Cuando un composite es fabricado por procesos en estado líquido, su matriz tiene que estar fundida para poder ser adicionado el refuerzo sólido, lo cual expone a estos materiales a elevadas temperaturas. Por lo tanto, la dispersión de partículas cerámicas de SiC en una solución líquida de aleación de aluminio, mediante agitación, con exposición a largos tiempos de permanencia, y en un estado mayor a la temperatura de fusión del Al, da origen a reacciones químicas indeseables en la interface, como las de carburo de aluminio ( $Al_4C_3$ ) que condiciona las propiedades del composite [41], [56].

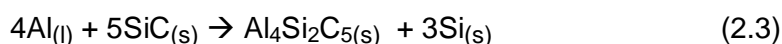
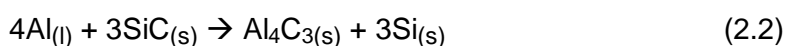
Las investigaciones de Ureña *et al.* [56] y Hashim [41], acerca de los inconvenientes que genera el producto  $Al_4C_3$ , debido a la reacción entre la matriz de aleación de aluminio fundida con el refuerzo de SiC, son detalladas en la Tabla 2.8 [41], [56].

Tabla 2.8. Inconvenientes por el producto de reacción  $Al_4C_3$ .

<b>Reacción entre Al con SiC</b>
$4Al_{(l)} + 3SiC_{(s)} \rightarrow Al_4C_{3(s)} + Si_{(s)}$
El Al que se encuentra en aleaciones fundidas de Al, reacciona con las partículas sólidas de SiC, a la temperatura del punto de fusión del Al, que es 660 °C, producto de la reacción se origina una interfaz de carburo de aluminio ( $Al_4C_3$ ) y silicio (Si).
<b>Inconvenientes que se genera en el composite por la formación de <math>Al_4C_3</math></b>
Degradación del refuerzo. Causa fragilidad al composite. Es hidrofóbica, por lo que reduce la resistencia a la corrosión del composite. La interfaz, que es una capa de $Al_4C_3$ , formada alrededor de las partículas sólidas de SiC, origina problemas de transmisión de cargas desde la matriz al refuerzo, reduciendo las propiedades mecánicas del composite. Descenso de las propiedades mecánicas del composite, no solo porque se trate de un compuesto frágil y poco resistente, sino que se origina a costa del consumo del refuerzo. La formación de $Al_4C_3$ es acompañada por un subproducto de Si, aumentando la cantidad de este elemento en la matriz, pudiendo causar modificación en la composición y metalurgia de la matriz, que es perjudicial para las propiedades de composite. Además de aumentar la viscosidad de la masa fundida matriz-refuerzo.

(Fuente: Elaboración propia basada en [41], [56])

Los composites constituidos por una matriz de Al o sus aleaciones reforzadas con partículas de SiC, no constituyen un sistema de equilibrio, pudiendo tener, según el tipo de proceso de fabricación, reacciones interfaciales a altas temperaturas, como las de la Ecuación 2.2 y Ecuación 2.3 [39], [56].



En la fabricación de un MCMM de Al o sus aleaciones reforzadas con partículas de SiC, expuesta a temperaturas mayores al punto de fusión de la matriz, se puede formar alrededor de las partículas de SiC el compuesto  $Al_4C_3$ , además del subproducto Si como lo muestra la Ecuación 2.2, lo que aumenta la cantidad de Si por disolución en la matriz fundida. La Figura 2.8 [39] representa la formación de  $Al_4C_3$  alrededor de una partícula de SiC, y también la formación de Si.

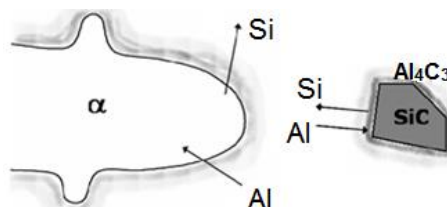


Figura 2.8. Formación de  $Al_4C_3$  y Si por reacción de aluminio con las partículas de SiC  
(Fuente: Fuentes, 2007, p. 166 [39])

La temperatura a la que se produce la reacción de la Ecuación 2.2 difiere según cada estudio. Singh *et al.* [51] menciona un intervalo de 650 a 920 °C. Fuentes [39] hace referencia a varios estudios donde indica temperaturas de 620 °C, 700 °C, 895 °C o 900 °C. Sin embargo, la temperatura de reacción depende de aleantes como Si o Mg.

En estudios microestructurales realizados por Ureña *et al.* [56], a muestras de un MC AA 2014/SiC/13p, después de ser fundida a 750 °C matriz/refuerzo (refuerzo agregado en estado de recepción), y mantenida la masa fundida a un tiempo de permanencia de 20 min con posterior solidificación, muestra que la formación de  $Al_4C_3$  se produce en ciertas zonas de la partícula. Pero al variar la temperatura y el tiempo de permanencia de la masa fundida, a 850 °C y 30 min, se produce el consumo casi total de las partículas. La Figura 2.9 [56] muestra la microestructura del MC AA 2014/SiC/13p donde se formó  $Al_4C_3$  a temperaturas de fundición de 750 °C por 20 min y 850 °C por 30 min.

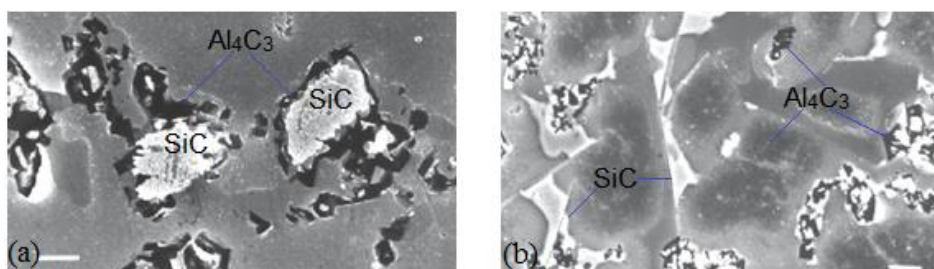


Figura 2.9. Microestructura del MC AA 2014/SiC/13p donde se formó  $Al_4C_3$  a temperaturas de fundición de: (a) mantenida a 750 °C por 20 min y (b) mantenida a 850 °C por 30 min.  
(Fuente: Ureña *et al.*, 2000, p. 246 [56])

Los estudios microestructurales realizados, por Ureña *et al.* [56], a dos muestras de un MC AA 1170/SiC/30p, después de ser fundidas a 900 °C matriz/refuerzo (con refuerzo agregado en estado de recepción) y mantenidas con tiempos de permanencia de 20 y 60 min, mostraron que a mayor temperatura de fusión, con tiempos de exposición prolongados de las partículas de SiC en la matriz de Al, hay un incremento de  $Al_4C_3$ . Esto se observa en las microestructuras de la Figura 2.10 [56]. En donde con un tiempo de 20 min la reacción química en las intercaras matriz/partícula está bastante extendida. En cambio, a un tiempo de 60 min la formación de  $Al_4C_3$  es mayor a la expuesta por 20 min.

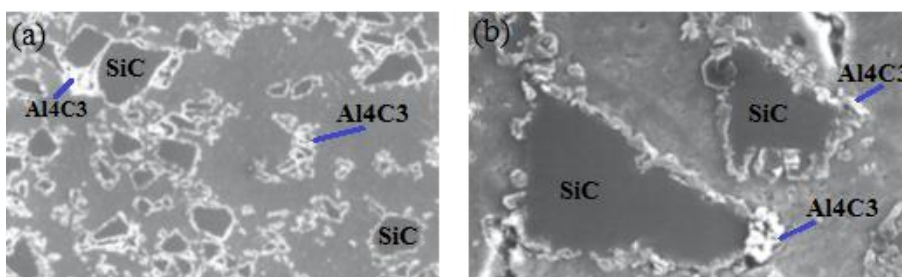


Figura 2.10. Microestructura del MC AA 1170/SiC/30p que muestra formación de  $Al_4C_3$  alrededor de las partículas de SiC: (a) mantenida a 900 °C por 20 min y (b) mantenida a 900 °C por 60 min. (Fuente: Ureña *et al.*, 2000, p. 246, 247 [56])

### 2.7.2.2. Control para evitar la formación de la interfaz $Al_4C_3$ y mejora de la mojabilidad

La formación de la interfaz  $Al_4C_3$  por reacción química entre matrices fundidas de Al o sus aleaciones con las partículas de SiC, se puede controlar tomando en cuenta los parámetros descritos por Hashim [41] y Ureña *et al.* [56], además, algunos mejoran la mojabilidad matriz-refuerzo. Estos parámetros se muestran en la Tabla 2.9 [41], [56].

Tabla 2.9. Parámetros para controlar la formación de la interfaz  $Al_4C_3$ .

Parámetros	Características para controlar la formación de la interfaz $Al_4C_3$
Matrices Al-Si	Utilizar aleaciones Al-Si que contengan entre 6 a 15% en peso de Si evitará que el Si de las partículas de SiC reaccione con el Al de la matriz Al-Si. Esto se debe a la estabilidad termodinámica del Al con el propio Si de la aleación a la temperatura de fusión del Al.
Partículas de SiC	Realizar la oxidación de la superficie de las partículas de SiC formará una capa exterior de $SiO_2$ alrededor de cada una de las partículas, que las protegerá del ataque químico de la matriz fundida a altas temperaturas. En este caso, la etapa inicial de la reacción implica la reducción de $SiO_2$ en lugar de la disolución de las partículas de SiC en el aluminio de la matriz.
Temperatura de fusión	No sobrecalentar la fundición matriz-refuerzo, esto evitará que la reacción entre el Al o sus aleaciones, al estar en contacto con las partículas de SiC, formen $Al_4C_3$ . Mantener a la temperatura de fusión la matriz, puede suprimir o mantener en cantidades bajas la reacción química no deseada entre la matriz fundida y las partículas de SiC.
Tiempo de agitación	Cuando se agite la matriz fundida de aluminio o sus aleaciones para adicionar las partículas de SiC, no realizarla por largos periodos de tiempo, ya que esto evitará la interacción, matriz-partículas, que da origen a la interfaz $Al_4C_3$ a elevadas temperaturas de fusión de la matriz.

(Fuente: Elaboración propia basada en [41], [56])

La reacción de  $\text{Al}_4\text{C}_3$  puede ser evitada utilizando matrices de aleaciones Al-Si que contengan altas cantidades de Si, ya que esto reduce la disolución del SiC en matrices de Al. Las matrices Al-Si recomendadas para evitar la formación de  $\text{Al}_4\text{C}_3$  pueden ser aleaciones de las series AA 319, AA 332, AA 356, AA A356, entre otras, donde el contenido de silicio recomendado es de 6% a 15% [41], [56].

En ensayos de reactividad-mojabilidad realizados por Ureña *et al.* [56] a MC AA 319.0/SiC/30p y AA 332.0/SiC/30p, sometidos a un proceso de fusión de 900 °C por 20 y 60 min, dan como resultado la inexistente formación de  $\text{Al}_4\text{C}_3$  en la interfaz matriz-refuerzo, pero con una reducción de la mojabilidad. Sin embargo, por otra parte menciona que el solo hecho de una reacción en la interfaz debe aumentar la mojabilidad.

La formación de  $\text{Al}_4\text{C}_3$  en la interfaz Al/SiC es frágil y perjudicial para las propiedades del MC. Siendo prevenido mediante la creación de una capa de óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) en la superficie de la partícula de SiC como se muestra en la Ecuación 2.4 [57], y como lo mencionan Ureña *et al.* [56] y Buntan *et al.* [57], con el incremento de la mojabilidad por la disminución del ángulo de contacto entre la matriz fundida y el refuerzo sólido de SiC.



La capa de  $\text{SiO}_2$  en las partículas de SiC es engrosada por calentamiento en aire, a una temperatura aproximada de 700 °C por una hora, incrementándose en un grosor de 30 a 50 nm [41]. Otra investigación simplemente calienta las partículas a 1000 °C por 4 h, las enfría a temperatura ambiente, y luego las vuelve a recalentar a 650 °C por 1 h, antes de mezclarlas en la matriz fundida de aluminio [57]. Otro estudio da a conocer que la oxidación de partículas de SiC consistió en un calentamiento a 1200 °C en aire, durante 2 y 8 h, formándose una capa de 100 y 136 nm, respectivamente [56].

El tratamiento realizado a las partículas de SiC, por Ureña *et al.* [56], consistió en el calentamiento a 1200 °C en aire, durante 2 y 8 h, para formar a su alrededor una capa de  $\text{SiO}_2$  con espesores de 100 y 136 nm respectivamente. Estas partículas tratadas, fueron utilizadas en la elaboración de un composite AA 1170/SiC/30p, el cual, posteriormente fue sometido a un proceso de fundición a 900 °C con un tiempo de permanencia de 20 min, con el objetivo de ser analizada. El análisis de difracción de rayos x reveló que si bien existe formación de  $\text{Al}_4\text{C}_3$  y silicio, sus cantidades son muy bajas, si son comparadas con un MC en donde se utilizaron partículas no oxidadas. En cambio, el análisis de microscopia electrónica de barrido (MEB) de la Figura 2.11 [56] muestra la formación de



cantidades muy bajas de  $Al_4C_3$  en el MC AA 1170/SiC/30p y con partículas de SiC oxidadas a 1200 °C por 2 h.

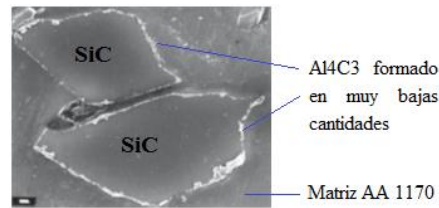
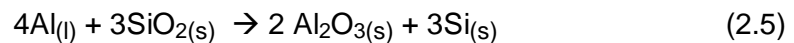
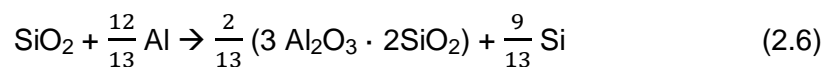


Figura 2.11. MEB del MC AA 1170/SiC/30p con sus partículas de SiC oxidadas a 1200 °C por 2 h. (Fuente: Ureña *et al.*, 2000, p. 248 [56])

Cuando se realiza la oxidación de las partículas de SiC, para formar una capa de  $SiO_2$  alrededor de ellas, y evitar la formación de  $Al_4C_3$  en un MC de matriz de Al reforzado con partículas de SiC, no existe problemas de mojabilidad, esto puede deberse a que la capa formada no es completamente inerte, sino que reacciona con el Al fundido a 700 y 900 °C, formando el producto  $Al_2O_3$ , como se muestra en la Ecuación 2.5 [49], [56].



La formación de  $\delta-Al_2O_3$ , en la Ecuación 2.5, ha sido demostrada por microscopía electrónica de transmisión, además se ha identificado otras posibles reacciones de interfaz, producto de la reacción entre la matriz de Al y la capa de  $SiO_2$  formada por la oxidación de las partículas de SiC, como se muestran en la Ecuación 2.6 y 2.7 [56].



## 2.8. Procesos de fabricación de MCMM

La elección de una técnica de fabricación de un MCMM depende de factores como el tipo de refuerzo que se utilice para incorporarlo a la matriz, las propiedades finales requeridas, y la más importante, el costo de fabricación. Estas técnicas de fabricación de MCMM se pueden clasificar en cinco grupos [39]: procesos de fabricación en estado líquido, procesos de fabricación en estado sólido, procesos de fabricación en estado semisólido, procesos de fabricación por deposición y procesos de fabricación in situ. A continuación en la Tabla 2.10 [27], [39], [58] se detalla de manera resumida los cinco procesos citados anteriormente, los mismos que tienen muchas similitudes con los procesos de fabricación por fundición.

Tabla 2.10. Procesos de fabricación de MCMM.

<p><b>PROCESOS EN ESTADO SÓLIDO:</b> Tanto la matriz como el refuerzo están en estado sólido, con este proceso se consiguen los materiales con más altas prestaciones, los más conocidos son:</p>	
<p><b>Pulvimetalurgia</b> Es básicamente igual a la pulvimetalurgia convencional. Solo se fabrica composites con refuerzos discontinuos. Utiliza todo tipo de matrices metálicas o aleaciones como Al, Mg, Cu, Fe, Ti, intermetálicos, etc. Se fabrica piezas de forma compleja y que no requieren un posterior mecanizado</p>	<p><b>Unión por difusión</b> Se forma por apilamiento de láminas alternadas de matriz y fibras en dirección longitudinal, para posteriormente darle un proceso de compresión en caliente. Utilizado en la industria aeroespacial, Utiliza matrices de Ti y sus intermetálicos. Utiliza refuerzos tipo fibras continua y monofilamentos</p>
<p><b>PROCESOS EN ESTADO LÍQUIDO:</b> En este tipo de procesos la matriz metálica tiene que estar en estado líquido (fundida), para agregar un refuerzo discontinuo, en cambio, cuando se tiene un refuerzo tipo preforma sea continuo o discontinuo la matriz fundida es agregada a la preforma, los más conocidos son:</p>	
<p><b>Stir casting (fundición mediante agitación)</b> Es prácticamente igual a los procesos de producción convencional de fundición, por lo que puede adoptar los procesos de fundición de Al del capítulo anterior. La pequeña diferencia entre la fundición convencional radica en la adición del refuerzo discontinuo al momento de estar fundida la matriz, lo que conduce a utilizar algún tipo de agitador para dispersar las partículas en la matriz. De esta forma se distribuye homogéneamente el refuerzo, para su posterior colada en un molde. Este proceso es el más económico en comparación al resto, por lo que en la actualidad las investigaciones se centran en esta técnica para producir componentes a precios competitivos. El stir casting es un proceso restringido a refuerzos discontinuos (partículas, fibras cortas o picadas y whiskers)</p>	
<p><b>Infiltración de preformas</b> En este proceso primero se tiene que construir una preforma porosa del material que constituye el refuerzo, la cual es colocada en una matriz, para posteriormente adicionar el metal fundido en la cavidad de la matriz, a la cual se le aplica una presión que consolida el metal líquido en las cavidades de la preforma. Este proceso tiene dos técnicas, la infiltración bajo presión de gas (IPG) y la infiltración por presión mecánica (IPM) conocida como squeeze casting (moldeo a presión). La IPM es una técnica especial del moldeo a presión de metales fundidos, donde la solidificación es promovida por la aplicación de una alta presión sobre un metal fundido dentro de un troquel. También es considerado como un proceso de conformado, en el que se combina un permanente moldeo con un forjado, en estas circunstancias el metal líquido es solidificado bajo una presión. En general, los procesos de infiltración de preformas son costosos, debido a que se tiene que elaborar una preforma a partir del refuerzo. Con este proceso se obtienen piezas de forma final, pudiéndose utilizar tanto refuerzos continuos como discontinuos.</p>	
<p><b>PROCESOS EN ESTADO SEMISÓLIDO:</b> Estos procesos implican la mezcla de la matriz metálica con el refuerzo, en la región bifásica sólido-líquido del diagrama de fases de la matriz., de ahí la dispersión del refuerzo es exactamente igual a la técnica de stir casting. Se debe tomar en cuenta que la agitación de la masa fundida matriz-refuerzo será más viscosa. Entre estos procesos se tiene el compocasting y rheocasting. Este proceso se restringe a refuerzos discontinuos.</p>	
<p><b>Rheocasting</b> La adición del refuerzo se la realiza mientras la aleación se encuentra entre la temperatura líquida y sólida (semisólido). Es adecuado para un posterior proceso de forja o conformado. También se lo llama reofusión o reocolada.</p>	<p><b>Compocasting</b> Es un estado intermedio entre el stir casting y el rheocasting, ya que mientras la mezcla matriz-refuerzo se la lleva a cabo en estado semisólido, la colada o el conformado de la masa fundida matriz-refuerzo se la realiza en estado líquido.</p>
<p><b>PROCESOS DE DEPOSICIÓN:</b> Estos procesos generalmente reúnen métodos de spray como la deposición por spray, conocida como spray formig, que está basada en la técnica de producción de polvos vía atomización, donde un chorro de metal líquido es pulverizado por la acción de un haz de gas inerte, formándose partículas de metal pulverizado que chocan contra el material de refuerzo en forma de polvo. De esta forma se obtienen partículas de material compuesto que se deposita en una preforma en donde se completa la solidificación. Con estos procesos de deposición se consigue velocidades de solidificación altas, lo que reduce la posibilidad de reacciones interfaciales, y en especial se minimiza la formación del compuesto <math>Al_4C_3</math>, cuando se refuerza materiales de aluminio o sus aleaciones, con partículas de SiC.</p>	
<p><b>PROCESOS DE FABRICACIÓN IN SITU:</b> En estos procesos de fabricación (procesos reactivos) la fase de refuerzo se fabrica en el momento, y el material compuesto se produce en un único paso como consecuencia de una adecuada selección de la aleación inicial.</p>	

(Fuente: Elaboración propia basada en [27], [39], [58])

## **2.9. Agitación para la obtención de MCMM**

La agitación y mezcla es un procedimiento necesario para adicionar y dispersar refuerzos sólidos discontinuos en matrices metálicas fundidas. Este procedimiento puede realizarse por procesos de fabricación como stir casting, rheocasting o compocasting, Los diversos tipos de agitadores tienen un papel fundamental para dispersar el refuerzo en el metal líquido ya que su forma, dimensiones y velocidad de rotación, influyen en las propiedades finales del composite cuando ha solidificado en el molde. Debido a estos parámetros se ha desarrollado la teoría de la suspensión de partículas sólidas en líquidos agitados.

### **2.9.1. Agitación y mezcla**

La agitación se refiere a forzar un fluido para que adquiera un movimiento circulatorio en el interior de un recipiente. El agitador crea un cierto tipo de flujo dentro del sistema, generalmente se crean movimientos violentos e irregulares (flujo turbulento), dando lugar a que el líquido circule por todo el recipiente y se mezcle homogéneamente con la adición de otro componente, en este caso como al fluido agitado se le ha añadido uno o más componente, sean o no miscibles, se trata de una mezcla. Se puede decir que la mezcla es una distribución al azar de dos o más fases inicialmente separadas. Los líquidos se agitan con diversos fines como: mezcla de dos líquidos miscibles, disolución de sólidos en líquido, mejorar la transferencia de calor, dispersión de un gas en un líquido, dispersar partículas finas en un líquido y dispersión de dos fases no miscibles [59], [60].

En este proyecto de investigación, para la obtención del composite, se realizará un procedimiento de agitación para la dispersión de partículas cerámicas de SiC (polvo de SiC) en una solución líquida de silicio en aluminio (aleación fundida Al-Si).

### **2.9.2. Tipos de agitadores**

El elemento mecánico empleado para la agitación es muy variado, el más utilizado para procesos de stir casting son los de tipo rotatorio que consiste de un elemento giratorio llamado rodete. En la Tabla del Anexo A3 [59], [60] se muestra las características principales de los agitadores clasificados según la forma del rodete.

### **2.9.3. Teoría de la suspensión de partículas sólidas en líquidos agitados**

A partir de esta teoría se realizará el diseño y construcción de las aspas del agitador las cuales dispersarán las partículas de SiC en la matriz fundida. Para lograr esto se tomará en cuenta dos criterios de mencionada teoría, la primera es el tipo y dimensiones de las aspas del agitador, y la segunda es la velocidad de rotación de las aspas.

### 2.9.3.1. Tipo y dimensiones de las aspas del agitador

El tipo de agitador que será seleccionado es el de paletas planas, por su bajo costo y fácil construcción, además de utilizarse en varias investigaciones para el mismo propósito de este proyecto. La dispersión de las partículas de SiC se logrará gracias a la rotación de las aspas del agitador, las cuales generan un flujo circular de la matriz fundida Al-Si sobre el crisol, logrando dispersar las partículas cuando estas ingresan al flujo de la fundición. El diseño y construcción de las aspas se fundamentará en los conceptos desarrollados por Hashim [41], y en la teoría de la suspensión de partículas sólidas en líquidos agitados que estudiaron Nagata [61] y Mak [62]. Hay que recalcar que el dimensionamiento de las aspas del agitador, además de tomar en cuenta conceptos desarrollados, se realizará mediante prueba y error, ya que la dispersión de partículas en la matriz fundida involucra control de varios parámetros (densidad, tensión superficial, viscosidad, rpm de las aspas, tiempo de agitación, forma de crisol, temperatura del proceso), lo que hace complejo y no definido un valor específico que deben tener las dimensiones de los agitadores. Razón por la cual, en artículos científicos varía el criterio en las dimensiones de las aspas. La Tabla 2.11 muestra las dimensiones recomendadas que puede poseer un agitador de paletas planas para lograr la suspensión y dispersión de partículas sólidas en líquidos. A partir de la Tabla 2.11 se realizará el dimensionamiento de las aspas del agitador tipo paletas, tanto para desarrollar las pruebas preliminares como las fundiciones finales.

Tabla 2.11. Dimensiones recomendadas para un agitador tipo paletas planas.

Tipo de crisol	Dimensiones referenciales para un agitador tipo paletas planas						Observaciones
	$\emptyset$	b	C	$\theta$	n	Ref.	
Crisol cilíndrico de fondo cóncavo	0,4D	0,1 a 0,2D	0,1H	90°	2	[61]	Debe encontrarse un $\emptyset$ óptimo para que las partículas sean fluidizadas, a ciertos valores de velocidad del agitador
Crisol cilíndrico de fondo cóncavo	0,3 a 0,6D	0,2 a 0,5 $\emptyset$	0,8 a 0,4H	30° a 90°	4	[62]	Mientras menor sea el diámetro $\emptyset$ mejor eficiencia en la suspensión La suspensión se logra con distancias C no muy grandes
Crisol cilíndrico de fondo plano	0,45 a 0,5D	0,1 a 0,2D	0,1H	45°	4	[61]	Debe encontrarse un $\emptyset$ óptimo para que las partículas sean fluidizadas, a ciertos valores de velocidad del agitador
Crisol cilíndrico de fondo plano	0,7D	0,1D	0,1 a 0,2H	90°	2	[41]	La simulación FEA para suspensión de partículas, indica que a esos rangos de C se obtienen los mejores resultados La velocidad de rotación tiene gran impacto en las características de la suspensión

n=número de aspas. D=diámetro del crisol.  $\emptyset$ =diámetro de las aspas. b=altura de las aspas. C=distancia de la base del crisol a las aspas. H=altura de la masa fundida correspondiente a la moldura de fundición en estado líquido.  $\theta$ =ángulo de inclinación de las aspas.

(Fuente: Elaboración propia basada en [41], [61], [62])

### 2.9.3.2. Velocidad de rotación de las aspas del agitador

La velocidad de rotación de las aspas del agitador para lograr la dispersión de partículas sólidas en líquidos agitados que están contenidos en crisoles cilíndricos, es un parámetro que se debe tener en cuenta para alcanzar el objetivo de la dispersión. Es así, que en la investigación realizada por Mak [62] menciona que una baja velocidad de rotación del agitador produce la sedimentación de las partículas sólidas en el fondo del recipiente

cilíndrico. En cambio, la investigación de Hashim [41] se describe que a altas velocidades de rotación se forma un indeseable vórtice en la superficie del fluido, la formación de este vórtice puede ocasionar la aspiración de gases en el interior de la masa fundida matriz-refuerzo, lo que origina problemas de porosidad al momento de la solidificación del MC.

La velocidad de rotación de las aspas del agitador para dispersar las partículas de SiC en aleaciones Al-Si, es un valor no definido en las diferentes fuentes de investigación. Estos valores de rotación están entre 100 a 1000 rpm y toman en cuenta parámetros como el diámetro, densidad y porcentaje de las partículas, además de la viscosidad y tensión superficial del fluido, haciendo que el experimento pueda apoyarse en prueba y error. En este proyecto para definir las rpm del agitador, se lo irá variando a través de las pruebas preliminares, hasta conseguir la dispersión de partículas de SiC en la matriz fundida Al-Si.

## **2.10. Parámetros que afectan y mejoran el proceso de fabricación del MCM Al-Si reforzada con partículas de SiC vía stir casting**

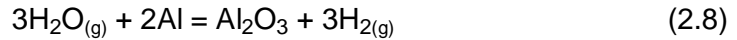
El proceso de fabricación del composite tomará en cuenta parámetros como: porosidad a causa de la presencia de hidrógeno, control de la porosidad, porosidad por la incompleta combustión del horno, formación de escoria e inclusiones no metálicas, control de escoria e inclusiones no metálicas, recubrimiento de herramientas, aplicación de fundentes, formación de la interfaz  $Al_4C_3$  y mejora de la mojabilidad, control para evitar la formación de  $Al_4C_3$ , porosidad por efecto de la adición de partículas de SiC, calentamiento de las partículas de SiC, efectos de la adición de Mg a una aleación Al-Si+Mg y tipo de molde.

### **2.10.1. Porosidad a causa de la presencia de hidrógeno**

El hidrógeno es solo un elemento de los muchos componentes gaseosos disueltos en el aluminio fundido, pero es el más importante. Su presencia en forma de poros, cuando ha solidificado la fundición, afecta negativamente a propiedades como resistencia, ductilidad, calidad superficial, etc. La solubilidad del hidrógeno en aluminio es determinada por una relación de equilibrio entre la concentración de hidrógeno en el aluminio y la presión parcial del gas hidrógeno en la atmósfera, siendo la solubilidad más baja en aluminio sólido que en líquido. Por lo tanto, el exceso de hidrógeno disuelto en aluminio fundido por sobre la solubilidad sólida forma poros de gas hidrógeno durante la solidificación [4].

La porosidad en aleaciones sólidas de aluminio a causa de hidrógeno tiene su origen en las condiciones ambientales a las cuales fue expuesta la fundición. Por ejemplo, una aleación Al-Si expuesta a su temperatura de fusión y al vapor de agua, que se encuentra

en la humedad del medio ambiente, genera una reacción química como la que se muestra en la Ecuación 2.8, produciéndose gas hidrógeno que se disuelve en la aleación y una capa de óxido de aluminio sobre su superficie [4].



El hidrógeno en el aluminio fundido (H) tiene una relación de equilibrio con el gas hidrógeno en la atmosfera del ambiente, como muestra la Ecuación 2.9 [4]:

$$\text{H}_{(\text{Al})} = \frac{1}{2}\text{H}_{2(g)} \quad (2.9)$$

La constante de equilibrio (KH) de la Ecuación 2.10 está dada por la Ecuación 2.9. Donde fH es el coeficiente de actividad de hidrógeno en el aluminio, [%H] es la concentración de hidrógeno en aluminio, y PH<sub>2</sub> es la presión parcial del gas hidrógeno en la atmosfera [4].

$$KH = \frac{P_{\text{H}_2}^{1/2}}{f_{\text{H}} * [\% \text{H}]} \quad (2.10)$$

Los mecanismos de disolución de hidrógeno en el aluminio fundido, a partir del vapor de agua que se encuentra en la humedad de la atmósfera, son mostrados en la Figura 2.12 [4]. Aquí el vapor de agua se difunde a través de la capa límite de gas y es absorbido por la capa superficial del Al a temperatura de fusión. Las moléculas absorbidas reaccionan con el aluminio, Ecuación 2.8, produciéndose moléculas de hidrógeno gaseoso, en donde una parte son devueltas desde la superficie del aluminio a la atmosfera, pero otra cantidad se difunden a través de la capa límite de la colada, en donde se disocian y forman hidrógeno atómico que se difunde en todo el volumen de la colada [4].

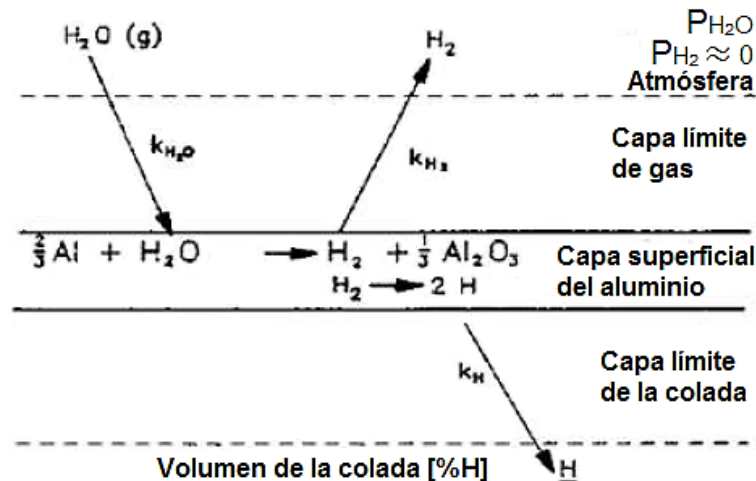


Figura 2.12. Mecanismos de disolución de hidrógeno en el aluminio fundido a partir de la humedad en la atmosfera.

(Fuente: Totten and MacKenzie, 2003, p. 646 [4])

## 2.10.2. Control de la porosidad a causa de la presencia de hidrógeno

El control de la porosidad a causa de la presencia de hidrógeno disuelto en Al o sus aleaciones sólidas, es controlada o minimizada tomando en cuenta parámetros como:

La solubilidad del hidrógeno depende del tipo de Al, a una temperatura de 750 °C la solubilidad en ppm en: Al puro es 1,2; Al-4Mg-2Si es 1,15; Al-4.5Cu es 0,88; Al-7Si-0.3Mg es 0,81; Al-6Si-3.5Cu es 0,67; lo que refleja que un incremento de Cu y Si reduce la solubilidad de hidrógeno, mientras que el Mg la aumenta [4].

El no elevar demasiado la temperatura del punto de fusión, contribuye a que el hidrógeno contenido en el vapor de agua de la atmósfera sea menos soluble en el aluminio o sus aleaciones, en comparación a altas temperaturas, como lo indica la Figura 2.13 [4]. Por este motivo, el controlar la temperatura para no sobrecalentar el material líquido, juega un papel fundamental para que la solubilidad del hidrógeno en el metal líquido y posterior solidificación tenga la menor porosidad posible [4].

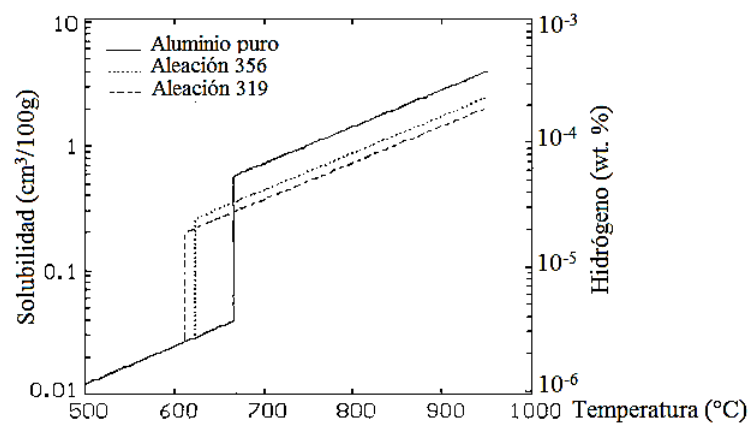


Figura 2.13. Solubilidad de hidrógeno en varios tipos de aluminio.  
(Fuente: Totten and MacKenzie, 2003, p. 595 [4])

No exponer la fundición a la atmosfera del medio ambiente, ya que el aluminio o sus aleaciones, junto con su temperatura de fusión, generan los inconvenientes mencionados en el ítem 2.10.1. Para esto se debe colocar la tapa del horno de fundición, de esta forma se aísla el material que está en el crisol.

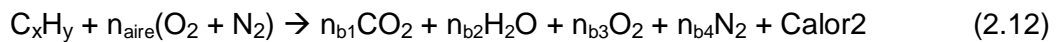
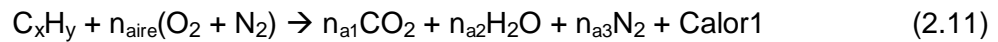
El contenido de hidrógeno se minimiza eliminando la humedad del material, la del interior del horno, y la del interior del crisol, antes de comenzar con el proceso de fundición Para esto se debe precalentar citados elementos. El hidrógeno remanente se elimina casi en su totalidad desgasificando la matriz fundida y colándola a baja temperatura, unos cuantos grados menos respecto al punto de fusión de la aleación [39].

La presencia de humedad, generalmente vapor de agua, que se adhiere al material en estado sólido, debe ser secado mediante calor. Esta acción permite reducir las pérdidas de la aleación fundida, ya que se evita la reacción del Al fundido con el vapor de agua, originando una capa de óxido de aluminio, en forma de nata, que queda como escoria en el crisol después de la colada en el molde.

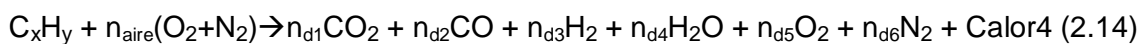
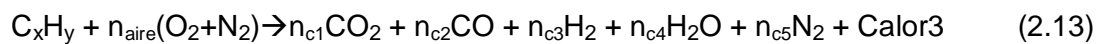
### 2.10.3. Porosidad por la incompleta combustión del horno

Los hornos de combustible pueden generar hidrógeno en su atmosfera interna, debido a la incompleta combustión del combustible utilizado en la generación de calor para la fusión de aleaciones de aluminio [19].

En la combustión completa se produce el consumo total del combustible por reacción del oxígeno que es parte del flujo de aire que suministra el ventilador del horno. Esta puede ser completa estequiometria, cantidad estricta de oxígeno, Ecuación 2.11 [63], o completa con un exceso, Ecuación 2.12 [63]. Estas reacciones no producen hidrógeno gas, pero si gases de escape como CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, que son expulsados por la chimenea del horno.



Una combustión incompleta se produce por defecto de O<sub>2</sub>, Ecuación 2.13 [63], o un exceso, Ecuación 2.14 [63]. Estas reacciones producen H<sub>2</sub> que es muy reactivo y soluble con la superficie fundida que está contenida en el crisol, generando la porosidad mencionada en el ítem 2.10.1. A pesar de que el H<sub>2</sub> es expulsado junto con los otros gases de combustión por la chimenea del horno, siempre va a ver un remanente que se introduce en la aleación de aluminio en estado fundido.



Para evitar la formación de hidrógeno, se necesitará regular el flujo de combustible del quemador y el flujo de aire del ventilador, por experiencia un color azul de la llama es un indicativo de una combustión completa de los reactivos. Además, un adecuado diseño de la chimenea del horno permitirá una fácil y rápida evacuación de los gases de combustión, lo que evitará porosidad, escoria e inclusiones, por reacción de estos gases con la aleación de aluminio fundida.



#### 2.10.4. Formación de escoria e inclusiones no metálicas causantes de pérdidas de material fundido

La escoria, un subproducto de la fundición, no es otra cosa que óxidos y compuestos no metálicos. Se compone de una capa de óxido de aluminio ubicada sobre la superficie del metal líquido, en la cual los demás óxidos forman una red continua de pequeñas placas que se encargan de atrapar las gotas de aluminio líquido, que si no es tratada y retirada adecuadamente en el proceso anterior al vaciado, es la causa principal de inclusiones no metálicas, que originan defectos metalúrgicos y fases secundarias durante la solidificación. Además, esta escoria al momento de ser retirada con una cuchara también se lleva consigo gotas líquidas atrapadas en ella, causando pérdidas de material [4], [64].

Si en la superficie de la chatarra de Al o en el interior del crisol, se tiene pinturas, sales, óxidos, carburos, nitruros, cloruros, que no han sido eliminados, estos serán removidos, atrapados y dispersados en la fundición, adoptando el nombre de inclusiones, que en el caso de óxidos y nuevos óxidos, originados por la temperaturas de fusión, emergen a la superficie del metal líquido y son atrapados como impurezas por la escoria [4], [64], [65]. La Figura 2.14 [65] muestra la química del aluminio fundido, en la que se indica como interactúan el hidrógeno, oxígeno, inclusiones, escoria y la capa de  $Al_2O_3$ .

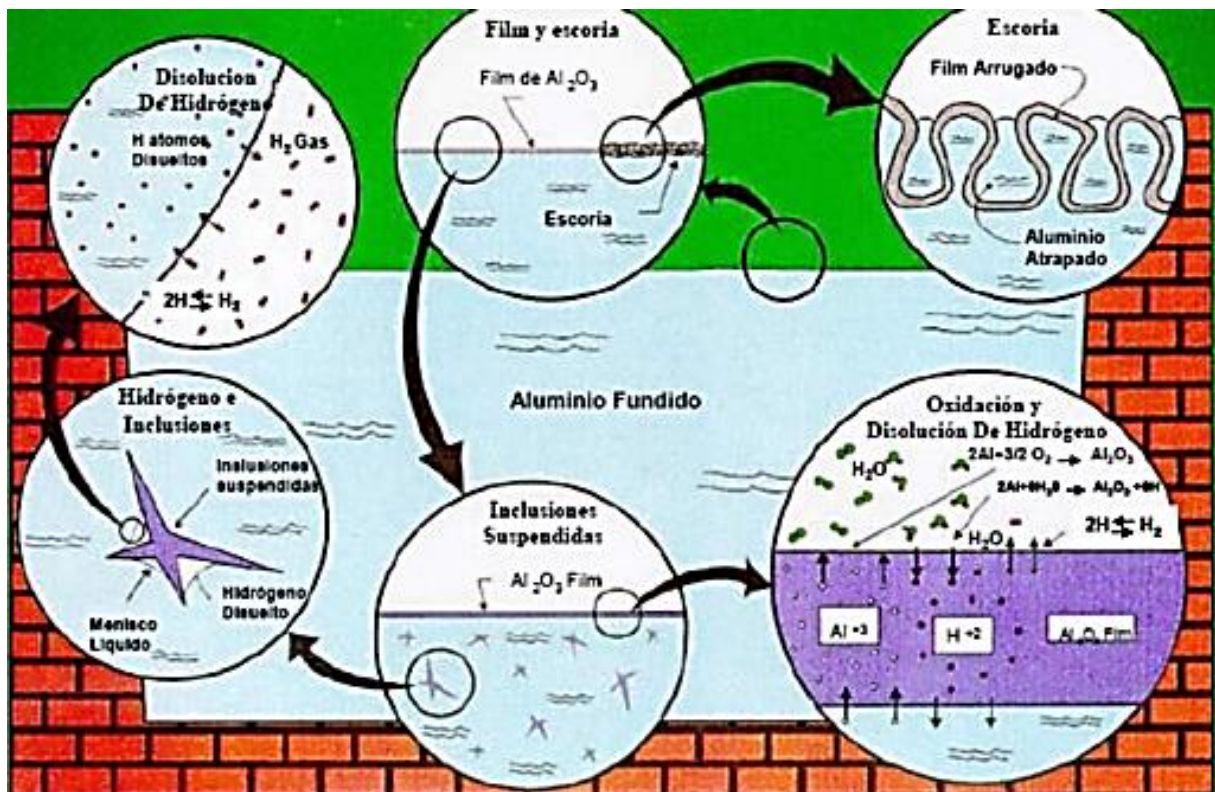


Figura 2.14. Química del aluminio fundido.  
(Fuente: Figueroa, 2009, [65])

### **2.10.5. Control de escoria e inclusiones no metálicas que evita pérdidas de material por procesos de fusión de chatarra**

Las pérdidas de material a causa de la fusión de aluminio secundario o chatarra se pueden minimizar tomando los siguientes aspectos:

Las cargas metálicas dentro del crisol deben ser lo más grande y macizas posibles. Ya que cargas de espesores delgados y longitudes pequeñas tienen una área específica grande, contribuyendo a que las suciedades imperceptibles y adheridas al material sólido se introduzcan en el Al fundido, convirtiéndose en óxidos y escoria, que atrapa el material líquido, causando pérdidas de material al momento de retirar la escoria con una cuchara.

La superficie de la aleación debe estar libre de polvo, grasa, aceite, pintura, etc., antes de ser introducida en el crisol. Esto permite que las impurezas no se conviertan en escoria e inclusiones no metálicas en la aleación fundida, y causen el atrapamiento de material líquido, que origina pérdidas de material al momento de retirar la escoria con la cuchara. La limpieza también se la debe realizar al crisol para evitar la formación de escoria.

### **2.10.6. Recubrimiento de herramientas utilizadas en la aleación fundida**

Al momento de utilizar las herramientas de acero inoxidable o acero al carbono, para el picado, escorificado, desgasificado y colado, es probable la difusión de inclusiones metálicas como Fe, Cr, Co, Mn, y otros metales, hacia la aleación fundida de aluminio. Esto se debe al contacto directo de la superficie metálica de las herramientas con la aleación fundida. Para evitar esta difusión, se puede recubrir la superficie metálica con una pintura refractaria que resiste temperaturas superiores al punto de fusión del Al.

### **2.10.7. Aplicación de fundentes para la limpieza y mejora de la aleación fundida**

El término fundente es empleado para referirse a los aditivos y técnicas utilizados para proteger, limpiar, escorificar, desgasificar y refinar el baño de metal fundido [11]. En la fabricación de elementos mecánicos o lingotes es indispensable minimizar los efectos que causa la porosidad por hidrógeno, además de erradicar las inclusiones y escorias, formadas durante la fundición. Esto se logra mediante la limpieza de la colada antes del vertido en el molde. Para esto se deben aplicar diversos fundentes.

Los fundentes de protección (cobertura) crean una barrera física entre el metal fundido y la atmósfera del horno, previniendo la oxidación del aluminio y la absorción de hidrógeno. Los fundentes de limpieza ayudan a eliminar los óxidos formados en el interior del metal

líquido, ya que su reacción es en el seno del líquido y no tanto en la escoria que se encuentra en la superficie. Los fundentes de escoreo extraen el metal líquido contenido en la escoria que se forma en la superficie del metal fundido. Los fundentes de desgasificación remueven el hidrógeno disuelto en la fundición. Los fundentes de refinación pueden ser para afinar grano, modificar la estructura de las aleaciones de aluminio, y para eliminar metales alcalinos indeseables del metal fundido [11], [65].

#### **2.10.8. Formación de la interfaz carburo de aluminio ( $Al_4C_3$ ) y mejora de la mojabilidad**

La formación de carburo de aluminio ( $Al_4C_3$ ) causa fragilidad en el MC fabricado, teniendo que controlarlo para la mejora de propiedades. En el ítem 2.7.2.1 se realizó un estudio de la reacción química de aleaciones fundidas de Al con partículas sólidas de SiC, teniéndose la formación de  $Al_4C_3$ . En cambio, en el ítem 2.7.2.2 se realizó un estudio para evitar su formación y mejorar la mojabilidad de la aleación fundida sobre las partículas.

#### **2.10.9. Control para evitar la formación de $Al_4C_3$**

El control para evitar la formación de  $Al_4C_3$ , debido a la reacción química al dispersar las partículas de SiC en la aleación fundida Al-Si, se lo realizará en base a tres parámetros descritos en la Tabla 2.9 del ítem 2.7.2.2. A partir de esta se tomará en cuenta tres parámetros para evitar la formación de  $Al_4C_3$ :

El primero, es seleccionar una matriz Al-Si que contenga entre 6 a 15% en peso de Si, lo. El segundo, no sobrecalentar la masa fundida matriz Al-Si/refuerzo SiC, esto evitará que la reacción entre el aluminio con las partículas de SiC formen  $Al_4C_3$ . El tercero, no se debe realizar la agitación por un excesivo intervalo de tiempo, esto disminuye la interacción matriz-refuerzo que origina la interfaz  $Al_4C_3$ .

#### **2.10.10. Porosidad por efecto de la adición de partículas de SiC**

Al adicionar las partículas de SiC para su dispersión en una aleación fundida Al-Si, vía stir casting, existen dos factores principales que causan porosidad en el MC solidificado.

En el primero, la superficie de las partículas de SiC al estar expuestas a la manipulación y al medio ambiente, contienen elementos como oxígeno, vapor de agua e impurezas, que al ser adicionadas a la aleación fundida originan problemas de porosidad por hidrógeno y escoria, mencionados en los ítems 2.10.1 y 2.10.4. Para mantener limpia la superficie de las partículas, se las precalienta a una temperatura menor al punto de fusión de la matriz.

El segundo factor se produce al momento de dispersar las partículas en la matriz fundida, La alta velocidad de rotación a la que son expuestos los constituyentes puede originar la absorción de oxígeno y humedad en la masa fundida. Esto provoca presencia de hidrógeno y óxidos que merman las propiedades del MC al momento de su solidificación. Para reducir al mínimo este factor, se recomienda exponer a cortos tiempos de agitación matriz-refuerzo, A menor tiempo, menor exposición al medio ambiente. También es importante que el ambiente interno del horno de fundición, en el cual se halla el crisol que contiene la masa fundida matriz-refuerzo, sea aislada del medio ambiente. Otra alternativa es desgasificar la masa fundida Al-Si/SiC antes de ser colada en el molde.

#### **2.10.11. Calentamiento de las partículas de SiC antes de ser adicionadas a la matriz líquida**

El calentamiento de las partículas de SiC, antes de ser adicionadas a la matriz en estado líquido, es importante por varias razones.

Elimina de su superficie elementos como oxígeno, vapor de agua e impurezas, causantes de porosidad por hidrógeno. Para mantener limpia la superficie de las partículas, se las precalienta a una temperatura menor al punto de fusión de la matriz

Mejora la mojabilidad de la matriz fundida de aleación de aluminio sobre las partículas de SiC. Al calentar las partículas a una temperatura igual o cercana al punto de fusión de la matriz fundida, se logra mantener la tensión superficial en valores aproximados a 0.7 J/m correspondientes a matrices fundidas de Al-Si, lo que favorece la mojabilidad.

#### **2.10.12. Efectos de la adición de magnesio a una aleación Al-Si+Mg**

Esta adición se la tiene que realizar para mejorar la mojabilidad de la matriz Al-Si sobre las partículas de SiC. Este análisis de mojabilidad fue investigado en el ítem 2.7.1.3, en el que se menciona que un valor de alrededor del 1% de Mg es suficiente para mejorar la mojabilidad de la matriz líquida de aleación de aluminio sobre partículas sólidas de SiC.

El adicionar una cantidad extra de Mg en la composición química definida de una aleación de Al, puede conllevar a un aumento o disminución de las propiedades mecánicas del MC sino es controlado adecuadamente. En las investigación presentadas por Singh *et al.* [51], muestra que la adición de 1% de Mg a una matriz Al-0,35Si-0,77Mg reforzada al 5, 10 y 15% de SiC, mejora las propiedades de resistencia y dureza, en comparación a los fabricados sin la adición de Mg y con los mismos constituyentes, sin

embargo, al adicionar Mg se tiene la reducción del porcentaje de elongación. En cambio, si se recuerda el ítem 2.7.1.3, ahí se menciona lo perjudicial que puede ser el adicionar cantidades del 3,2% de Mg.

### 2.10.13. Tipo de molde utilizado en el colado

El tipo de molde en el cual se va a realizar el colado, tiene directa influencia en las propiedades mecánicas del material solidificado. Los tipos de moldes utilizados en las aleaciones de Al-Si fueron vistos en el ítem 1.6.1, con su respectiva técnica de colado, siendo el molde desechable de arena aglutinada el más propenso a originar defectos en la microestructura de la fundición. Controlado en lo posible todos los parámetros que afectan al proceso de fabricación del MC se procede a colar la fundición en su molde.

## 2.11. Moldura de fundición

La moldura de fundición es la masa de material que se requiere para formar la cavidad interna del molde. En la cavidad se deposita el metal fundido el cual al solidificarse tomará la forma previamente establecida [66]. En cuanto a la forma final se debe tener en cuenta el efecto de contracción que se origina en los metales y aleaciones, los cuales pueden reducir su volumen durante la solidificación y enfriamiento. El efecto de la contracción puede ser lineal o volumétrica [66], cualquiera de las dos afectan las dimensiones finales de la pieza. Los elementos que conforman la moldura de fundición, Figura 2.15, son los siguientes: 1. Embudo de colada 2. Canal vertical 3. Colector de escoria 4. Canales de alimentación 5. Respiradero 6. Pieza fundida.

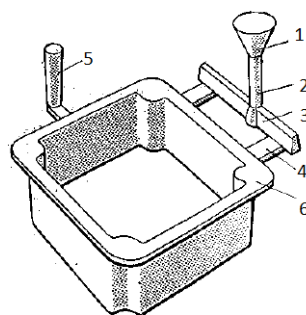


Figura 2.15. Elementos que conforman la moldura de fundición.  
(Fuente: Titov, 1981, p. 149 [66])

El concepto de moldura de fundición es importante en el proceso de fabricación del composite ya que a partir de su volumen se determina la masa de la moldura de fundición, la cual se requiere para la fabricación de una forma determinada. A su vez el volumen de la masa de la moldura en el interior del crisol sirve para dimensionar las medidas de las aspas del agitador.

## **CAPÍTULO 3**

### **MATERIAL COMPUESTO DE MATRIZ ALEACIÓN ALUMINIO-SILICIO ANSI AA 365.0 REFORZADA CON PARTÍCULAS DE CARBURO DE SILICIO MALLA #400**

Este capítulo da a conocer la selección de la matriz metálica de aleación Al-Si ANSI AA 365.0 junto con el refuerzo cerámico tipo partículas de SiC malla #400 que van a ser empleados para la fabricación de los lingotes cilíndricos de material compuesto, así como los materiales secundarios para mejorar el proceso de fabricación del MC. También se presenta la selección del proceso de fabricación stir casting, además de la posible forma de solidificación de lingotes cilíndricos de aleación 365.0 y de MC 365.0/SiC/%p en molde de arena. El capítulo presenta la construcción del equipo stir casting para la dispersión de las partículas de SiC malla #400 en la matriz fundida Al-Si 365.0, como también las ventajas que genera el colado del composite 365.0/SiC/%p en molde de arena aglomerada con resina orgánica autofraguante. Por último, se presenta una tabla que contiene microestructuras y una tabla de aplicaciones industriales de aleaciones Al-Si y de MCMM, que son de ayuda para la comparación de propiedades con los MC 365.0/SiC/%p a fabricarse, y también establecer potenciales aplicaciones.

#### **3.1. Matriz metálica de aleación Al-Si ANSI AA 365.0**

Para la selección de la aleación Al-Si ANSI AA 365.0, perteneciente a un block de un automóvil Honda civic, y que se utilizará como material base para la fabricación de barras cilíndricas de MC 365.0/SiC/%p, se consideró varios parámetros expuestos en la Tabla 3.1, además de su composición química, y otras propiedades que presenta la aleación comercial ANSI AA 365.0 que son de gran ayuda para la fabricación del composite.

##### **3.1.1. Selección de la aleación Al-Si ANSI AA 365.0**

Desde el principio de esta investigación se decidió utilizar como matriz, para la fabricación de un MC, una aleación Al-Si, debido a todas las bondades expuestas a lo largo del capítulo uno y dos. Además, teniendo en cuenta que el Al y sus aleaciones son materiales del futuro para desarrollar MCMM. Por lo que, para la selección del material matriz ANSI AA 365.0, perteneciente al grupo de aleaciones de Al-Si + Mg, se aplicó el primer criterio en base a lo escrito en la Tabla 2.2 del ítem 2.4.3, siendo expuesta en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Parámetros para la selección del material matriz aleación Al-Si.

Parámetros de la matriz	Consideraciones para la selección del material matriz
Aplicaciones en la industria automotriz o industrias de manufactura	<p>Potenciales aplicaciones automotrices como: blocks, cabezotes, camisas de cilindros, pistones, bielas, tambores de freno, discos de freno, bombas de agua, cilindro de rueda, bombas de combustible, bombas de dirección hidráulica.</p> <p>Potenciales aplicaciones en industrias de manufactura: partes de bombas abrasivas, carcazas estáticas para cajas de revolución, placas guías sometidas a desgaste con altas temperaturas.</p> <p>Estas potenciales aplicaciones se consigue con la selección de aleaciones de aluminio-silicio de las series ANSI 3xx.x, 4xx.x, 4xxx, debido a propiedades como: alta resistencia, baja densidad, elevada conductividad térmica, alta dureza, resistencia a la corrosión, además de ser tenaces y dúctiles.</p>
Fácil de adquirir y económica	<p>Las aleaciones Al-Si se las puede conseguir en centros de reciclaje como chatarra (aluminio secundario). En estos centros de acopio del país son desechados mayoritariamente cabezotes y blocks de motores de combustión interna, pero en diferentes marcas y modelos. También se encuentra en grandes cantidades carcazas de cajas de revoluciones y pistones, para autos livianos y pesados, aros de ruedas de vehículos livianos y motores de motocicletas. Otros lugares donde se puede conseguir chatarra de Al-Si es en centros de reparación automotriz, venta de repuestos usados y rectificadoras de motores.</p> <p>El valor de la chatarra de Al-Si es asequible el cual está alrededor de 0,55 dólares la libra, pero si son vendidos como repuestos automotrices su valor se incrementa.</p>
Proceso de fabricación viable y económico	<p>El proceso de fabricación del material compuesto es por vía stir casting, el cual es una técnica de fundición, que permite la dispersión de partículas cerámicas (material refuerzo) en una solución líquida de silicio en aluminio (material matriz aleación Al-Si), y su posterior solidificación en un molde.</p> <p>Seleccionar aleaciones de Al-Si para someterlas a procesos de fabricación por stir casting, es ideal, debido a las propiedades tecnológicas que brindan este tipo de aleaciones al ser fundidas. Además, su fabricación es económica en relación a otros procesos, a parte que en el Laboratorio de Fundición de la Facultad de Ingeniería Mecánica es posible trabajar con este proceso de fabricación.</p>

(Fuente: Elaboración propia)

Con la ayuda de los parámetros de la Tabla 3.1, el material a seleccionarse debía ser una aleación Al-Si, ya que aparte de cumplir con estos parámetros, es ideal para la obtención de un material compuesto.

Una vez establecida que clase de aleación se va a utilizar para la fabricación del MC, se trató de reducir su selección a aleaciones de Al-Si que contengan de 6% a 15% de Si (valor recomendado por el ítem 2.7.2.2 cuando se utiliza refuerzos de partículas de SiC, ya que se evita la formación de  $Al_4C_3$ ). Esta selección fue mediante un conocimiento subjetivo, el cual tiene que ver con el color de la aleación (un color oscuro significa un alto contenido de Si) y con su dureza (se raspaba el material con una lima, si presentaba facilidad a ser desprendido significa que es una aleación con bajo contenido de Si). También se utilizó un conocimiento investigativo el cual se refleja en el capítulo uno, en especial en la Tabla 1.7 Aplicaciones industriales de aleaciones Al-Si, que permitió conocer que elementos automotrices podrían contener de 6% a 15% de Si.



Las aleaciones de Al-Si se consiguieron en dos lugares. El primero fue en un centro de reparación automotriz de la ciudad de Ambato, el cual fue un block 4 cilindros con su cabezote y sus múltiples de admisión y escape, pertenecientes a un automóvil Honda civic del año 1973, esto se pudo saber por la serie EB1-1308159 inscrita al block, estos elementos pesaban 23 kg, se pagó un valor de 60 USD, ya que no fueron vendidos como chatarra, sino como repuestos. El segundo fue en un centro de reciclaje de chatarra, aquí se consiguió 3 cabezotes, iguales en forma y dimensiones, que tenían inscritos la serie 4ZD1, lo que permitió conocer que pertenecían a un automóvil Isuzu, estos 3 cabezotes pesaban 22 kg, y se pagó un valor de 26,7 USD. Las elementos de estas aleaciones son mostradas en las Figuras 3.1 y 3.2, y en el Anexo A4 son mostradas con mayor detalle.

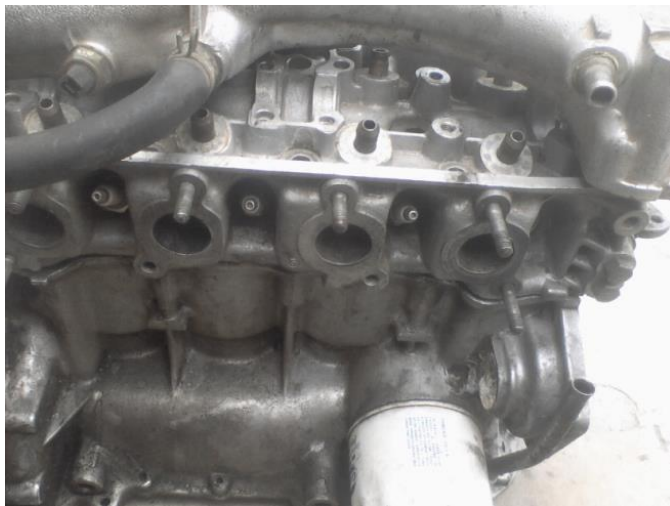


Figura 3.1. Block, cabezote y múltiples de escape y admisión de un automóvil Honda Civic 1973.  
(Fuente: Elaboración propia)



Figura 3.2. Cabezote 4ZD1 de un motor de automóvil Isuzu.  
(Fuente: Elaboración propia)

Todos estos elementos automotrices, a pesar de estar en grandes cantidades, también están en una variedad de formas, dimensiones y marcas, lo que hace dificultoso encontrar un elemento en cantidades de dos unidades iguales.

A estos materiales se les realizó un análisis químico, mediante espectrometría de chispa, en el departamento de metalurgia extractiva de la Escuela Politécnica Nacional, con el propósito de determinar cada uno de sus componentes químicos y el tipo de aleación. El resultado indicó que el block del automóvil Honda civic es una aleación Al-Si+Mg de serie numérica ANSI AA 365.0, mientras que su cabezote es una aleación Al-Si+Cu+Mg de serie numérica ANSI AA 363.0, en cambio, el análisis a un cabezote perteneciente a un automóvil Isuzu es una aleación Al-Si+Cu+Mg de serie numérica ANSI AA 363.0. Estas series fueron identificadas bajo la norma ANSI H35.1 descrita en el ítem 1.3.3.



En el Anexo A5 se presentan los resultados del análisis de elementos químicos realizados a muestras de los materiales: de un block de automóvil Honda civic, y de uno de los cabezotes 4ZD1 de un automóvil Isuzu. En cambio, en el Anexo A6 se da a conocer el resultado del análisis de elementos químico realizado a una muestra material del cabezote de un automóvil Honda civic.

Una vez tomados en cuenta los parámetros y las consideraciones que debe tener la matriz metálica, y teniendo dos potenciales matrices de aleación base Al-Si para la fabricación de los lingotes de material compuesto, se procedió a seleccionar la aleación ANSI AA 365.0 como matriz por los siguientes beneficios:

- Cumple con los parámetros y consideraciones mencionados en la Tabla 3.1.
- Su contenido de Si (10,32%) es elevado, favoreciendo la estabilidad térmica con refuerzos que contienen en su estructura química el elemento carbono, lo que evita la formación de  $Al_4C_3$  alrededor del refuerzo (revisar ítems 2.7.2.1 y 2.7.2.2).
- Su porcentaje en contenido de Mg (0,29%) es mayor a la aleación ANSI AA 363.0 (0,15%). El Mg actúa como un tensioactivo siendo beneficioso para la mojabilidad entre matrices de Al-Si con refuerzos de SiC, e influyendo en la mejora de las propiedades finales del material compuesto (revisar ítem 2.7.1.3).
- Su temperatura de fusión es menor que la aleación ANSI AA 363.0, y aunque no es un factor fundamental, es recomendable que la temperatura de fusión de la matriz no sea muy elevada, ya que esto evita la formación de reacciones químicas indeseables entre la matriz y su refuerzo cerámico (ver ítem 2.7.2).
- Al pertenecer al grupo de aleaciones coladas de Al-Si+Mg, con un alto porcentaje de silicio, es un material ideal para ser colado en moldes con formas complejas.

En la redacción de este proyecto de investigación, la matriz que es una aleación Al-Si podrá ser expresada bajo norma ANSI AA como: aleación Al-Si ANSI AA 365.0, material AA 365.0 o simplemente material 365.0. Estas formas se encuentran redactadas en fuentes científicas. En algunas ocasiones será necesario abreviar la expresión MCM 365.0 reforzado con partículas de SiC con la codificación 365.0/SiC/%p que designa composites de matriz de Al bajo la norma ANSI vista en el ítem 2.4.5.

### 3.1.2. Composición química de la aleación ANSI AA 365.0

La serie 365.0 es una aleación de tipo colada, perteneciente al grupo de aleaciones de Al-Si + Mg. Proviene de la refundición de lingotes de las series 365.1 (producto semielaborado) y posteriormente colada para obtener un producto acabado. Para determinar su serie numérica se comparó entre la composición química límite estándar citada por Kaufman & Rooy [13] con la del análisis químico de espectrometría de chispa realizado en el Departamento de Metalurgia Extractiva de la EPN perteneciente a una muestra material del block de un automóvil Honda civic 1973, dando como resultado que el block pertenece a la serie numérica 365.0, según norma ANSI H35.1 en conjunto con Aluminum Association (AA). La composición química de la aleación 365.0 es mostrada en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Composición química de la aleación ANSI AA 365.0.

Serie numérica			Composición química en Wt %, con aluminio al balance												
Norma ANSI AA	Norma EN AC	Norma EN AC en composición	Tipo	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Sn	Otros elementos no especificados		
													Cada una	Total	
365.0	43500	AlSi10Mn	Análisis químico EPN	10,32	0,23	0,01	0,35	0,29	0,01	0,02	0,03	---			
			Límite estándar [13]	9,5-11,5	0,15	0,03	0,5-0,8	0,1-0,5	---	0,07	0,04-0,15	0,03	0,03	0,1	

AA=asociación de aluminio USA. EN AC=Euronorm Aluminium Casting. Nombre comercial: Silafont-36.  
 Otros elementos no especificados con el límite estándar: Ag, Zr, Sb, Co, Zr, V, Be, Pb, B, Sr, P.  
 Análisis químico EPN (Escuela Politécnica Nacional) realizado al block de un automóvil Honda civic 1973.

(Fuente: Elaboración propia)

La aleación de serie numérica EN AC 43500 es asignada para productos colados. Las industrias de manufactura que utilizan técnicas de colado die casting para la obtención de elementos de altas sollicitaciones mecánicas, asignan esta serie a sus productos acabados, a través del procesamiento de los lingotes desarrollados por la compañía Rheinfelden alloys, de origen alemán, fundada en 1898. Esta compañía se dedica a la producción y suministro de Al primario para industrias de manufactura, además de desarrollar nuevas aleaciones de Al [67], [68]. Existen dos presentaciones comerciales de la serie EN AC 43500 producida por Rheinfelden alloys, las llamadas Silafont-36 y Castaman-35, su composición química standard se muestra en la Tabla 3.3 [68].

Tabla 3.3. Composición química standard de la aleación comerciales Silafont-36 y Castaman-35.

Nombre comercial	Asignación química	Serie numérica EN AC	Composición química % en masa							
			Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Otros
Silafont-36	AlSiMnMg	43500	9,5-11,5	0,15	0,03	0,5-0,8	0,1-0,5	0,07	0,15	Sr
Castaman-35	AlSiMnMg	43500	9,5-11	0,2	0,03	0,5-0,8	0,2-0,5	0,1	0,15	Sr

(Fuente: Rheinfelden alloys, Primary aluminium Casting alloys, 2015, p. 28, 36, [68])

### 3.1.3. Propiedades de la aleación comercial ANSI AA 365.0

La compañía Rheinfelden alloys ha desarrollado y registrado bajo la serie EN AC 43500 su aleación comercial Silafont-36, la cual es equivalente a la serie ANSI AA356.0. La aleación Silafont-36 es de gran ayuda para conocer las propiedades de este material, las mismas que son expuestas en sus manuales técnicos adjuntados en su página web <http://rheinfelden-alloys.eu/en/downloads/> de la compañía Rheinfelden alloys.

Las propiedades del Silafont-36 se las emplea en técnicas de colado die casting, sin embargo, esta misma compañía investiga a través de las necesidades del mercado mundial aleaciones prototipos como la Silafont-36 al 0,29% de Mg para moldeo en arena y colado a baja presión. Las propiedades del Silafont-36 para die casting y el prototipo Silafont-36, con diferentes tipos de tratamiento, son mostradas en la Tabla 3.4 [67], [68].

Tabla 3.4. Propiedades de la aleación comercial Silafont-36 de serie numérica EN AC 43500 (ANSI AA 365.0) para die casting y un prototipo en molde de arena.

Técnica de colado y tratamiento	$\delta$ g/cm <sup>3</sup>	Rango de fusión y solidificación °C	$k$ W/m°C 20-200°C	$\lambda \cdot 10^{-6}$ °C <sup>-1</sup> 20-200°C	$\sigma_y$ MPa	$\sigma_u$ MPa	HBW	E GPa	% ε	Aplicaciones para elementos colados por die casting	
Die casting alta presión	F	2,64	590-550	150	21	120-150	250-290	75-95	74-83	5-11	Miembros transversales para autos, juntas para inclinación de cabinas de camiones, buje de rueda para motos, fabricación de motores, aplicaciones navales y aeroespaciales, etc.
	T5	2,64	590-550	150	21	155-245	275-340	80-110	74-83	4-9	
	T4	2,64	590-550	150	21	95-140	210-260	60-75	74-83	15-22	
	T6	2,64	590-550	150	21	210-280	290-340	90-110	74-83	7-12	
	T7	2,64	590-550	150	21	120-170	200-240	60-75	74-83	15-20	
Baja presión en molde de arena	F	2,64	590-550	150	21	96	175	61	74-83	2	
	T4	2,64	590-550	150	21	133	229	77	74-83	4	
	T6	2,64	590-550	150	21	250	299	109	74-83	1	
	T7	2,64	590-550	150	21	222	260	90	74-83	1	

E=Módulo de elasticidad o módulo de Young.  $k$ =Conductividad térmica.  $\lambda$ =Coef. de expansión térmica.

$\sigma_y$ =Esfuerzo de fluencia al 0.2% offset.  $\sigma_u$ =Resistencia última.

HBW (5/250-30)=Dureza Brinell realizada con bola de wolframio de Ø 5 mm con carga de 250 kgf y duración de 30 s.

(Fuente: Rheinfelden alloys, Primary Aluminium Alloys for Pressure Die Casting, 2015, p. 26, 36 [67])

(Fuente: Rheinfelden alloys, Primary aluminium Casting alloys, 2015, p.76, 78, 79 [68])

Existe una gran variedad de aplicaciones industriales para la aleación comercial Silafont-36, como también información puntual sobre las propiedades y el efecto que causa sus elementos aleantes (Si, Fe, Mg y Mn). Además de tablas resumidas de propiedades tecnológicas y de tratamientos térmicos, los cuales están publicados en su página web, <http://rheinfelden-alloys.eu/en/downloads/>.

La clasificación de las aleaciones Al-Si de acuerdo a la ASM Handbook Volume 9 [69] está dado según el porcentaje en peso del Si ubicado en el diagrama de fases Al-Si siendo: hipoeutécticas menores al 12,6% Si, eutécticas con 12,6% Si, hipereutécticas mayores al 12,6% Si. La aleación AA 365.0 se clasifica como tipo hipoeutéctica, ya que tiene porcentajes en peso de 10,32% de Si y 0,29% de Mg, A partir de su diagrama de

fases también es posible obtener una temperatura de fusión referente de 600 °C como se muestra en la Figura 3.3, la cual podría servir para fundir la matriz.

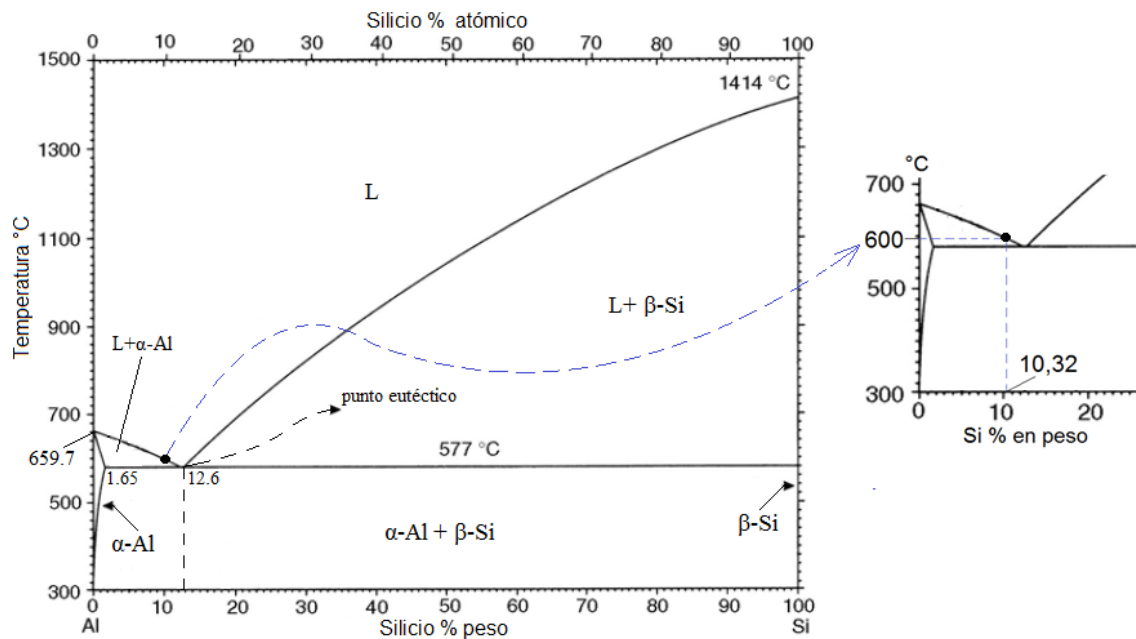


Figura 3.3. Temperatura de fusión referente para la fundición de la matriz 365.0 a partir del diagrama de fases Al-Si.

(Fuente: Warmuzek, 2004, p. 2, [15])

La matriz AA 365.0 (Silafont-36) pertenece al grupo de aleaciones ternarias Al-Si+Mg, sus elementos aleantes que están al 0,29% de Mg, 0,35% de Mn y 0,23% de Fe, no influyen en gran medida en su temperatura de fusión, pero sí en sus propiedades tecnológicas y mecánicas. A continuación se describen los efectos que causan sus principales aleantes, y que deben ser tomados en cuenta si en la matriz 365.0 va a ser adicionado alguno de estos elementos para mejorar la fabricación del composite 365.0/SiC/%p.

**Si:** disminuye el punto de fusión de las aleaciones, debido a su menor densidad en comparación con el Al. Su alto valor de dureza (6,5 Mohs) aumentan la resistencia y dureza de la aleación, a causa de la precipitación de Si hacia los límites de grano, esta precipitación es producto de la baja solubilidad del silicio en el aluminio. También mejora la colabilidad y fluidez, permitiendo obtener elementos mecánicos de formas complejas con espesores delgados y de excelente acabado, ya sea en moldes de arena o permanentes, con técnicas de colado por fuerza de gravedad, baja o alta presión, o por compresión. Su adición mejora la resistencia a la corrosión, agrietamiento en caliente, hermeticidad. En las investigaciones realizadas por Rheinfeld alloys [67] se menciona que la adición de Si en la aleación Silafont-36 permite una excelente colabilidad. Además, para obtener una fina distribución de Si en la fase eutéctica se añade estroncio.

**Mg:** su adición en sistemas Al-Si aumenta el esfuerzo de fluencia mientras su elongación disminuye. Por lo tanto, si no es controlado adecuadamente puede ser perjudicial para las propiedades mecánicas. Su adición posibilita que la aleación sea tratable térmicamente [7], [69]. Rheinfeld alloys [67] menciona que la aleación Silafont-36 en un contenido de 0,24 a 0,35% de Mg es utilizado en componentes sometidos a elevadas resistencias y esfuerzos de impacto. En cambio, un contenido de 0,28 a 0,35% de Mg es aplicado en componentes que van a ser sometidos a tratamiento térmico de temple con aire.

El Mg añadido en aleaciones de Al-Si forma la fase  $Mg_2Si$ , con morfología de fina escritura china o partículas dispersas, La fase junto al aluminio forma un diagrama de fases pseudo-binario Al- $Mg_2Si$ , Figura 3.4, esta nueva fase es la responsable del endurecimiento de las aleaciones Al-Si debido a su precipitación en el Al. En el sistema Al-Si exhibe una alta solubilidad hasta un máximo de 0,7% de Mg, por encima de esta concentración no ocurre endurecimiento posterior. Las composiciones recomendadas para aluminios de alta calidad varían en el rango de 0,40 a 0,70% de Mg [4], [7], [69].

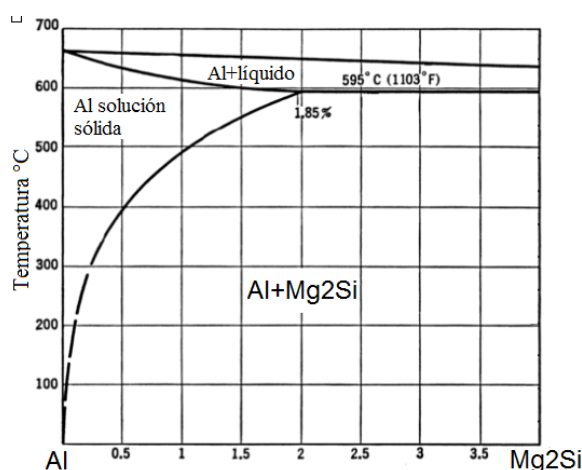


Figura 3.4. Diagrama de fases pseudo-binario Al- $Mg_2Si$ .  
(Fuente: ASM HANDBOOK Vol.9, 2004, p. 1712, [69])

**Mn:** en las investigaciones de Rheinfeld alloys [67] se menciona que la adición de Mn en un promedio de 0.65% en la aleación Silafont-36 es con el fin de reducir la tendencia de adhesión de la colada en el molde, además que una cantidad mayor al 0,2% reduce la elongación de la aleación, por tal razón, su adición no es recomendable cuando se emplea técnicas de colado por die casting. La ASM Handbook Volume 9 [69] indica que la adición de Mn contrarresta los efectos perjudiciales del alto contenido de Fe en las aleaciones de Al-Si, debido a la formación de la fase  $\alpha-Al_{15}(FeMn)_3Si_2$  en forma de escritura china, a expensas de la fase  $\beta-Al_9Fe_2Si_2$  en forma de agujas afiladas.

**Fe:** su adicción mejora el agrietamiento en caliente, y reduce la tendencia a la adhesión de la colada en el molde en fundiciones a presión. Debido a su baja solubilidad en el aluminio sólido puede reaccionar con otros aleantes para formar diferentes fases intermetálicas durante la solidificación de la aleación como:  $\text{Al}_3\text{Fe}$ ,  $\alpha\text{-AlFeSi}$ ,  $\beta\text{-AlFeSi}$ ,  $\alpha\text{-AlFeMnSi}$ , etc. La más perjudicial de estas es la fase  $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$ , ya que reduce tanto la resistencia última a la tracción como la ductilidad del material, esto se lo atribuye a su forma tipo aguja, la cual actúa como un concentrador de esfuerzos en los límites de grano. Mediante la adición de Mn se puede modificar la morfología de la fase  $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$  a una  $\alpha\text{-Al}_{15}(\text{FeMn})_3\text{Si}_2$  del tipo escritura china, ayudando a mejorar la resistencia a la tracción. Si bien la fase  $\alpha\text{-Al}_{15}(\text{FeMn})_3\text{Si}_2$  es más deseable que la  $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$ , ambos son causantes del incremento de la dureza en el material. Si la adición de Fe no es controlada debidamente, las posibilidades de formar varios intermetálicos es mayor, lo cual conduce a un aumento de la dureza, disminución a la fluidez de la colada, genera porosidad debido a que su formación obstaculiza la solidificación de la aleación líquida. Para reducir estos efectos negativos de los intermetálicos es necesario modificar las morfologías de tipo aguja a tipo estructura china, esto se consigue con la adición de un neutralizador como el manganeso [7], [64], [69].

## **3.2. Refuerzo cerámico tipo partículas de SiC malla #400**

Para la selección del refuerzo cerámico de SiC que va a ser añadido a la matriz fundida 365.0, constituyente que va a utilizarse en la fabricación lingotes cilíndricos de MC 365.0/SiC/%p, se consideró varios parámetros expuestos en la Tabla 3.5, además de otros beneficios. Para maximizar propiedades como resistencia y dureza, en el MC que va a ser fabricado, se ha realizado una selección del tamaño de las partículas cerámicas, lo cual llevó a conseguir polvo particulado de SiC malla #400, equivalente a un diámetro promedio de 25,8  $\mu\text{m}$ , fabricado por la industria Saint Gobain, la misma que presenta las propiedades del SiC malla #400 en la ficha de presentación de su producto.

### **3.2.1. Selección del refuerzo cerámico SiC**

Para la selección del refuerzo cerámico SiC, en forma de polvo particulado, se aplicó el segundo y el tercer criterio en base a lo escrito en las Tablas 2.3 y 2.4 del ítem 2.4.3. En la Tabla 3.5 se muestra la aplicación del segundo criterio. Y en los beneficios para seleccionar el SiC se toma en cuenta el tercer criterio.

Tabla 3.5. Parámetros para la selección del material refuerzo SiC.

Parámetros del refuerzo	Consideraciones para la selección del material refuerzo
Aportación de propiedades a la matriz.	El material refuerzo debe aportar con las siguientes propiedades a la matriz: baja densidad, alta resistencia a la tracción y compresión, baja expansión térmica, elevada dureza, excelente resistencia al choque térmico, resistencia a la corrosión, estabilidad térmica a altas temperaturas. Materiales como SiC, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , B <sub>4</sub> C, TiC, cumplen todas las propiedades citadas anteriormente, y la mayoría de estas son corroboradas con la Tabla 2.6 donde se compara propiedades de estos refuerzos. Sin embargo seleccionar SiC presenta mejores ventajas como baja densidad, menor coeficiente de expansión térmica a elevadas temperaturas y una mayor dureza si el composite va a ser sometido desgaste.
Fácil de adquirir y económico	En comparación a refuerzos tipo fibras, tipo láminas o tipo preformas, los refuerzos tipo partículas de SiC en forma de polvo, son los más asequible de conseguir en el mercado del país. Su precio es de 4,5 dólares la libra de polvo, haciendo muy económico para la fabricación de un MCM.
Morfología y tamaño	El cerámico tipo partículas de SiC es uno de los pocos refuerzos que importan unas cuantas empresas para su comercialización. Por lo que estas partículas lo venden en forma de polvo, con morfología no especificada, pero si detallada para su venta el tamaño de la partícula a partir del número de malla.
Proceso de fabricación viable y económico	Lo que se conoce del suministro del polvo de SiC es que tienen una morfología de partículas micrométricas. Estas partículas pueden ser aplicadas en el proceso de fabricación por stir casting. Este proceso es económico en relación a otros, además que en el Laboratorio de Fundición de la Facultad de Ingeniería Mecánica es posible la adición y dispersión de las partículas de SiC en una matriz fundida.

(Fuente: Elaboración propia)

A pesar de que se puede tener otros tipos de refuerzos como Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, B<sub>4</sub>C, TiC, el SiC presenta ligeras ventajas sobre ellos, como se lo ha mencionado en la Tabla 3.5. Sin embargo, al ser un material cerámico, propiedades como baja conductividad térmica, frágil y poco tenaz a la vez, son compensados por la matriz 365.0.

Tomados en cuenta los parámetros y consideraciones para la selección del material refuerzo, se procedió a seleccionar el SiC tipo partículas por los siguientes beneficios:

- Cumple con los parámetros y consideraciones mencionadas en la Tabla 3.5.
- Las propiedades de un material cerámico como el SiC se complementan con las propiedades de una matriz metálica Al-Si como la ANSI AA 365.0.
- El SiC difiere en forma, composición y es insoluble al mezclarlo con la matriz, además de mantener su identidad y propiedades dentro del composite fabricado.
- Cumple con la compatibilidad matriz metálica Al-Si/refuerzo cerámico SiC, expuesta en la Tabla 2.4 del Capítulo 2.

### 3.2.2. Selección del tamaño de las partículas cerámicas de SiC

Para maximizar las propiedades finales del composite, es adecuado conocer las características que genera el tamaño de las partículas de SiC en su matriz metálica solidificada. La Tabla 3.6 [28] da un criterio para seleccionar un diámetro aproximado en función de su malla, tomando en cuenta sus ventajas y limitaciones. También se muestra

la Tabla 3.7 [28], la misma que da un criterio general de cómo varían las propiedades de las partículas en función de su tamaño.

Tabla 3.6. Características del tamaño de las partículas de refuerzo.

Tamaño relativo de las partículas	Tamaño de malla FEPA	Diámetro de la partícula $\mu\text{m}$ ( $\mu\text{in}$ )	Ventajas	Limitaciones
Finas	F1500	1,7 (68)	Contribuye con gran resistencia y rigidez	Tendencia a la aglomeración
	F800	6,5 (260)	Alta resistencia a la fatiga	Dificultad para mezclarse (polvo/fundición) Tendencia a la aglomeración
Medianas	F600	9,3 (370)	Excelente balance entre propiedades (elevada resistencia y buena ductilidad)	-----
	F360	22,8 (9120)		
Gruesas	F12	1700 (0,068)	Buena resistencia al desgaste, alta ductilidad, aplicadas a blindajes	Bajos beneficios de las propiedades resultantes

FEPA: Federation of European Producers Abrasives.

(Fuente: ASM HANDBOOK Vol.21, 2001, p. 132 [28])

Tabla 3.7. Variación de las propiedades según el tamaño de las partículas de refuerzo.

Tamaño de las partículas de refuerzo y sus efectos		Esfuerzo de fluencia	Resistencia última	Módulo de Young	Ductilidad	Resistencia a la fatiga	Resistencia al inicio de grietas	Conformación
Finas	↑ ↓	↑ Incremento	↑ Incremento	↑ Incremento	↓ Incremento	↑ Incremento	↑ Incremento	↓ Incremento
Gruesas								

(Fuente: ASM HANDBOOK Vol.21, 2001, p. 135 [28])

Por lo expuesto en las Tablas 3.6 y 3.7 el diámetro de las partículas de SiC deberá ser de un tamaño relativamente mediano para conseguir la mejor aportación de propiedades. Una vez determinado el tamaño relativo de las partículas de SiC, se procedió a la búsqueda de polvo de SiC con un diámetro de partícula de alrededor de 22,8  $\mu\text{m}$ . En la ciudad de Quito solo se pudo encontrar, en la Industria Metal Química Galvano, una malla #80 que poseía un diámetro aproximado de 180  $\mu\text{m}$ , lo cual pertenece a un tamaño grueso de partículas. En cambio, en la ciudad de Guayaquil, en la ferretería V.M. Absalón Guevara Fervimag se encontró polvo de SiC con # de mallas 400, 320 y 240, de las cuales se adquirió la malla #400, ya que esta cumple con el promedio de partícula mediana con un diámetro de 25,8  $\mu\text{m}$ , este polvo de SiC tiene un costo de 4,5 dólares la libra. En la Figura 3.5 se muestra el polvo de SiC #400 adquirido.



Figura 3.5. Polvo de SiC malla #400 para reforzar la matriz metálica 365.0.  
(Fuente: Elaboración propia)



### 3.2.3. Propiedades del polvo de SiC malla #400

El polvo de SiC adquirido posee una malla #400, según la referencia de compra pedida, lo que indica que viene normalizada por el standard CAMI (Coated Abrasives Manufacturers Standards Institute, USA) que utiliza la definición grit (malla) para especificar el tamaño de sus partículas abrasivas. Esto da como resultado que la malla #400 tiene un diámetro promedio de partículas de SiC de 25,8  $\mu\text{m}$ , como lo indica la tabla de designación de número de malla en el trabajo de Zipperian [70].

El polvo de SiC fue elaborado por la industria Saint Gobain. Menciona que este tipo de polvo cerámico es de excelente calidad y alta pureza. Además, da a conocer las propiedades físicas de su producto que son expuestas en la Tabla 3.8, En el Anexo A7 se muestra la hoja de compra y la ficha de presentación de propiedades del SiC malla #400.

Tabla 3.8. Propiedades físicas del polvo SiC malla #400 dado por la industria Saint Gobain.

Propiedades físicas del SiC malla #400	Magnitud
Densidad ( $\text{g/cm}^3$ )	3,21
Punto de fusión ( $^{\circ}\text{C}$ )	2500
Conductividad térmica ( $\text{W/m}^{\circ}\text{C}$ )	19,4 (a 500 $^{\circ}\text{C}$ ) / 15,8 (a 900 $^{\circ}\text{C}$ )
Expansión térmica ( $\text{K}^{-1}$ )	$4,7 \times 10^{-6}$
Dureza (Mohs)	9,5-9,75
Color	Negro

(Fuente: industria Saint Gobain)

A estas partículas de SiC se les realizó un análisis de la distribución del tamaño de partícula mediante dispersión dinámica de luz, para verificar su diámetro promedio. El análisis fue realizado a partir de una muestra de polvo de SiC, utilizando agua y etanol, como medios, lo que arrojó que el diámetro promedio es aproximadamente de 22 y 24  $\mu\text{m}$  respectivamente para cada medio. Se puede concluir que el diámetro promedio analizado se aproxima con el obtenido por el standard CAMI. En el Anexo A8 se muestra el resultado del análisis, realizado en el Laboratorio de Nuevos Materiales (LANUM) de la Facultad de Ingeniería Mecánica.

### 3.3. Materiales secundarios para mejorar el proceso de fabricación del MCM 365.0 reforzada con partículas de SiC malla #400

Para mejorar el proceso de fabricación de los lingotes cilíndricos de MC se aplicará un fundente que es tres en uno, ya que sirve tanto para cobertura, limpieza y escoreo. También se utilizará un fundente de desgasificado, y uno para afinar el grano. Estos fundentes son económicos y de fácil adquisición, y serán empleados para mejorar las propiedades del composite. El fundente tres en uno alu fundex extra y el desgasificante

apartagas H7-50, fueron comprados en la Industria Metal Química Galvano de la ciudad de Quito, y su método de aplicación es en base a la ficha técnica de Industrias Juval Ltda (empresa fabricante), siendo mostradas en el Anexo A9 y A10 respectivamente. De aquí en adelante al fundente se lo llamará fundente escorificante o simplemente escorificante, ya que en su ficha técnica se lo nombra de ese modo. El afinador de grano Al5TiB es proporcionado por el Laboratorio de Fundición de la Facultad de Ingeniería Mecánica, su método de aplicación es presentada en las investigaciones de KB alloys [71]. En la Figura 3.6 se muestran los fundentes que serán aplicados en la aleación Al-Si 365.0.



Figura 3.6. Fundentes alu fundex extra (rosado) apartagas H7-50 (azul) y Al5TiB (plateado).  
(Fuente: Elaboración propia)

La aplicación de fundentes para la limpieza y mejora del composite, se la debe realizar antes de añadir las partículas de SiC en la matriz fundida AA 365.0. Si los fundentes son aplicados después de finalizar la agitación, la cual dispersa las partículas de SiC en la matriz fundida, se tendría que esperar un tiempo para que estos realicen su objetivo, lo que podría ocasionar que las partículas sedimenten al fondo de la matriz fundida.

La aplicación de fundentes, especialmente en aluminio secundario, se debe realizar antes de adicionar las partículas de SiC en la matriz 365.0. Con esto se tendrá una colada limpia antes de comenzar la dispersión del SiC. Sin embargo se podría desarrollar alguna técnica con el fin de emplear los fundentes después de dispersar las partículas de SiC.

Para la fabricación del MC 365.0/SiC/%p se va a adicionar 1% de magnesio respecto al 100% de los componentes químicos que intervienen en la fabricación del composite. Por lo tanto, el contenido en porcentaje de Mg en el composite será alrededor de 1,29% (0,29% propia de la matriz 365.0 + 1% de adición). Esta adición se la tiene que realizar para mejorar la mojabilidad de la matriz 365.0 sobre las partículas de SiC malla #400. Este análisis de mojabilidad fue investigado en el ítem 2.7.1.3, en el que se menciona que un valor de alrededor del 1% de Mg es suficiente para mejorar la mojabilidad de la matriz líquida de aleación de aluminio sobre partículas sólidas de SiC.

En las pruebas preliminares que van a ser efectuadas en este proyecto de investigación, se decidirá la forma y el procedimiento de adicionar el Mg en la matriz fundida 365.0.

Para las pruebas preliminares se recubrirá algunas herramientas con una pequeña capa de pintura refractaria INJEMAQ AL 397 color blanco, adquirida en Industria Metal Química Galvano de la ciudad de Quito. Las especificaciones de la pintura y su modo de empleo se indican en la ficha técnica de Industrias Juval Ltda mostrada en el Anexo A11.

En este proyecto de investigación se utilizará un molde desechable de arena aglomerada con resina orgánica autofraguante, ya que su costo es económico como el de un molde desechable de arena aglutinada. En un ítem posterior se detalla las características del molde escogido para colar el MC 365.0/SiC/%p.

### **3.4. Selección del proceso de fabricación stir casting**

La selección del proceso de fabricación stir casting para producir un MC 365.0/SiC/%p se realizó en base a tres factores:

**Costo de fabricación**, fabricar un equipo stir casting para dispersar las partículas de SiC en la matriz fundida 365.0 es económico en relación a otros procesos de fabricación.

**Viabilidad para fabricar un composite**, fabricar un MC en el Laboratorio de Fundición de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la EPN como en las industrias fundidoras del país, es muy viable, ya que se requiere construir un equipo de stir casting que se acople al horno de fundición para dispersar el refuerzo particulado en la matriz metálica fundida.

**Potenciales aplicaciones industriales**, por las características de los constituyentes principales, descritas en los ítems 3.1 y 3.2, el MC 365.0/SiC/%p podrá tener potenciales aplicaciones en la industria automotriz y maquinaria industrial, ya que se fabricará un MC que conjugue entre sí propiedades de baja densidad, elevada resistencia a la tracción, resistencia al desgaste, gran tenacidad, estabilidad térmica y resistencia a la corrosión, dando como resultado un alto rendimiento con un menor consumo de combustible.

### **3.5. Solidificación de lingotes cilíndricos de aleación 365.0 y de MC 365.0/SiC/%p en molde de arena**

Este ítem se lo elaboró para conocer y entender el posible proceso de solidificación de la aleación Al-Si 365.0 y MC 365.0/SiC/%p al momento de ser colado en su molde de arena, ya que para mejorar las propiedades de los materiales a fabricarse se puede controlar la forma en que solidifica la fundición. Además, será de ayuda para interpretar las microestructuras de los materiales que serán obtenidos. La macroestructura del lingote 365.0 solidificado en molde de arena, es una forma visible de representar la posible

morfología del grano al interior del material, el cual está influenciado por la velocidad de enfriamiento del molde y que además influye en el tamaño y tipo de grano. A partir de la solidificación del lingote 365.0, cuya microestructura formada es del tipo hipoeutéctica, se puede explicar la solidificación del lingote de MC 365.0/SiC/%p, ya que es de una forma semejante, con el aditamento que las partículas dispersadas en la matriz 365.0 son empujadas por el crecimiento dendrítico del Al- $\alpha$  hacia los límites de grano.

### 3.5.1. Macroestructura del lingote 365.0 solidificado en un molde de arena

Si se realiza la fundición de la matriz Al-Si 365.0 y posteriormente se cola en el interior de un molde de arena que se encuentra a temperatura ambiente, se puede desarrollar al final de la solidificación una macroestructura que podría constar hasta de tres zonas [72], como se muestra en la Figura 3.7.

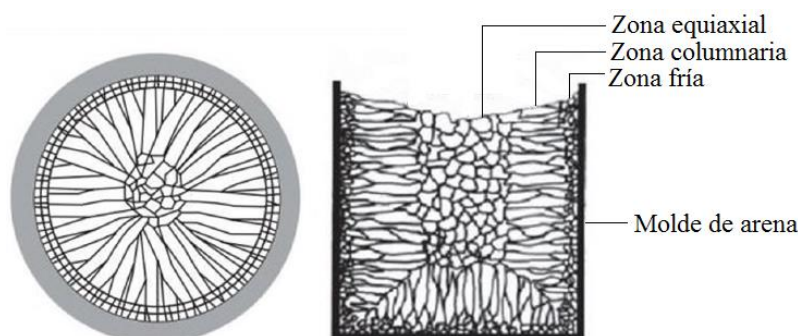


Figura 3.7. Posible macroestructura de un lingote cilíndrico solidificado en molde de arena.  
(Fuente: Güemes y Martín, 2012, p. 197, [72])

La formación de la primera estructura se la denomina zona fría, aquí el crecimiento de grano se inicia en la capa exterior de la fundición, debido al contacto de la aleación líquida con las impurezas de la arena del molde o alguna impureza suspendida en el líquido, que dan inicio a la nucleación heterogénea. Esta nucleación es responsable de la formación de núcleos sólidos, que dan origen al crecimiento de granos, debido al enfriamiento brusco del líquido en las paredes frías del molde de arena. Esta primera solidificación en el exterior del lingote es una capa delgada de pequeños cristales equiaxiales que muestran una orientación aleatoria y una estructura templada [69], [73].

La formación de la segunda estructura llamada zona columnaria se forma adyacente a la primera, y en dirección perpendicular a la pared del molde. Contiene granos alargados, a menudo de forma dendrítica. En esta zona conforme el molde de arena libera calor de la fundición, los granos comienzan a crecer en la dirección opuesta al flujo de calor, la cual es normal a la pared del molde de arena [69], [73].

La formación de la tercera estructura es conocida como zona central equiaxial. Se forma en la parte central del lingote, en esta zona los granos son otra vez equiaxiales y orientados en forma aleatoria, pero son mucho más gruesos que los granos formados en la zona fría. Además, impiden el crecimiento de los granos columnares. Su formación se origina al final de la solidificación. El crecimiento de esta zona se puede estimular agregando algunos agentes nucleadores [69], [73].

Si la temperatura de fusión de la aleación es muy elevada, supercalentada, la zona fría puede desaparecer por completo, debido a que estos granos que se forman inicialmente pueden redisolverse, pero cuando el enfriamiento se inicia otra vez, la velocidad de enfriamiento baja, debido a que la arena del molde no permite una buena transferencia de calor, produciendo una nucleación muy pequeña o nula, teniendo que formarse la estructura columnaria desde la superficie del molde hacia el material fundido. Con un superenfriamiento constitutivo muy pequeño la estructura columnaria puede seguir hasta el centro del lingote, en donde encuentra granos columnarios que avanzan desde la pared opuesta del molde, de este modo, puede presentarse una zona no equiaxial en el centro del lingote. Cuando se tiene secciones delgadas de vaciado y sometidas a velocidades de enfriamiento elevadas, la zona de enfriamiento puede extenderse a través de todo el espesor, produciéndose una microestructura de granos finos equiaxiales [73].

### **3.5.2. Solidificación del lingote Al-Si 365.0**

Si se realiza la fundición de la matriz aleación Al-Si 365.0 del tipo hipoeutéctica y posteriormente se cola en el interior de un molde de arena, su solidificación puede formar dos fases sólidas independientes en la microestructura de la aleación. La primera es una fase primaria de solución sólida de Al ( $\alpha$ ) en forma de dendritas, que son los granos con estructura cristalina CCC. La segunda es una fase secundaria tipo eutéctica que es una mezcla alternada de Al remanente con Si ( $\beta$ ), se forma cuando el Si ( $\beta$ ) por su baja solubilidad en el Al ( $\alpha$ ) es empujado por el crecimiento dendrítico de este hacia los límites de grano, teniendo que formar con el Al remanente la mencionada fase eutéctica alrededor de los granos de Al ( $\alpha$ ). Este fenómeno se lo conoce como la precipitación de Si ( $\beta$ ) en una solución sólida de Al ( $\alpha$ ), esta fase eutéctica vista en una microestructura tiene la forma de una red alternada entre Si ( $\beta$ )-Al remanente. En otras investigaciones esta red es nombrada simplemente como la fase secundaria de silicio ( $\beta$ ). Dependiendo de los parámetros de solidificación en vez de formarse una fase secundaria tipo eutéctica puede existir una fase secundaria de Si en forma acicular, laminar o globular [64], [74].

La Figura 3.8 muestra la microestructura de la aleación hipoeutectica 365.0 (Silafont-36) obtenida por la técnica de colado die casting. Se distingue una zona brillante de dendritas que son Al- $\alpha$ , y en los límites de grano una estructura eutética de aluminio-silicio, donde: (a) la microestructura presenta un Si eutético tipo laminar ya que no se lo ha modificado con Sr y (b) el Si eutético tiene una forma laminar fina por la modificación con Sr [67].

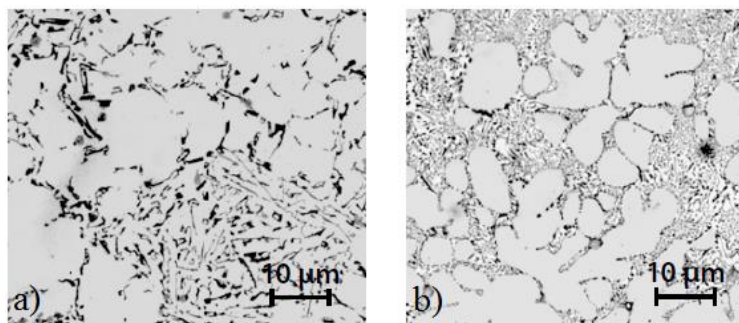


Figura 3.8. Microestructura de la aleación hipoeutética Silafont-36.

(Fuente: Rheinfelden alloys, Primary Aluminium Alloys for Pressure Die Casting, 2015, p. 32, [67])

### 3.5.3. Solidificación del lingote de MC 365.0/SiC/%p

Si se realiza el colado del MC 365.0/SiC/%p en un molde de arena, su solidificación es de la misma forma en que solidifica la aleación 365.0, y de igual manera las partículas sólidas de SiC dispersadas en la aleación fundida 365.0 son empujadas por el crecimiento dendrítico del Al- $\alpha$  hacia los límites de grano, donde se encuentran con el Si de la fase eutética.

El control de parámetros como: la dispersión de las partículas de SiC en los límites de grano, unión entre matriz-refuerzo, evitar la formación de  $Al_4C_3$  y otras reacciones, evitar aglomeración de las partículas, entre otras, mejorarán las propiedades mecánicas del composite. Se tomará en cuenta el fundamento teórico desarrollado en el ítem 2.6.

En la investigación realizada por Fuentes [39] se describe la solidificación de un MC A359/SiC/20p fabricado por el proceso de stir casting y colado en molde de arena. Para la solidificación del MC 365.0/SiC/%p, que tiene parecidos constituyentes e igual proceso de fabricación, se tendría el mismo mecanismo de solidificación mostrado en la Figura 3.9, el cual sería: (a) crecimiento dendrítico de la fase primaria Al- $\alpha$ , que empuja a las partículas de SiC hacia los límites de grano, (b) continúa el crecimiento dendrítico, (c) solidificación casi completa, se comienza a notar formación de granos de Al- $\alpha$ , y límites de grano donde se deposita la fase de Si eutético y partículas de SiC y (d) Estructura final, en la que ha finalizado la solidificación, se muestran los constituyentes del MC.

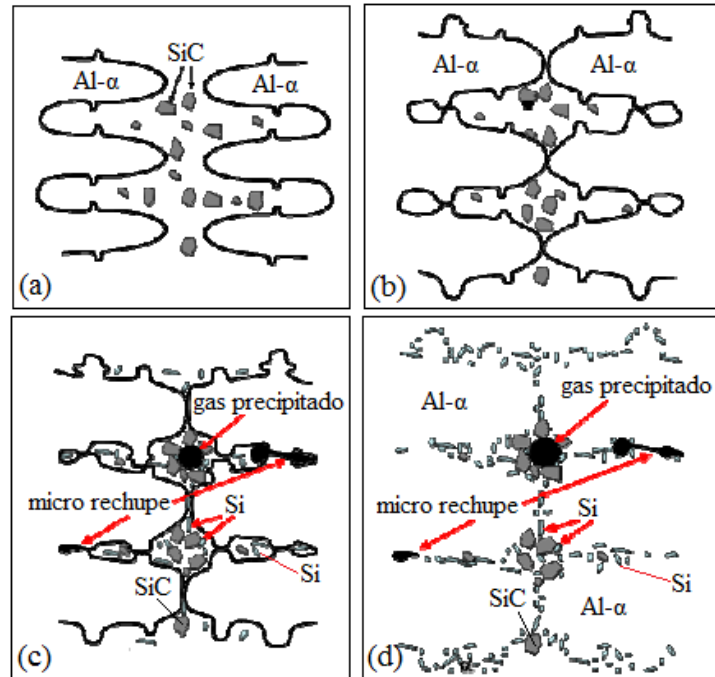


Figura 3.9. Solidificación de un composite.  
(Fuente: Fuentes, 2007, p. 193, [39])

### 3.6. Construcción del equipo stir casting para la dispersión de las partículas de SiC malla #400 en la matriz fundida Al-Si 365.0

A partir del proceso de fabricación vía stir casting se obtendrán lingotes de MC 365.0/SiC/%p. Para conseguir este objetivo, aparte de adquirir matriz y refuerzo, también es necesario: la selección del horno de fundición, aplicar los conceptos de moldura de fundición que permitan su diseño así como la determinación de la masa de la moldura de fundición, además de investigar la teoría de suspensión de partículas sólidas en líquidos agitados para dispersar las partículas de SiC en matrices fundidas de Al-Si. Por último, para lograr el objetivo, se construirá un equipo stir casting que permitirá la adición y dispersión de las partículas de SiC malla #400 en la matriz fundida Al-Si 365.0 por medio de agitación mecánica.

#### 3.6.1. Proceso de fabricación vía stir casting

Este proyecto de investigación fabricará y caracterizará materiales compuestos de baja densidad, que serán obtenidos mediante la dispersión de un polvo que contiene partículas cerámicas de SiC malla #400 en una solución líquida de silicio en aluminio correspondiente a una aleación Al-Si 365.0, y su posterior solidificación en un molde de arena. Para esto se establecerá un proceso de fabricación de lingotes cilíndricos vía stir

casting. Una parte de este proceso es la construcción de los elementos que conforman el stir casting. La Figura 3.10 muestra el diseño esquemático del equipo de stir casting.

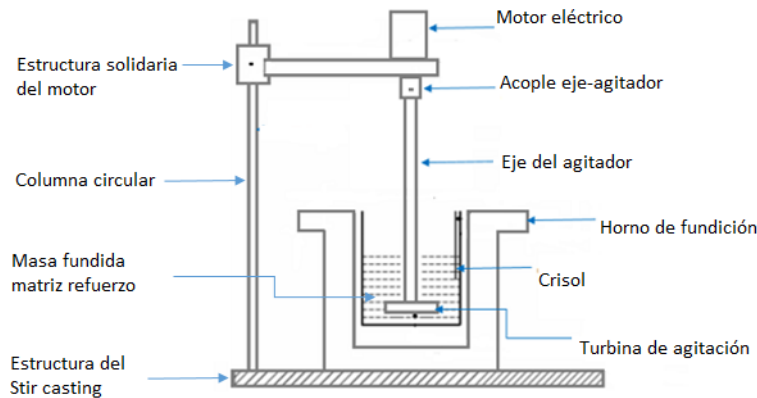


Figura 3.10. Diseño esquemático del equipo stir casting.  
(Fuente: Elaboración propia)

### 3.6.2. Selección del horno de fundición

La selección del tipo de horno se la realizó previa inspección del Laboratorio de Fundición de la Facultad de Ingeniería Mecánica. En donde se verificó que actualmente se cuenta con 4 tipos de hornos para la fundición de metales y aleaciones. Un horno no basculante alimentado por gas con crisol intercambiable, con capacidad de inserción en la recámara del horno de crisoles de hasta 10 kg. Un horno basculante alimentado por diésel con crisol fijo de capacidad de 50 kg. Un horno no basculante alimentado por diésel con crisol intercambiable, con capacidad de inserción en la recámara del horno de crisoles de hasta 90 kg. Un horno basculante de inducción con crisol fijo de capacidad de 120 kg.

Con la información obtenida se optó por el horno no basculante alimentado por gas con crisol intercambiable, ya que la masa disponible de material matriz Al-Si 365.0 es de 13 kg, cantidad en masa que se va a dividir para seis fundiciones y que puede ser fundida en este tipo de horno pequeño. También permite el uso de crisoles intercambiables de acuerdo a la cantidad de material a fundir.

Posee una recámara interna de fundición que se alimenta por GLP y sobrealimentado por un venterol (blower) que inyecta aire para la combustión que llega a una temperatura de 1200 °C, su encendido es manual, y también tiene una tapa refractaria que sella el horno para evitar pérdidas de calor al ambiente. La Figura 3.11 muestra el horno seleccionado, además de las dimensiones principales que sirven para el dimensionamiento del crisol.





Figura 3.11. Horno de fundición alimentado por gas con crisol intercambiable.  
(Fuente: Elaboración propia)

### 3.6.3. Diseño de la moldura de fundición del composite 365.0/SiC/%p

El diseño de la moldura de fundición para este proyecto de investigación se la realizó considerando los siguientes parámetros:

La cantidad en bruto de material matriz 365.0 es de 18 kg, pero por el corte, extracción de suciedad y óxido, extracción de partes y camisas de acero del block de cilindros, se redujo a 13 kg, material que debe alcanzar para 4 fundiciones y 2 pruebas preliminares.

El composite tendrá forma de lingotes cilíndricos, ya que la moldura de fundición se diseñó para contener tres lingotes cilíndricos de Ø26 x 270 mm de longitud. A partir de los lingotes se obtendrán tres probetas para ensayo de tracción, una probeta para ensayo de dureza, y una probeta para ensayo metalográfico mediante microscopio óptico. Las dimensiones de las probetas son en base las normas ASTM.

El diseño de la moldura de fundición fue a partir de las dimensiones en bruto de los lingotes cilíndricos los cuales son de Ø26 x 270 mm de longitud. El diámetro de 26 mm se lo obtiene a partir de los 20 mm de diámetro que posee la probeta para ensayo de tracción más un espesor de 3 mm por posibles defectos en la superficie circular del lingote. La medida de 270 mm es la suma de las longitudes de la probeta para ensayo de tracción, de la probeta de dureza, los espacios de mecanización por torno, y más 70 mm debido al rechupe que sufre cada lingote de MC. La cavidad del lingote central servirá tanto de embudo de colada como de canal vertical de alimentación. El canal vertical se conecta al canal alimentador de Ø18 x 148 mm y a los otros dos lingotes por medio de los canales de estrangulamiento de Ø12 x 5 mm. Por último la separación entre lingotes es de 30 mm [19], [20], [66]. La Figura 3.12 muestra el diseño de la moldura de fundición para la obtención de los lingotes cilíndricos de material compuesto. Este diseño de la moldura es para colado vertical en molde de arena aglomerante.

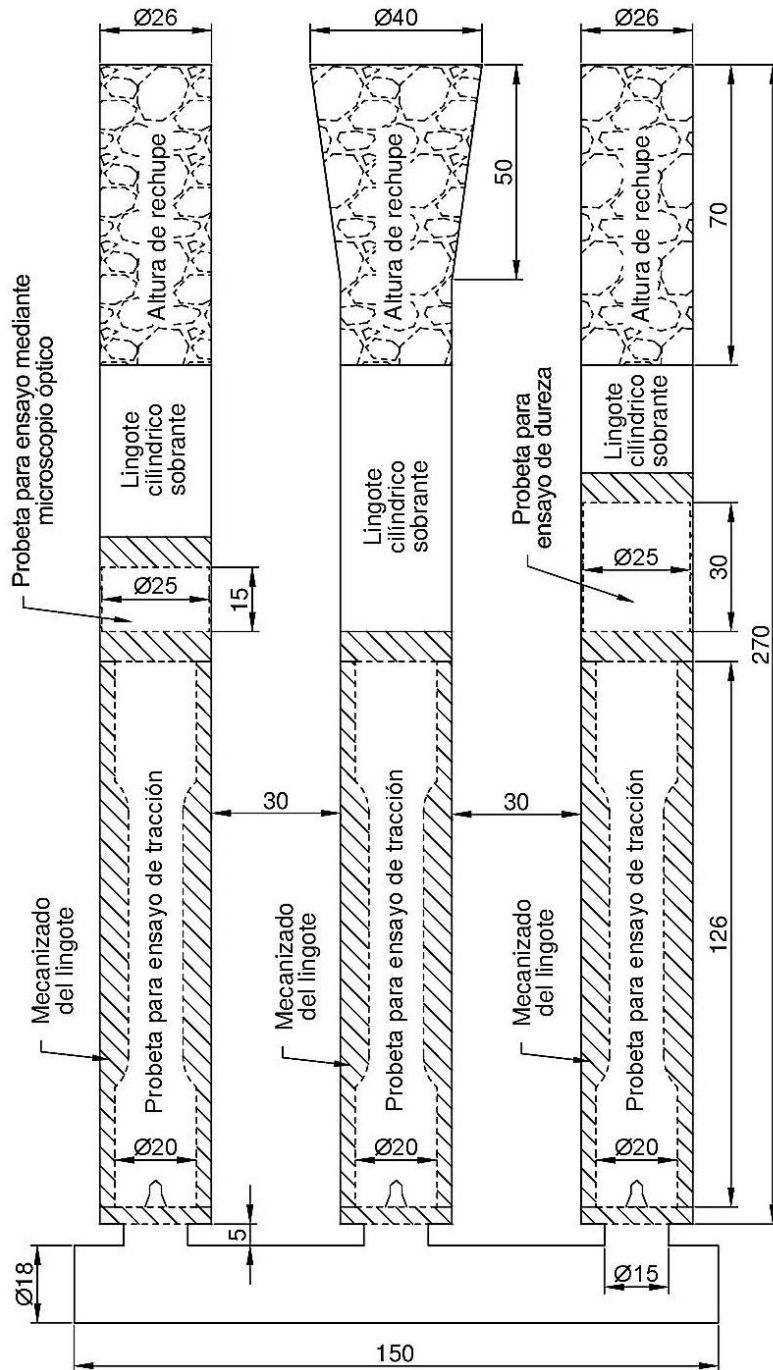


Figura 3.12. Diseño de la moldura de fundición para la obtención de los lingotes cilíndricos de MC.  
(Fuente: Elaboración propia)

### 3.6.4. Determinación de la masa de la moldura de fundición

La masa de la moldura de fundición es obtenida a partir de la multiplicación de la densidad por su volumen. La densidad es aproximadamente de  $2,7 \text{ g/cm}^3$  que corresponde a materiales compuestos de matrices de Al-Si reforzadas con valores de SiC alrededor del 5%, y que es un valor referencial para la fabricación del composite con mayor porcentaje de SiC. El volumen se calcula a partir de las dimensiones de la moldura

de fundición de la Figura 3.12, dando un valor de  $509,42 \text{ cm}^3$ , el cual fue obtenido utilizando el software de diseño industrial SolidWorks como se muestra en la Figura 3.13.



Figura 3.13. Volumen de la moldura de fundición para el cálculo de su masa.  
(Fuente: Elaboración propia)

Por lo tanto, la masa de la moldura de fundición para la obtención de los tres lingotes cilíndricos de material compuesto tiene un valor de  $1375,43 \text{ g}$ , que es obtenido de la multiplicación de la densidad por su volumen ( $2,7 \text{ g/cm}^3 \times 509,42 \text{ cm}^3$ ).

A la masa de la moldura de fundición, debido a pérdidas por escoria, manejo de la fundición, y rechupes de la aleación Al-Si 365.0, se la tiene aumentar el 23% de su masa, por lo tanto, la masa total de la moldura de fundición es de  $1691,77 \text{ g} \approx 1700 \text{ g}$ .

### 3.6.5. Construcción del equipo stir casting

El equipo stir casting está constituido por una estructura, motor eléctrico, variador de frecuencia, estructura solidaria del motor eléctrico, acople eje motor-eje agitador, rodamiento de brida NSK UCP201-08, soporte para rodamiento de brida y base apoyo, los cuales son partes y elementos que no han sufrido variaciones en su diseño y construcción, en el transcurso de las pruebas preliminares realizadas en este proyecto. En cambio, en partes como la tapa del crisol, el crisol tipo ensamble y el agitador, tuvieron un proceso de diseño y construcción final en el transcurso de las pruebas preliminares. En estas pruebas que son descritas más adelante, se muestra la evolución que tuvo el equipo hasta llegar a su construcción final, la cual será utilizada para obtener las fundiciones finales en las que se fabricará lingotes de MC 365.0/SiC/%p. Las partes y elementos, así como el ensamble del stir casting, son descritos a continuación.

### 3.6.5.1. Estructura del stir casting

En la estructura se montan la mayor parte de los elementos que conforman el stir casting, por lo cual esta debe garantizar el enlace entre los elementos del mismo. Está construida por un tubo estructural circular de  $\text{Ø}50 \times 2 \text{ mm}$ , conformado a su alrededor de un marco rígido de tubo estructural rectangular de  $50 \times 25 \times 3 \text{ mm}$ , y perfil estructural tipo T de  $30 \times 20 \times 3 \text{ mm}$  para absorber las vibraciones que generaran las altas revoluciones del motor. A través del tubo circular el motor tiene tanto libertad de giro como de desplazamiento vertical, esto le permite a las aspas del agitador ser centradas y posicionadas al interior del crisol, ya que el motor se acopla al eje del agitador mediante un mecanismo de unión. En la estructura también se ha soldado platinas de acero para el montaje del soporte de rodamiento, y del variador de frecuencia. La estructura del stir casting se monta alrededor del horno de fundición, y se fija al piso mediante tornillos tirabuzón. Las dimensiones de la estructura son en base a las medidas del horno de fundición. La Figura 3.14 muestra el diseño y construcción de la estructura, y en el Anexo A12 su plano de fabricación.



Figura 3.14. Diseño y construcción de la estructura del stir casting.  
(Fuente: Elaboración propia)

### 3.6.5.2. Motor eléctrico

El motor eléctrico servirá para la rotación del agitador mediante el acople eje motor-eje agitador. Las rpm del eje del motor serán reguladas mediante un variador de frecuencia. La Figura 3.15 muestra el motor eléctrico con su respectiva placa de datos técnicos.



Figura 3.15. Motor eléctrico para la rotación del eje del agitador.  
(Fuente: Elaboración propia)

### 3.6.5.3. Variador de frecuencia

Para el control de las rpm del eje del motor que a su vez controlarán las de las aspas del agitador, se ha adquirido un variador de frecuencia con capacidad de control de motores de hasta 1,5 kW. Consta en su parte central de un potenciómetro y un display que permiten establecer el control exacto de la frecuencia que define las rpm. La Figura 3.16 muestra el variador de frecuencia marca Delta y su placa de características técnicas.



Figura 3.16. Variador de control de frecuencia.  
(Fuente: Elaboración propia)

### 3.6.5.4. Estructura solidaria del motor eléctrico

La estructura solidaria posee tanto libertad de giro como de desplazamiento, esto se logra a través de su bocín que esta acoplado al tubo circular del stir casting. Como el motor se ensambla a la estructura solidaria permite centrar y posicionar verticalmente las aspas del agitador en el interior del crisol, ya que eje motor-eje agitador se acoplan mediante un mecanismo de unión. Para mantener una posición fija de la estructura solidaria se ajusta la abrazadera de su bocín mediante perno-tuerca. La Figura 3.17 muestra el diseño y construcción de la estructura solidaria del motor, y el Anexo A12 su plano de fabricación.



Figura 3.17. Estructura solidaria del motor eléctrico.  
(Fuente: Elaboración propia)

### 3.6.5.5. Acople eje motor-eje agitador

Para transmitir la rotación del eje del motor hacia el eje del agitador se ha construido un acople, el cual es un bocín que aloja dos pernos prisioneros para el ajuste de los respectivos ejes. En la Figura 3.18 se muestra el diseño y construcción del acople, mientras que en el Anexo A12 su plano de fabricación.

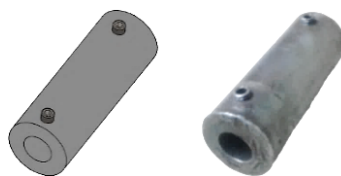


Figura 3.18. Diseño y construcción del acople eje motor-eje agitador.  
(Fuente: Elaboración propia)

### 3.6.5.6. Rodamiento de brida NSK UCP201-08

Este elemento alinea y absorbe las vibraciones producidas por la rotación del eje del agitador. En la Figura 3.19 se muestra el rodamiento de brida NSK UCP201-08.



Figura 3.19. Rodamiento de brida NSK UCP201-08.  
(Fuente: Elaboración propia)

### 3.6.5.7. Soporte para rodamiento de brida

Esta parte sirve de soporte y fijación del rodamiento de brida NSK UCP201-08, también absorbe parte de las vibraciones producidas por el eje del agitador al momento de su rotación. En la Figura 3.20 se muestra el diseño y construcción del soporte para rodamiento de brida, mientras que en el Anexo A12 su plano de fabricación.

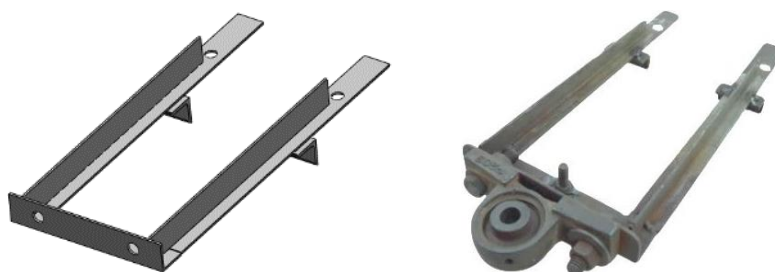


Figura 3.20. Diseño y construcción del soporte para rodamiento de brida.  
(Fuente: Elaboración propia)

### 3.6.5.8. Base apoyo

Esta parte es de gran ayuda para apoyar el extremo del soporte para rodamiento, a su vez esta base se asienta en la superficie plana de la boca del crisol. En la Figura 3.21 se muestra el diseño y construcción de la base apoyo, mientras que en el Anexo A12 su plano de fabricación.



Figura 3.21. Diseño y construcción de la base apoyo.  
(Fuente: Elaboración propia)

### 3.6.5.9. Tapa del crisol

Este elemento fue mejorado en el transcurso de las pruebas preliminares hasta conseguir su diseño y construcción final para ser utilizado las fundiciones donde se obtendrá el MC 365.0/SiC/%p. La tapa protegerá del medio ambiente la masa fundida matriz 365.0-SiC cuando esta sea agitada al interior del crisol. Tiene un embudo que sirve para la adición de las partículas de SiC malla #400 en la matriz fundida 365.0. En su placa circular de acero se realizó un orificio central para el libre giro del eje de las aspas, un orificio para fijar una termocupla, y otro para insertar la termocupla tipo pipeta. También posee un anillo circular el cual sirve para sellar la boca del crisol, además de servir como guía central del eje del agitador. La sujeción de la tapa es por medio de un mango en forma de L. Sus dimensiones están en función del crisol y del agitador. La Figura 3.22 muestra el diseño y construcción de la tapa del crisol y en el Anexo A12 su plano de fabricación.



Figura 3.22. Diseño y construcción de la tapa del crisol.  
(Fuente: Elaboración propia)

### 3.6.5.10. Crisol tipo ensamble

En el transcurso de las pruebas preliminares se tuvo desprendimiento de material particulado en las paredes internas del crisol de arcilla-grafito diamant #18, a causa de la agitación de la masa fundida matriz-refuerzo, esto genera que el material particulado sea arrastrado e introducido en la masa fundida, produciendo problemas de porosidad en el MC al momento de su solidificación. Ante tal problema se decidió diseñar y construir un crisol de acero que soporte el proceso abrasivo de la agitación. Su dimensionamiento está en función de las medidas del horno de fundición mostrada en la Figura 3.11 y de la altura de la masa fundida matriz-refuerzo (calculada más adelante) que corresponde a la moldura de fundición en estado líquido.



El crisol consta de un tubo de acero sin costuras ASTM A 106 para servicio a alta temperatura, con aplicaciones en la industria petrolera. Este tubo posee alta dureza (anti abrasivo), además de no descarbonarse a temperaturas aproximadas de entre 400 °C a 650 °C, dependiendo de sus componentes químicos. En las pruebas preliminares el crisol fue elaborado a partir del tubo ASTM A 106 de Øext 127 mm, Øint 101 mm y 190 mm de altura, soldado a su base una placa circular de acero AISI 4337 de Ø100 × 15 mm. En cambio, en las fundiciones finales, donde se obtendrá el MC 365.0/SiC/%p, se diseñó y construyó un crisol tipo ensamble, con el objetivo de retirar la placa base del tubo para la limpieza de los elementos, o si existe excesiva abrasión mecanizar las superficies afectadas. El ensamble consta de un tubo ASTM A 106 de Øext 127 mm, Øint 101 mm y 190 mm de altura, una placa circular de acero AISI 4337 de Ø180 × 18 mm a la que se le ha realizado 4 orificios, 4 pernos soldados al tubo, 4 tuercas con arandelas para el ensamble de los elementos. El material de la placa circular fue seleccionado por ser un acero con aplicaciones de antiabrasivas. La Figura 3.23 muestra el diseño y construcción del crisol tipo ensamble, mientras que en el Anexo A12 su plano de fabricación.

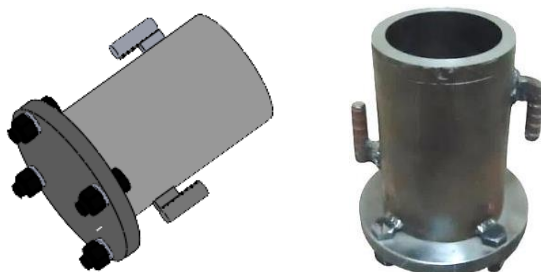


Figura 3.23. Diseño y construcción del crisol tipo ensamble.  
(Fuente: Elaboración propia)

#### 3.6.5.11. Agitador

Este elemento permitirá a través de sus aspas generar un flujo circular de la matriz fundida 365.0 en el crisol, el cual es aprovechado para introducir y dispersar homogéneamente las partículas de SiC en la matriz. Para su diseño y construcción final se ha tomado en cuenta una base científica y una experimental. La primera estudia investigaciones sobre la teoría de la suspensión de partículas sólidas en líquidos agitados, que recomiendan dimensiones y velocidad de rotación para un agitador tipo paletas planas. La segunda es en base a prueba y error hasta conseguir la dispersión de las partículas de SiC en la matriz fundida 365.0. Por lo tanto, utilizando los rangos de la Tabla 2.11 y en el transcurso de las pruebas preliminares, se estableció las dimensiones del agitador que se empleó para el proceso de fabricación de los lingotes cilíndricos de MC 365.0/SiC/%p, como se muestra a continuación:



**Primero**, se establece el tipo de agitador con el cual se va a dispersar las partículas de SiC malla #400 en la matriz fundida Al-Si 365.0, además de su material. Para esto se seleccionó un agitador tipo paletas planas de 4 aspas, debido a su facilidad de construcción y economía. En cambio, el material seleccionado para las aspas es una hoja de ballesta para automóvil, ya que este acero posee una alta dureza, permitiendo su uso en aplicaciones de abrasión, aparte de tener un espesor de 4 mm que facilita su corte.

**Segundo**, se calcula al interior del crisol la altura (H) de los 1700 g que corresponde a la masa de la moldura total de fundición en estado líquido, teniendo en cuenta que el diámetro interno del crisol tipo ensamble es 101 mm. Aplicando la Ecuación 3.1 se tiene:

$$m = \delta \times V \quad (3.1)$$

Donde:

m = masa total de la moldura de fundición.

$\delta$  = densidad aproximada de un MCMC Al-Si reforzada al 5% de SiC, a fabricar.

V = volumen total de la moldura de fundición.

$$m = \delta \times V = \delta \times \pi r^2 H$$

$$1700 \text{ g} = 2,7 \text{ g/cm}^3 \times \pi \times (10,1/2 \text{ cm})^2 \times H$$

$$H = 7,86 \text{ cm} \approx 78 \text{ mm}$$

**Tercero**, una vez obtenida la altura, se procede a determinar las dimensiones que van a tener las aspas en función de la Ecuación 3.2, Ecuación 3.3 y Ecuación 3.4, las cuales están en base a lo investigado en la Tabla 2.11. Por lo tanto, se tendrá:

$$\varnothing = 0,6D \quad (3.2)$$

$$b = 0,3D \quad (3.3)$$

$$C = 0,2H \quad (3.4)$$

Donde:

D = diámetro del crisol.

$\varnothing$  = diámetro de las aspas (de punta a punta).

b = altura de las aspas.

H = altura en estado líquido de la masa total de la moldura de fundición del MC a fabricar.

C = distancia de la base del crisol a las aspas.

$$\varnothing = 0,6D = 0,6 \times 101 \text{ mm} = 60,6 \text{ mm} \approx 60 \text{ mm}$$

$$b = 0,3D = 0,3 \times 101 \text{ mm} = 30,3 \text{ mm} \approx 30 \text{ mm}$$

$$C = 0,2H = 0,2 \times 78 \text{ mm} = 15,6 \text{ mm} \approx 15 \text{ mm}$$

**Cuarto**, una vez determinadas las dimensiones que van a tener las aspas del agitador tipo paletas planas, se procede a diseñar el agitador, para lo cual se realiza la Tabla 3.9 donde se muestra los parámetros, medidas y especificaciones.

Tabla 3.9. Medidas y especificaciones del agitador tipo paletas planas.

Parámetros	Medidas o especificaciones	Significado
H	78 mm	Altura de la masa de la moldura total de fundición al interior del crisol en estado fundido
n	4	Número de aspas
Ø	60 mm	Diámetro que debe poseer las aspas de punta a punta
b	30 mm	Altura de las aspas
C	15 mm	Distancia de la base del crisol a las aspas
θ	75°	Angulo de inclinación de las aspas
V	600 rpm	Velocidad de rotación de las aspas del agitador
Material de las aspas	Acero de hoja de ballesta	Utilizada para amortiguador de vehículos
Diámetro del eje de las aspas	12,7 mm	En la medida de punta a punta de 60 mm correspondiente al diámetro de las aspas, debe estar incluido la medida del diámetro del eje de las aspas
Longitud del eje de las aspas	600 mm	Este valor puede ser variable, ya que el equipo stir casting permite su desplazamiento vertical para definir el valor del parámetro C
Material del eje de las aspas	Acero ASTM 4340	Puede ser un acero al carbono para economizar su costo, ya que este elemento no está directamente expuesto a la temperatura de la agitación

(Fuente: Elaboración propia)

El diseño y construcción del agitador tipo paletas planas es mostrado en la Figura 3.24, y en el Anexo A12 su plano de fabricación. El diseño muestra las dimensiones que posee el agitador. En cambio, su construcción se realizó mediante soldadura de las aspas al eje.



Figura 3.24. Diseño y construcción del agitador tipo paletas planas.

(Fuente: Elaboración propia)

El ensamble del motor eléctrico, estructura solidaria y del agitador tipo paletas planas, al eje del motor mediante un acople, se muestra en el diseño de la Figura 3.25.

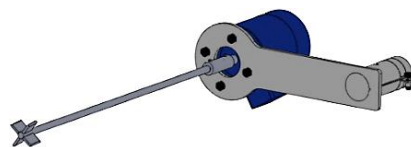


Figura 3.25. Ensamble motor eléctrico-estructura solidaria-agitador.

(Fuente: Elaboración propia)

### 3.6.5.12. Ensamble del stir casting.

En la Figura 3.26 se muestra el ensamble final de las partes y elementos diseñados que conforman el stir casting. Mientras que en el Anexo A12 se muestra su plano de conjunto.

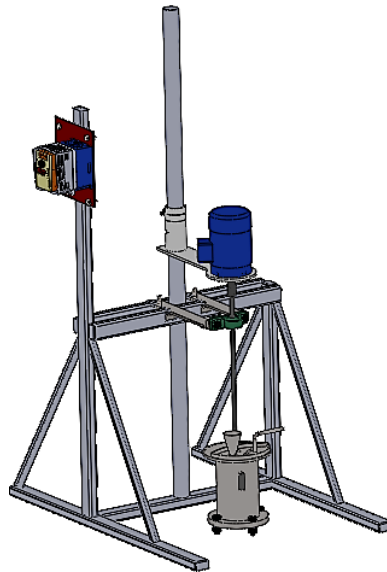


Figura 3.26. Ensamble final de partes y elementos diseñados.  
(Fuente: Elaboración propia)

En cambio, en la Figura 3.27 se muestra el montaje del diseño del equipo stir casting en el horno de fundición.

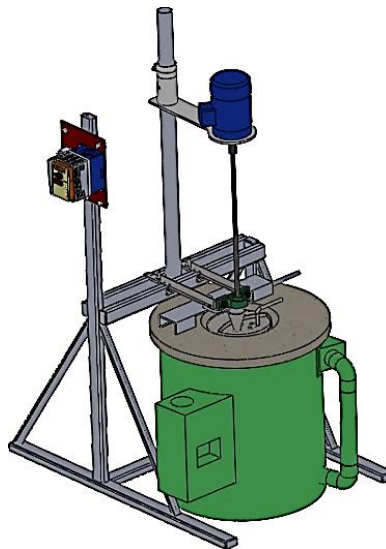


Figura 3.27. Montaje del diseño del equipo stir casting en el horno de fundición.  
(Fuente: Elaboración propia)

En la Figura 3.28 se muestra el ensamble final de las partes y elementos fabricados que conforman el stir casting, el cual será utilizado en el proceso de fabricación de lingotes cilíndricos de MCM 365.0 reforzada con partículas de SiC malla #400 vía stir casting.

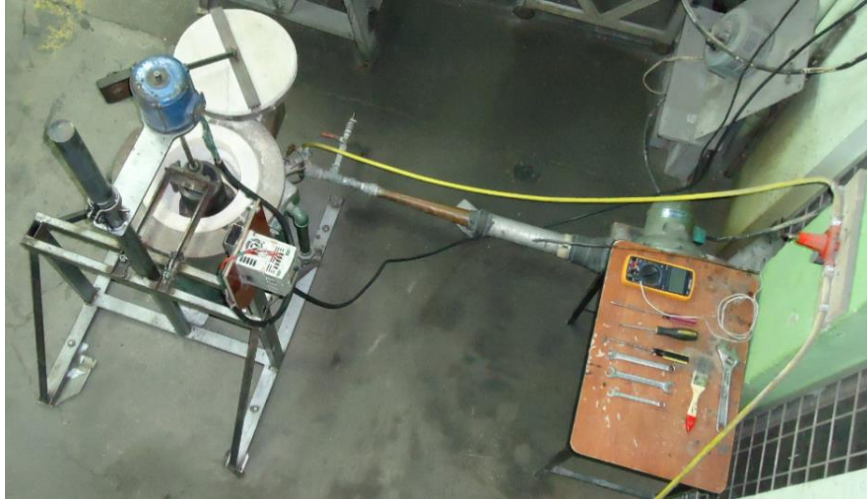


Figura 3.28. Ensamble final de partes y elementos fabricados.  
(Fuente: Elaboración propia)

### **3.7. Colado del composite 365.0/SiC/%p en molde de arena aglomerada con resina orgánica autofraguante**

El colado del composite es el último paso en su proceso de fabricación, su técnica y tipo de molde influyen en las propiedades finales del MC. Si se va utilizar moldes desechables, existen ventajas al emplear un aglomerante orgánico en comparación de un aglutinante en la arena. Para la elaboración del molde de arena aglomerada se necesita de un modelo que puede ser elaborado de madera o de acero.

#### **3.7.1. Ventajas al utilizar un aglomerante orgánico en la arena de moldeo**

Las ventajas de utilizar un aglomerante orgánico en comparación de un aglutinante en la arena, para la elaboración del molde, son de gran beneficio para la solidificación de lingotes o piezas fundidas. Ya que se evita o se reduce al mínimo defectos de fundición como: sopladuras, agujeros de pasador, lavado de arena, costras, penetración, desplazamiento del molde, desplazamiento del núcleo, agrietamiento del molde. Los cuales influyen en la calidad superficial y microestructural del material [10], [26]. Otras ventajas son mencionadas en el ítem 1.6.3.

#### **3.7.2. Elaboración del modelo de madera**

El modelo de madera se lo mando a elaborar según las dimensiones del diseño de la moldura de fundición de la Figura 3.12. A continuación se muestra el modelo de madera en la Figura 3.29, el mismo que consta de dos mitades simétricas, para que al momento de colocar la arena encima de ellos se forme la cavidad hueca de la moldura de fundición, la cual contiene tres lingotes cilíndricos.



Figura 3.29. Fabricación del modelo de madera para la elaboración del molde de arena.  
(Fuente: Elaboración propia)

### 3.7.3. Elaboración del molde de arena aglomerada con resina orgánica autofraguante

Los moldes de arena aglomerada con resina orgánica autofraguante fueron elaborados gratuitamente por la industria FUNDIRECICLAR, gracias al interés científico del Ing. Jaime Chávez, presidente ejecutivo. Esta industria es especialista en la fundición de aleaciones con alto valor agregado. Su costo de elaboración es igual de económico como uno de arena aglutinada. La ficha técnica de un molde donde se colará el MC se presenta en el Anexo A13, en el que se indica tipo de arena, resina aglomerante y catalizador. La Figura 3.30 muestra el molde de arena aglomerada con resina orgánica autofraguante, teniendo que utilizar para su obtención un modelo de madera mostrado en la Figura 3.29.



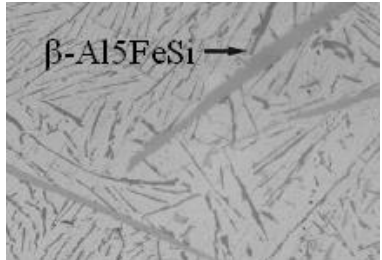
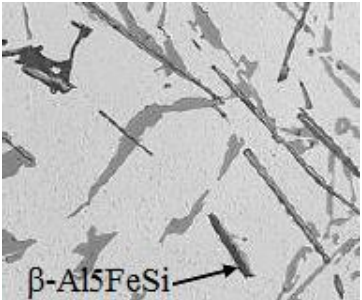
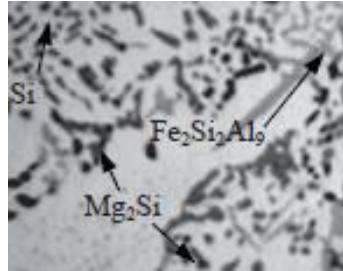


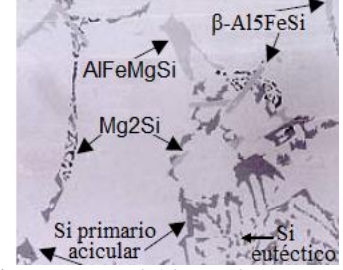
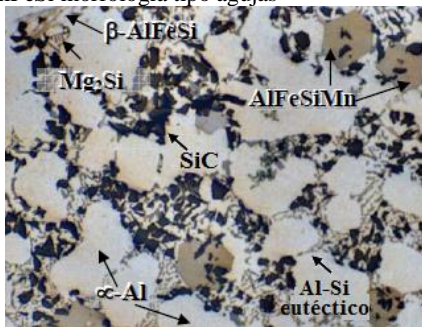
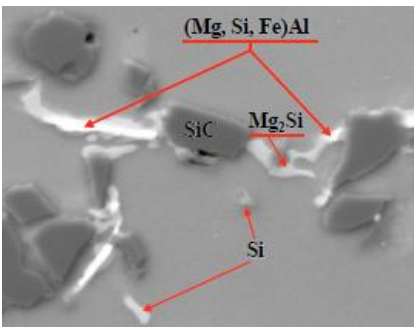
Figura 3.30. Molde de arena aglomerada con resina orgánica autofraguante.  
(Fuente: Elaboración propia)

## 3.8. Microestructura de aleaciones Al-Si y de MCMM

En el transcurso de esta investigación se ha dado a conocer las diversas fases que se originan por la reacción entre una matriz de Al con las partículas de SiC, como también por el Al con sus elementos aleantes. Estas fases según su cantidad y el tipo de morfología, afectan negativamente o positivamente en el material. Para reconocer las diversas fases que se forman en el MC se tiene que analizar su microestructura, para lo cual es necesario reconocer su forma cuando ha solidificado el material. La Tabla 3.10 muestra las microestructuras de aleaciones Al-Si y de MCMM de Al-Si reforzadas con partículas de SiC. Estas microestructuras serán de ayuda para reconocer las fases formadas en el composite que será obtenido. No se muestran fases formadas en microestructuras de MC 365.0/SiC/%p ya que no hay suficientes investigaciones.



Tabla 3.10. Microestructuras de aleaciones Al-Si y de MCM de Al-Si reforzadas con partículas de SiC indicando las fases que forma el Al con sus aleantes principales.

<b>Microestructuras de aleaciones Al-Si</b>		
<p>Aleación A380 die casting Fase <math>\beta</math>-Al<sub>5</sub>FeSi, morfología tipo agujas</p>  <p>Microestructura sin modificar 1,4%Fe [75]</p>	<p>Aleación AlSi9Cu3 Fase <math>\beta</math>-Al<sub>5</sub>FeSi, morfología tipo agujas</p>  <p>Microestructura con 0,9%Fe, 0,24%Mn [76]</p>	<p>Aleación A356-T6 Fase <math>\beta</math>-Al<sub>9</sub>Fe<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>, morfología tipo agujas Fase Mg<sub>2</sub>Si, morfología tipo partículas dispersas dentro de las partículas de Si</p>  <p>Microestructura con 0,25-0,45%Mg, 0,2% máx. Fe, 0,1%Mn [77]</p>
<p>Aleación A380 die casting Fase <math>\alpha</math>-Al<sub>15</sub>(FeMn)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> Morfología tipo escritura china</p>  <p>Microestructura con 1,8%Fe y modificada con 0,9%Mn [75]</p>	<p>Aleación AlSi9Cu3 Fase <math>\alpha</math>-Al<sub>15</sub>(FeMn)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> Morfología tipo escritura china</p>  <p>Microestructura con 0,9%Fe, Mn &gt; 0,24% [76]</p>	<p>Aleación 356 colada en coquilla por fuerza de gravedad Fase <math>\beta</math>-Al<sub>5</sub>FeSi, morfología tipo agujas Fase Mg<sub>2</sub>Si, morfología tipo partículas dispersas dentro de las partículas de Si Fase AlFeMgSi morfología poliédrica</p>  <p>Microestructura 0,14%Fe, 0,51%Mg [27]</p>
<b>Microestructuras de MCM de Al-Si reforzadas con partículas de SiC</b>		
<p>Composite A360/SiC/10p infiltración bajo presión Fase <math>\alpha</math>-AlFeMnSi morfología tipo poliédrica Fase Mg<sub>2</sub>Si morfología tipo escritura china Fase <math>\beta</math>-AlFeSi morfología tipo agujas</p>  <p>Microestructura con 0,89%Fe, 0,62%Mn, 0,63%Mg. [78]</p>	<p>Composite A359/SiC/20p colada en molde de arena Fase AlFeMgSi morfología tipo agujas Fase Mg<sub>2</sub>Si morfología tipo escritura china</p>  <p>Microestructura con 0,12%Fe, 0,03%Mn, 0,61%Mg [39]</p>	

(Fuente: Elaboración propia basada en [27], [39], [75], [76], [77], [78])

### 3.9. Aplicaciones industriales

La Tabla 3.11 compara propiedades y aplicaciones de MC de matrices 3xx.x y 4xx.x reforzadas con partículas de SiC, con aleaciones A356.0 tomada de la Tabla 1.7 y 365.0 tomada de la Tabla 3.4, y también con fundiciones grises y hierros dúctiles.

Tabla 3.11. Propiedades y aplicaciones de MC, aleaciones Al-Si, fundiciones grises y hierros dúctiles.

Serie del material	Elementos de la matriz en %	Proceso de fabricación (Ørefuerzo)/Técnica de colado	$\sigma_y$ MPa	$\sigma_u$ MPa	HB	E GPa	% ε	Ref.	Aplicaciones.
A356.0	6.5-7.5Si, 0.2Cu 0.25-0.45Mg	Arena de moldeo/F Arena de moldeo/T6 Molde Permanente/T61	83 207 207	159 278 283	--- 75 90	72.4	6 6 10	[7]	Blocks y cabezotes de motores de autos de competición, aros de ruedas de autos, carcasas de ejes traseros, chasis de camión, ruedas de aeronaves, cárteres.
365.0	9.5-11.5Si 0.15Fe, 0.5-0.8 Mn, 0.1-0.5Mg	Baja presión en molde arena-F Baja presión molde de arena-T6 Die casting a alta presión-F	96 250 120	175 299 250	61 109 75	74 74 74	2 4 5	[67] [68]	Miembros transversales para autos, juntas de inclinación de cabinas de camiones, buje de rueda para motos, elementos de motores, aplicaciones navales y aeroespaciales, etc.
A413.2-F	11Si, 0.6Fe	Fundición horno eléctrico	65	180	85	---	9	[35]	Lingotes fabricados por Pulkit Bajaj, los utilizo para la caracterización, no menciona aplicación alguna.
A413.2/SiC/2.5p-F	0.5Mn, 0.1Mg 0.2Ti	Stir casting (Ø100 µm SiC) / Colado por fuerza de gravedad en molde permanente tipo lingotera	78	220	92	---	7.5	[35]	
A413.2/SiC/5p-F	No adicionó %Mg para el MC		85	245	83	---	5.5	[35]	
A413.2/SiC/7.5p-F			112	250	150	---	3.2	[35]	
A356.0-F	7.5Si, 0.5Fe	Fundición horno eléctrico	---	---	60	---	---	[79]	Típicas aplicaciones para A356.0.
A356.0/SiC/3p-F	0.3Mn, 0.2Cu	Stir casting (no especifica Ø SiC) / Colado en molde de acero	148	217	73	---	---	[79]	Lingotes fabricados por Satyanarayan <i>et al.</i> , los utilizó para la caracterización.
A356.0/SiC/6p-F	No adicionó %Mg para el MC		153	222	71	---	---	[79]	
A359-F	9.45Si, 0.12Fe	Fundidos y colados por fuerza de gravedad en molde de arena	84	114	---	52	1.1	[39]	Lingotes fabricados por la empresa Teksid y caracterizado por Fuentes.
A359-T6	0.03Mn 0.61Mg 0.135Ti		236	243	52	72	0.6	[39]	
A359/SiC/20p-F	Se desconoce si la empresa Teksid adicionó %Mg para el MC	Stir casting (Ø42 µm SiC) / Colado por gravedad en molde de arena	150	180	---	83	0.9	[39]	
A359/SiC/20p-T6			---	242	120	97	0.3	[39]	
A359/SiC/20p-T6			---	247	---	105	0.3	[39]	Tambor de freno fabricado Teksid y caracterizado por Fuentes
4xx.x-F	12.5Si	Fundición en horno eléctrico	---	190	65	---	---	[80]	Típicas aplicaciones para 4xxx.x
4xx.x/SiC/3p-F	12.5Si No se adicionó %Mg para el MC	Stir casting (Ø50 µm SiC) / No especifica el tipo de molde	---	250	72	--	--	[80]	La investigación menciona que el MC puede ser empleado en blocks de motores, pistones, camisas.
A356/SiC/10p-T61	-----	-----	287	308	---	82	0.6	[81]	Pistones, bielas, camisas de cilindros, tambor de frenos, discos de frenos, cilindros para blocks.
A356/SiC/15p-T61			329	336	---	91	0.3	[81]	
A356/SiC/20p-T61			336	337	---	98	0.4	[81]	
4xx.x/SiC/5p-F	9.78Si, 0.15Fe	Pulvimetalurgia con proceso de forja.	---	208	51	---	---	[82]	Pistones para compresores de aire acondicionado para vehículos.
SAE J431 grado G2500	3.2-3.5C, 0.6- 0.9Mn, 2-2.4Si, 0.15S	Fundición gris	---	173	170	---	0.6	[9]	Blocks de cilindros, cabezotes, pistones, discos de embrague, cuerpos de bombas de aceite, cajas de transmisión, tambores de freno, todo esto para servicio ligero.
SAE J431 grado G3000	3.1-3.4C, 0.6- 0.9Mn, 1.9-2.3Si 0.15S	Fundición gris	---	207	187	---	0.6	[9]	Blocks de cilindros, cabezotes, pistones, discos de embrague, tambores de freno, todo esto para servicio mediano.
SAE J431 grado G3500	3-3.3C, 0.6-0.9Mn 1.8-2.2Si, 0.15S	Fundición gris	---	241	207	---	0.6	[9]	Blocks de motores diésel, volantes de inercia, cajas de transmisión para maquinaria pesada.
SAE J431 grado G3500c	3.5C, 0.6-0.9Mn, 1.3-1.8Si, 0.12S	Fundición gris		241	207		0.6	[9]	Tambores de freno para servicio extra pesado
SAE AMS 5315C	3C, 2.5Si, 0.08P	Hierro dúctil	310	414	190	---	15	[9]	Blocks de motores, bombas, carcasas, cuerpos de válvulas, engranajes, bridas, cilindros.
ASTM A 536 grado 80-55-06	-----	Hierro dúctil	379	552	---	---	6	[9]	Cigüeñales, engranajes, rodillos

$\sigma_v$ =Esfuerzo de fluencia  $\sigma_u$ =Resistencia última HB=Dureza Brinell E=Módulo de elasticidad o módulo de Young  $\epsilon$ =Elongación

(Fuente: Elaboración propia basada en [7], [9], [35], [39], [67], [68], [79], [80], [81], [82])

Las investigaciones por lo general utilizan porcentajes entre 2,5% a 20% de partículas de SiC para reforzar matrices de la serie 3xxx.x o 4xxx.x, con el objetivo de estudiar el aumento de las propiedades mecánicas del MC, como se muestra en la Tabla 3.11 y que será utilizada para compararla con el MC a fabricarse. En esta investigación se realizarán pruebas preliminares para dispersar partículas de SiC malla #400 en la matriz 365.0, con el objetivo de determinar el porcentaje de SiC a ser adicionado, y también establecer un proceso de fabricación que permitirá la obtención del MC 365.0/SiC/%p a caracterizar.

## CAPÍTULO 4

### FABRICACIÓN DE LINGOTES CILÍNDRICOS Y PREPARACIÓN DE PROBETAS DE MCMM ANSI AA 365.0 REFORZADA CON PARTÍCULAS DE SiC MALLA #400

Este capítulo describe y toma como base, los elementos y materiales utilizados en las pruebas preliminares donde se realizó la dispersión del polvo SiC malla #400, con el fin de establecer tanto un método de dispersión de las partículas de SiC en una matriz Al-Si, como un proceso de fabricación de un composite. El capítulo también presenta la elaboración de una codificación para lingotes cilíndricos y probetas, a partir de los nombres técnicos de los materiales utilizados en el proceso de fabricación de lingotes cilíndricos de MCMM 365.0 reforzada con partículas de SiC malla #400 al 2%, 4% y 6%, vía stir casting. Esta codificación sirve de ayuda para una fácil manipulación de la información. Además, se presenta el resumen de los materiales y parámetros utilizados en el proceso de fabricación de lingotes cilíndricos 365.0, 365.0/SiC/2p, 365.0/SiC/4p y 365.0/SiC/6p, a los que se realizó la preparación de probetas para ensayos de tracción, dureza y metalográficos mediante microscopio óptico, con el objetivo de realizar su caracterización. Al final del capítulo se presenta el costo del proyecto de investigación.

#### 4.1. Elementos y materiales utilizados en las pruebas preliminares

Los elementos mecánicos y eléctricos, instrumentos de medición, accesorios, constituyentes y materiales secundarios, utilizados en un principio para la realización de las pruebas preliminares, y que algunos de ellos han sido descritos con mayor detalle en el Capítulo 03, son una parte fundamental para desarrollar un método de dispersión del polvo de SiC malla #400, así como un proceso de fabricación de un material compuesto. Estos elementos y materiales son los que se describen a continuación:

**Horno de fundición**, Figura 3.11 del Capítulo 3, recibió un mantenimiento que consistió en enlucir con una fina capa de polvo cerámico su pared interna, revisión de fugas de aire del venterol y accesorios, y adaptación de otra una válvula reguladora de presión de GLP 0.5-4 bar, 12 kg/h, 16 bar máx.

**Sistema de agitación stir casting**, Figura 4.1, inicialmente constituido de una estructura, motor eléctrico, variador de frecuencia, estructura solidaria del motor, acople eje motor-



eje agitador, rodamiento de brida, soporte para rodamiento de brida, agitador, diseñados y contruidos en el ítem 3.6.5. Además de un crisol cerámico y la tapa del stir casting. La tapa protege la atmosfera interna de la fundición, y sirve para la adición del polvo de SiC en la matriz fundida, gracias a un tubo soldado en la parte superior de su estructura como se muestra en la Figura 4.2.



Figura 4.1. Sistema de agitación stir casting.  
(Fuente: Elaboración propia)



Figura 4.2. Tapa del stir casting.  
(Fuente: Elaboración propia)

**Crisol arcilla-grafito #18 marca diamant**, será utilizado en varias pruebas preliminares, en este crisol se puede fundir aproximadamente 7 kg de aluminio. En la Figura 4.3 se muestra el crisol y las dimensiones que posee el mismo.



Figura 4.3. Crisol arcilla-grafito #18 marca diamant con sus debidas dimensiones.  
(Fuente: Elaboración propia)

**Estructura de acero para el calentamiento del polvo de SiC**, Figura 4.4, aquí se ubican el plato de arcilla donde se coloca el polvo, la antorcha quemadora de GLP para calentar el plato, y una tapa de aluminio para proteger el polvo de la contaminación ambiental, además de mantenerlo a una temperatura aproximada de 450 °C.



Figura 4.4. Estructura de acero para el calentamiento del polvo de SiC en plato de arcilla.  
(Fuente: Elaboración propia)

**Molde de arena para colada horizontal**, Figura 4.5, se lo utilizó en algunas pruebas preliminares, el cual tiene en su interior la forma hueca de dos ejes. Para el moldeo se empleó arena aglutina del laboratorio de fundición. Una vez obtenido el molde se procedió a su secado con una antorcha quemadora de GLP.



Figura 4.5. Molde de arena para colada horizontal.  
(Fuente: Elaboración propia)

**Molde de arena para colada vertical**, Figura 4.6, se lo utilizó en algunas pruebas preliminares, el cual tiene la forma de 4 lingotes circulares. Para el moldeo se empleó arena aglutina del laboratorio de fundición. Una vez obtenido el molde se procedió a su secado con una antorcha quemadora de GLP.



Figura 4.6. Molde de arena para colada vertical.  
(Fuente: Elaboración propia)

**Pistones para blocks de motores de combustión interna**, estos elementos serán utilizados como matriz para las pruebas preliminares, a los cuales se dispersará el polvo de SiC malla #400. Se procederá a utilizar estos pistones como constituyente principal

por tres motivos. El primero, es debido a que en el laboratorio de fundición se encuentran en gran cantidad pero en diferentes marcas y modelos. El segundo, se asume que la mayor parte de la producción de pistones tienen contenidos de Si del 5,5% al 16%, lo que puede ser semejante a fundir una matriz Al-Si 365.0 (10,32%Si) que va ser empleada para la fabricación de un MC en esta investigación. El tercero, porque no se puede utilizar el material matriz Al-Si 365.0, ya que su cantidad en masa está estimada solo para cuatro fundiciones y alrededor de dos a tres pruebas preliminares.

La mayor parte de la producción de pistones para motores de combustión interna son de la serie 3xx.x, 4xx.x y 4xxx, debido a que su principal elemento aleante es el silicio (Si) [7]. El cual aumenta la resistencia y dureza de la aleación, a causa de la precipitación del Si hacia los límites de grano, producto de su baja solubilidad en el aluminio. Además de mejorar la colabilidad y fluidez, lo que permite obtener elementos mecánicos de formas complejas con espesores delgados y de excelente acabado. Por estas ventajas en este proyecto se asumió que se trabajará con pistones de aleación Al-Si, con rangos de 5.5 a 16% de Si. Para tener una referencia de la temperatura de fusión teórica y otros datos de interés, que ayuden al proceso de fundición en las pruebas preliminares, se estableció que los pistones tendrán alrededor de un 12% de Si (AlSi12). En el mercado también existen pistones de la serie 2xx.x y 2xxx, pero en menor producción. En la Figura 4.7 se muestran algunos de los pistones empleados en motores de combustión interna, estos serán utilizados como material matriz para las pruebas preliminares.



Figura 4.7. Pistones utilizados como material matriz en las pruebas preliminares.  
(Fuente: Elaboración propia)

La cantidad en masa de los pistones que serán utilizados para cada fundición, se calcula en base a la masa de la moldura de fundición que es función de su volumen. Este volumen es multiplicado por la densidad de un MC al 5% de SiC, obteniéndose la masa que del composite, que está constituido por la matriz de pistones Al-Si y refuerzo de SiC. La cantidad en masa de la moldura de fundición para las pruebas preliminares va desde 1200 a 2285,75 g, su cálculo es igual al determinado en el ítem 3.6.4. Las cantidades en porcentaje y masa de cada constituyente son determinadas en cada prueba preliminar.

**Polvo de SiC malla #400**, las partículas de este constituyente principal, que serán dispersadas en la matriz fundida de aleación Al-Si, se utilizarán en diferentes porcentajes respecto a la masa de la moldura de fundición. Las cantidades en masa y porcentaje del polvo son determinadas en cada prueba preliminar.

**Materiales secundarios**, fundentes alu fundex extra, apartagas H7-50 y afinador de grano Al5TiB. Además de fragmentos de aros de ruedas cuyo porcentaje de magnesio en su estructura se desconoce, solo se especula que puede contener algún porcentaje de Mg, ya que estos elementos automotrices pueden ser fabricados de una aleación Mg-Al.

**Herramientas para el manejo de la fundición**, con el objetivo de facilitar y mejorar el proceso de fundición para la obtención del composite se procedió a la construcción de herramientas como campanas para la aplicación de los fundentes alu fundex extra que limpia, protege y escorifica la fundición, y apartagas que la desgasa. También se construyó cucharas pequeñas de agitación y retiro de escoria, cucharetas perforadas de retiro de escoria, un buje con placa circular perforada para retiro de escoria, y una pala de apoyo para el colado. En la Figura 4.8 se muestran las herramientas construidas para el manejo de la fundición, las cuales son de acero al carbono, hierro fundido y acero inoxidable. Las de acero al carbono y de hierro, fueron recubiertas con una pintura refractaria color blanco INJEMAQ AL 397 debido a lo expuesto en el ítem 2.10.6.



Figura 4.8. Herramientas construidas para el manejo de la fundición.  
(Fuente: Elaboración propia)

**Multímetro**, en el transcurso de las pruebas preliminares el control de temperatura en el proceso de fabricación del composite será efectuado con un multímetro de marca DT9208A y termocupla tipo K.

## 4.2. Pruebas preliminares para la dispersión del polvo de SiC malla #400

Los elementos y materiales, junto con un método de dispersión del polvo de SiC malla #400 en una matriz fundida de pistones para blocks, desarrollado a partir de los experimentos realizados en las pruebas preliminares, son parte y base fundamental en la creación de un proceso de fabricación de lingotes cilíndricos de MCM 365.0 reforzada con partículas de SiC malla #400 vía stir casting y su posterior caracterización. En el transcurso de las pruebas preliminares se irán descartando o incorporando otros elementos y materiales, que serán de ayuda en el mejoramiento de la dispersión del SiC, así como para definir el proceso de fabricación del MCM. Además, para las pruebas se utilizará como matriz pistones para blocks de cilindros de motores de combustión interna, ya que se posee en gran cantidad y su material es una aleación Al-Si, la cual tiene cierta semejanza en porcentaje de elementos aleantes a la matriz 365.0 que va ser utilizada en la fabricación del composite. Para definir un proceso de fabricación vía stir casting es indispensable tomar en cuenta las observaciones que se han obtenido en todas las pruebas preliminares desarrolladas.

### 4.2.1. Prueba preliminar 01

En la Tabla 4.1 se muestran los materiales en porcentaje y masa. Además de los parámetros establecidos para la realización de la prueba preliminar 01.

Tabla 4.1. Materiales y parámetros para la prueba preliminar 01.

Cantidades en porcentaje y masa de los constituyentes principales y materiales secundarios					
Masa de la moldura de fundición 100%	Matriz pistones Al-Si al 92,5%	Tensioactivo aro de rueda al 2,5%	Refuerzo SiC malla #400 al 5%	Escorificante, alu fundex extra al 0,5%	Desgasificante apartagas H7-50 al 0,25%
1500 g	1387,5 g	37,5 g	75 g	6,9 g	3,47 g
Temperaturas para el proceso de fundición de la matriz pistones AlSi12 y MC AlSi12-SiC					
Temperatura de fusión teórica AlSi12	571 °C [7]	Temperatura de colado AlSi12 recomendada	680-750 °C	Temperatura de colado AlSi12-SiC investigaciones	700-760 °C [37], [41], [80]
Parámetros en el proceso de stir casting					
tiempo de calentamiento horno-crisol-matriz			20 min	Temperatura ambiente	25 °C
tiempo de fundición de la matriz			40 min	Temperatura de fusión de la matriz	730 °C
SiC se mantiene calentado hasta después de escorificar y desgasificar la matriz				Temperatura de calentamiento SiC	450 °C
tiempo de adición SiC con una rotación de las aspas sobre la matriz fundida de 500 rpm			6 min	Temperatura de la matriz al adicionar SiC	740 °C
tiempo de agitación de la masa fundida matriz-SiC con una rotación de las aspas de 700 rpm			10 min	Temperatura de agitación de la masa fundida matriz-SiC	770 °C
Se utilizó un crisol diamant de arcilla-grafito #18. Molde de arena para colado horizontal. Agitador de 4 paletas planas de Ø100 × 70 × 7 mm				Temperatura de colado composite	760 °C

(Fuente: Elaboración propia)

En esta prueba se utilizó los elementos y materiales citados en el ítem 4.1. Fundida la matriz a 730 °C se añadió el aro de rueda, para dar paso al escorificado y desgasificado. Seguidamente el SiC, calentado en el plato de arcilla y puesto en la tapa del stir casting, fue adicionado a la matriz al iniciar la agitación de las aspás. Terminada la agitación de la masa fundida pistones-SiC se procedió al colado. En el transcurso del proceso se tuvo algunas observaciones.

Al colocar la tapa del sistema stir casting, Figura 4.1, aumenta la temperatura de la masa fundida pistones-SiC, debido a que esta actúa como una barrera que impide la transferencia de calor, pudiendo llegar a 900 °C. No se puede retirar y colocar la tapa, para que el calor se transfiera al medio ambiente y baje la temperatura de la masa fundida, ya que en esta se asienta el rodamiento de brida que sirve de guía para el eje de las aspás. Para el control de la temperatura se debe regular el caudal de gas que ingresa a la tobera de combustión mediante una válvula ubicada al inicio de la tobera.

En este tipo de matriz que son pistones de Al-Si, la temperatura de colada recomendada, y a la cual se intentó colar el MC fue de 730 °C, como se expone en la Tabla 4.1, pero al no poder estabilizarla, se procedió a colar a 760 °C.

Hay una demora al momento de sacar la tapa del equipo stir casting y retirar las aspás del interior de la fundición, cuando el MC va a ser colado. Esto genera una sedimentación del SiC, ya que se observa una masa viscosa residual en el fondo del crisol al momento de finalizar el colado del composite. También puede deberse a las dimensiones de las aspás que no logró dispersar las partículas de SiC en la matriz fundida.

En la parte central de uno de los lingotes de MC se realizó un corte transversal, la superficie reveló a simple vista macroporosidad. Esta es originada principalmente por la agitación matriz-refuerzo, que expuso a la matriz al contacto del aire que se encuentra en el medio ambiente.

#### **4.2.2. Prueba preliminar 02**

En la Tabla 4.2 se muestran los materiales en porcentaje y masa. Además de los parámetros establecidos para la realización de la prueba preliminar 02.

Tabla 4.2. Materiales y parámetros para la prueba preliminar 02.

Cantidades en porcentaje y masa de los constituyentes principales y materiales secundarios					
Masa de la moldura de fundición 100%	Matriz pistones Al-Si al 92%	Tensioactivo aro de rueda al 3%	Refuerzo SiC malla #400 al 5%	Escorificante, alu fundex extra al 0,5%	Desgasificante apartagas H7-50 al 0,25%
2173,91 g	2000 g	65,22 g	108,7 g	10 g	5 g
Temperaturas para el proceso de fundición de la matriz pistones AlSi12 y MC AlSi12-SiC					
Temperatura de fusión teórica AlSi12	571 °C [7]	Temperatura de colado AlSi12 recomendada	680-750 °C	Temperatura de colado AlSi12-SiC investigaciones	700-760 °C [37], [41], [80]
Parámetros en el proceso de stir casting					
tiempo de calentamiento horno-crisol-matriz	20 min	Temperatura ambiente	25 °C		
tiempo de fundición de la matriz	60 min	Temperatura de fusión de la matriz	700 °C		
SiC se mantiene calentado hasta después de escorificar y desgasificar la matriz		Temperatura de calentamiento SiC	450 °C		
tiempo de adición SiC con una rotación de las aspas sobre la matriz fundida de 500 rpm	6 min	Temperatura de la matriz al adicionar SiC	670 °C		
tiempo de agitación de la masa fundida matriz-SiC con una rotación de las aspas de 700 rpm	10 min	Temperatura de agitación de la masa fundida matriz-SiC	700 °C		
Se utilizó un crisol diamant de arcilla-grafito #18. Molde de arena para colado horizontal. Agitador de 4 paletas planas de Ø100 × 60 × 7 mm		Temperatura de colado composite	640 °C		

(Fuente: Elaboración propia)

En esta prueba se utilizó los elementos y materiales citados en el ítem 4.1, a excepción de la tapa del sistema stir casting. Fundida la matriz a 700 °C se añadió el aro de rueda, para dar paso al escorificado y desgasificado. Seguidamente el SiC, calentado en el plato de arcilla, fue adicionado a la matriz por medio de un embudo al iniciar la agitación de las aspas. Terminada la agitación de la masa fundida pistones-SiC se procedió a su colado. En el transcurso del proceso se tuvo algunas observaciones.

Se procedió a trabajar sin la tapa del sistema stir casting. Con esto el calor excesivo del interior del horno se transfiere al medio ambiente y se puede mantener una temperatura uniforme de la masa fundida pistones-SiC al interior del crisol arcilla-grafito. Al trabajar sin la tapa del stir casting se pueden observar los fenómenos de adición del SiC y de la masa fundida matriz-refuerzo, mientras las aspas agitaban y mesclaban estos constituyentes.

Para la adición del polvo de SiC, se procedió a calentarlo en un plato de arcilla. El plato es colocado en una estructura de acero para que mediante el calor de la antorcha de GLP llegue a la temperatura de calentamiento del SiC. Posteriormente el plato es acercado a la boca del embudo de acero, Figura 4.9, para que mediante una cuchara se comience la adición del SiC por la boca y caiga en la superficie interior del vórtice de la matriz fundida, producto de la agitación de las aspas.



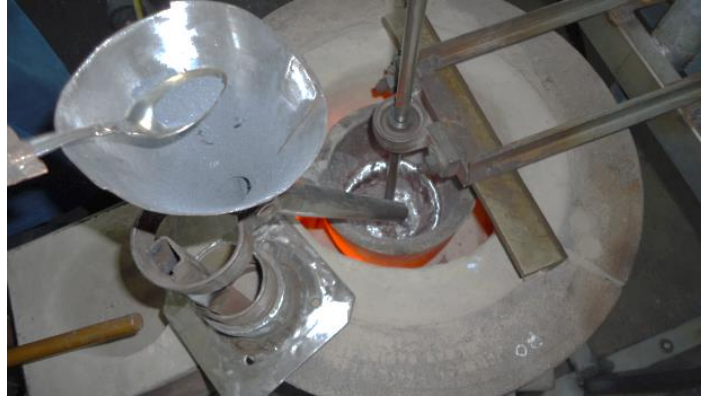


Figura 4.9. Embudo de acero para la adición del polvo de SiC en la matriz fundida.  
(Fuente: Elaboración propia)

Se observa que la masa fundida al entrar por el embudo del molde lo hace en un estado semisólido (viscoso). Esto se debe por colar el MC a 640 °C, que de por sí, es a una baja temperatura, el ambiente la enfría aún más, generando que el MC no llene por completo el interior del molde, obteniéndose lingotes con rechupes y ovalados. Además de una masa residual pastosa en el fondo del crisol. En la Figura 4.10 se muestran los lingotes de MC y su masa residual, además del corte y fractura en la parte superior del lingote 2A, en el cual no se observa macroporosidad en su superficie.



Figura 4.10. Lingotes de MC con masa residual además del corte y fractura del lingote 2A.  
(Fuente: Elaboración propia)

A partir de la zona superior del lingote 2A se preparó una probeta cilíndrica para el ensayo metalográfico por MEB. El pulido de la probeta reveló a simple vista que en su superficie transversal no existe macroporosidad. Mientras que en el ensayo se obtuvo la microestructura de la Figura 4.11 que muestra que no logró la dispersión del SiC en la matriz, y también la microporosidad es mínima. La microscopía electrónica de barrido



(MEB) se la realizó mediante un microscopio electrónico ASPEX PSEM eXpress ubicado en el Laboratorio de Nuevos Materiales (LANUM) de la Facultad de Ingeniería Mecánica.

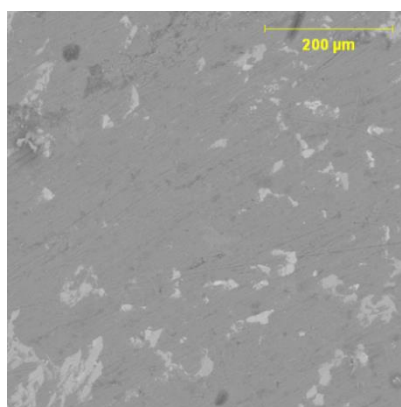


Figura 4.11. Microestructura por MEB a una probeta del lingote 2A.  
(Fuente: Elaboración propia)

En las siguientes pruebas preliminares no se trabajará con la tapa del sistema stir casting, pero se utilizará el embudo de la Figura 4.9 para la adición del SiC.

### 4.2.3. Prueba preliminar 03

En la Tabla 4.3 se muestran los materiales en porcentaje y masa. Además de los parámetros establecidos para la realización de la prueba preliminar 03.

Tabla 4.3. Materiales y parámetros para la prueba preliminar 03.

Cantidades en porcentaje y masa de los constituyentes principales y materiales secundarios					
Masa de la moldura de fundición 100%	Matriz pistones Al-Si al 87,5%	Tensioactivo aro de rueda al 4%	Refuerzo SiC malla #400 al 8,5%	Escorificante, alu fundex extra al 0,5%	Desgasificante apartagas H7-50 al 0,25%
2285,75 g	2000 g	91,42 g	194,28 g	10 g	5 g
Temperaturas para el proceso de fundición de la matriz pistones AlSi12 y MC AlSi12-SiC					
Temperatura de fusión teórica AlSi12	571 °C [7]	Temperatura de colado AlSi12 recomendada	680-750 °C	Temperatura de colado AlSi12-SiC investigaciones	700-760 °C [37], [41], [80]
Parámetros en el proceso de stir casting					
tiempo de calentamiento horno-crisol-matriz	20 min	Temperatura ambiente	25 °C		
tiempo de fundición de la matriz	40 min	Temperatura de fusión de la matriz	700 °C		
SiC se mantiene calentado hasta después de escorificar y desgasificar la matriz		Temperatura de calentamiento SiC	450 °C		
tiempo de adición SiC con una rotación de las aspas sobre la matriz fundida de 500 rpm	6 min	Temperatura de la matriz al adicionar SiC	700 °C		
tiempo de agitación de la masa fundida matriz-SiC con una rotación de las aspas de 700 rpm	10 min	Temperatura de agitación de la masa fundida matriz-SiC	700 °C		
Se utilizó un crisol diamant de arcilla-grafito #18. Molde de arena para colado horizontal. Agitador de 4 paletas planas de Ø100 × 60 × 7 mm		Temperatura de colado composite	690 °C		

(Fuente: Elaboración propia)

En esta prueba se utilizó los elementos y materiales citados en el ítem 4.1. Fundida la matriz a 700 °C se añadió el aro de rueda, para dar paso al escorificado y desgasificado. Seguidamente el SiC, calentado en el plato de arcilla, fue adicionado a la matriz por medio de un embudo al iniciar la agitación de las aspas. Terminada la agitación de la masa fundida pistones-SiC se procedió a su colado. En el transcurso del proceso se tuvo algunas observaciones.

Al colar el MC por el embudo del molde de arena se observa como este pasa de un estado líquido a uno viscoso. Lo que generó que el MC no llene por completo el interior del molde. Además de formarse rechupes en los lingotes. Estos defectos se deben principalmente a tres factores. En el primero, se coló el MC a una temperatura de 690 °C, aunque es un valor alto, la temperatura del ambiente lo enfría alrededor de 30 °C al sacar el crisol del horno. Segundo, el porcentaje de SiC al 8,5% genera que la masa fundida se torne viscosa. En el tercero, las partículas de SiC, junto con la matriz fundida, transfieren el calor hacia el medio ambiente, originando un enfriamiento en el transcurso del colado. Por lo tanto, no se consigue una buena colabilidad y fluidez del composite, a causa de la temperatura de colado. Entonces, para alcanzar la colabilidad se tendrá que aumentar entre 30 a 60 °C. La Figura 4.12 muestra los lingotes de MC 3A y 3B.



Figura 4.12. Lingotes de MC 3A y 3B.  
(Fuente: Elaboración propia)

#### 4.2.4. Prueba preliminar 04

En la Tabla 4.4 se muestran los materiales en porcentaje y masa. Además de los parámetros establecidos para la realización de la prueba preliminar 04.

Tabla 4.4. Materiales y parámetros para la prueba preliminar 04.

Cantidades en porcentaje y masa de los constituyentes principales y materiales secundarios					
Masa de la moldura de fundición 100%	Matriz pistones Al-Si al 87,5%	Tensioactivo aro de rueda al 4%	Refuerzo SiC malla #400 al 8,5%	Escorificante, alu fundex extra al 0,5%	Desgasificante apartagas H7-50 al 0,25%
2285,75 g	2000 g	91,42 g	194,28 g	10 g	5 g
Temperaturas para el proceso de fundición de la matriz pistones AlSi12 y MC AlSi12-SiC					
Temperatura de fusión teórica AlSi12	571 °C [7]	Temperatura de colado AlSi12 recomendada	680-750 °C	Temperatura de colado AlSi12-SiC investigaciones	700-760 °C [37], [41], [80]
Parámetros en el proceso de stir casting					
tiempo de calentamiento horno-crisol-matriz	20 min	Temperatura ambiente	28 °C		
tiempo de fundición de la matriz	30 min	Temperatura de fusión de la matriz	700 °C		
SiC se mantiene calentado hasta después de escorificar y desgasificar la matriz		Temperatura de calentamiento SiC	450 °C		
tiempo de adición SiC con una rotación de las aspas sobre la matriz fundida de 500 rpm	6 min	Temperatura de la matriz al adicionar SiC	720 °C		
tiempo de agitación de la masa fundida matriz-SiC con una rotación de las aspas de 700 rpm	10 min	Temperatura de agitación de la masa fundida matriz-SiC	750 °C		
Se utilizó un crisol diamant de arcilla-grafito #18. Molde de arena para colado vertical. Agitador de 4 paletas planas de Ø90 × 55 × 7 mm con inclinación de 70°		Temperatura de colado composite	740 °C		

(Fuente: Elaboración propia)

En esta prueba se utilizó los elementos y materiales citados en el ítem 4.1. Fundida la matriz a 700 °C se añadió el aro de rueda, para dar paso al escorificado y desgasificado. Seguidamente el SiC, calentado en el plato de arcilla, fue adicionado a la matriz por medio de un embudo al iniciar la agitación de las aspas. Terminada la agitación de la masa fundida pistones-SiC se procedió a su colado. En el transcurso del proceso se tuvo algunas observaciones.

Se mejora la fluidez y colabilidad del MC a 740 °C, evitando que se cole en un estado viscoso (semisólido). Sin embargo, al solidificarse se observa macroporosidad en los cuatro lingotes obtenidos. Esto se debe a la absorción de aire al momento de realizar la agitación de la masa fundida, ya que la alta velocidad de rotación expuso a la matriz fundida al contacto con los gases y vapores del medio ambiente. En el caso de vapores provenientes de la humedad ambiental, esta genera una reacción química entre el aluminio con el vapor de agua, dando como producto gas hidrógeno que se disuelve en la aleación AlSi12. Esta reacción es mencionada en el ítem 2.10.1. En la Figura 4.13 se muestra los cuatro lingotes de MC, además del corte y fractura en la parte media del lingote 4C en el que se observa macroporosidad de su superficie transversal.



Figura 4.13. Lingotes de MC con corte y fractura del lingote 4C.  
(Fuente: Elaboración propia)

#### 4.2.5. Prueba preliminar 05

En la Tabla 4.5 se muestran los materiales en porcentaje y masa. Además de los parámetros establecidos para la realización de la prueba preliminar 05.

Tabla 4.5. Materiales y parámetros para la prueba preliminar 05.

Cantidades en porcentaje y masa de los constituyentes principales y materiales secundarios					
Masa de la moldura de fundición 100%	Matriz pistones Al-Si al 89%	Tensioactivo aro de rueda al 4%	Refuerzo SiC malla #400 al 7%	Escorificante, alu fundex extra al 0,5%	Desgasificante apartagas H7-50 al 0,25%
1707,87 g	1520 g	68,31 g	119,55 g	7,6 g	3,8 g
Temperaturas para el proceso de fundición de la matriz pistones AlSi12 y MC AlSi12-SiC					
Temperatura de fusión teórica AlSi12	571 °C [7]	Temperatura de colado AlSi12 recomendada	680-750 °C	Temperatura de colado AlSi12-SiC investigaciones	700-760 °C [37], [41], [80]
Parámetros en el proceso de stir casting					
tiempo de calentamiento horno-crisol-matriz	30 min	Temperatura ambiente	25 °C		
tiempo de fundición de la matriz	40 min	Temperatura de fusión de la matriz	700 °C		
SiC se mantiene calentado hasta después de escorificar y desgasificar la matriz			Temperatura de calentamiento SiC	450 °C	
tiempo de adición SiC con una rotación de las aspas sobre la matriz fundida de 500 rpm	4 min	Temperatura de la matriz al adicionar SiC	720 °C		
tiempo de agitación de la masa fundida matriz-SiC con una rotación de las aspas de 700 rpm	8 min	Temperatura de agitación de la masa fundida matriz-SiC	750 °C		
Se utilizó un crisol diamant de arcilla-grafito #18. Molde de arena para colado vertical. Agitador de 4 paletas planas de Ø90 × 55 × 7 mm con inclinación de 70°			Temperatura de colado composite	730 °C	

(Fuente: Elaboración propia)

En esta prueba se utilizó los elementos y materiales citados en el ítem 4.1. Fundida la matriz a 700 °C se añadió el aro de rueda, para dar paso al escorificado y desgasificado. Seguidamente el SiC, calentado en el plato de arcilla, fue adicionado a la matriz por medio de un embudo al iniciar la agitación de las aspas. Terminada la agitación de la masa fundida pistones-SiC se procedió a su colado. En el transcurso del proceso se tuvo algunas observaciones.

Al colar la masa matriz-refuerzo a 730 °C se observa que existe fluidez y colabilidad al ingresar por el embudo del molde.

Al disminuir el tiempo de adición del SiC y el tiempo de agitación de la masa fundida matriz-refuerzo, para lograr la dispersión del SiC en la matriz, se redujo el tiempo de exposición de la matriz al medio ambiente. Lo que involucra una menor absorción de gases, entre ellos el vapor de agua que conlleva a la formación de hidrógeno en la matriz fundida, y consecuentemente una reducción de la macroporosidad en los cuatro lingotes obtenidos. La Figura 4.14 muestra los lingotes de MC, además del corte y fractura transversal en la mitad del lingote 5D en el que se observa la disminución de macroporosidad en comparación a la prueba preliminar 04.

A partir del centro del lingote 5D se preparó una probeta cilíndrica para el ensayo metalográfico por MEB. El pulido de la probeta reveló a simple vista que en su superficie transversal existe macroporosidad. Mientras que en el ensayo se obtuvo la microestructura de la Figura 4.15 que muestra una pobre dispersión de partículas de SiC en la matriz, además de la existencia de microporosidad.



Figura 4.14. Lingotes de MC con corte y fractura del lingote 5D.  
(Fuente: Elaboración propia)

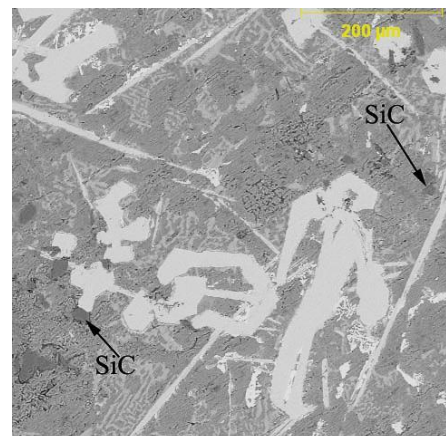


Figura 4.15. Microestructura por MEB a una probeta del lingote 5D.  
(Fuente: Elaboración propia)

#### 4.2.6. Prueba preliminar 06

En la Tabla 4.6 se muestran los materiales en porcentaje y masa. Además de los parámetros establecidos para la realización de la prueba preliminar 06.

Tabla 4.6. Materiales y parámetros para la prueba preliminar 06.

Cantidades en porcentaje y masa de los constituyentes principales y materiales secundarios					
Masa de la moldura de fundición 100%	Matriz pistones Al-Si al 91%	Tensioactivo aro de rueda al 4%	Refuerzo SiC malla #400 al 5%	Escorificante, alu fundex extra al 0,5%	Desgasificante apartagas H7-50 al 0,25%
1620 g	1474,2 g	64,8 g	81 g	7,37 g	3,69 g
Temperaturas para el proceso de fundición de la matriz pistones AlSi12 y MC AlSi12-SiC					
Temperatura de fusión teórica AlSi12	571 °C [7]	Temperatura de colado AlSi12 recomendada	680-750 °C	Temperatura de colado AlSi12-SiC investigaciones	700-760 °C [37], [41], [80]
Parámetros en el proceso de stir casting					
tiempo de calentamiento horno-crisol-matriz	20 min	Temperatura ambiente	25 °C		
tiempo de fundición de la matriz	40 min	Temperatura de fusión de la matriz	700 °C		
SiC se mantiene calentado hasta después de escorificar y desgasificar la matriz		Temperatura de calentamiento SiC	450 °C		
tiempo de adición SiC con una rotación de las aspas sobre la matriz fundida de 500 rpm	4 min	Temperatura de la matriz al adicionar SiC	720 °C		
tiempo de agitación de la masa fundida matriz-SiC con una rotación de las aspas de 700 rpm	8 min	Temperatura de agitación de la masa fundida matriz-SiC	800 °C		
Se utilizó un crisol diamant de arcilla-grafito #18. Molde de arena para colado horizontal. Agitador de 4 paletas planas de Ø90 × 50 × 7 mm con inclinación de 70°		Temperatura de colado composite	780 °C		

(Fuente: Elaboración propia)

En esta prueba se utilizó los elementos y materiales citados en el ítem 4.1. Fundida la matriz a 700 °C se añadió el aro de rueda, para dar paso al escorificado y desgasificado. Seguidamente el SiC, calentado en el plato de arcilla, fue adicionado a la matriz por medio de un embudo al iniciar la agitación de las aspas. Terminada la agitación de la masa fundida pistones-SiC se procedió a su colado. En el transcurso del proceso se tuvo algunas observaciones.

Al agitar y colar la masa fundida matriz-refuerzo a una temperatura de 800 °C y 780 °C respectivamente, se observa que tiene fluidez y colabilidad. Pero esta elevada temperatura trajo consigo una mayor absorción de hidrógeno en la matriz, teniendo como consecuencia macroporosidad interna de los lingotes. Además de un grano grueso tipo cristal y de apariencia frágil, que por lo investigado tiene características de haberse formado el intermetálico  $Al_4C_3$  producto de la reacción de la matriz Al-Si con el refuerzo SiC a 800 °C. Para evitar la macroporosidad, no es recomendable trabajar a altas temperaturas, y menos aún, si la atmosfera de la masa fundida matriz-refuerzo no está protegido con un gas inerte o gas nitrógeno, que evite el contacto del medio ambiente con la superficie de la masa fundida. En cambio, para evitar la posible formación de  $Al_4C_3$  se recomienda trabajar a temperaturas entre 700 °C a 750 °C, como se ha venido trabajando en algunas pruebas preliminares.

Utilizar por prologados tiempos un gas de protección como Ar o Ni, al momento de realizar la agitación de la masa fundida, incrementa el costo del MC, por lo que se tendrá que ver la forma de desgasificar el MC a un costo económico y sin que se pierda la dispersión del SiC. La desgasificación implica un tiempo en el cual la masa fundida matriz-refuerzo estará en reposo pudiendo existir una posible sedimentación de las partículas de SiC. Para evitar esto se tendrá que realizar la desgasificación en un corto tiempo y a la vez eliminar el hidrógeno disuelto.

La Figura 4.16 muestra los lingotes de MC, además del corte y fractura transversal en la parte superior del lingote 6B en el que se observa macroporosidad y un grano grueso tipo cristal y de apariencia frágil. A partir del centro del lingote 6A se preparó una probeta cilíndrica para el ensayo metalográfico por MEB. El pulido de la probeta reveló a simple vista que en su superficie transversal existe macroporosidad. Mientras que en el ensayo se obtuvo la microestructura de la Figura 4.17 que muestra el aglomeramiento de las partículas de SiC unas sobre otras, lo que ha originado microporosidades



Figura 4.16. Lingotes de MC con corte y fractura del lingote 6B.  
(Fuente: Elaboración propia)

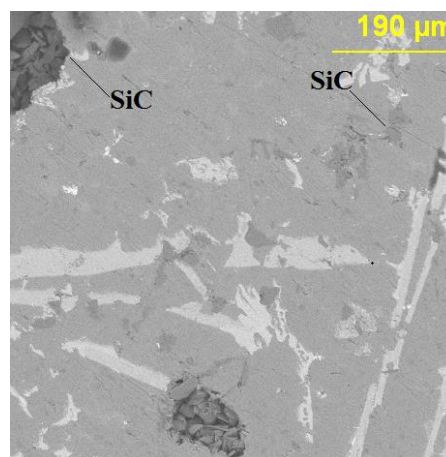


Figura 4.17. Microestructura por MEB a una muestra del lingote 6A.  
(Fuente: Elaboración propia)

En el transcurso de las pruebas preliminares se han utilizado campanas de hierro fundido, recubiertas con pintura refractaria INJEMAQ AL 397, para el manejo de la fundición. Las cuales han sufrido desprendimiento de esta pintura. Esto se debe al intenso calor en el escorificado y desgasificado de la fundición. Resultando laborioso volver a recubrir la superficie con la pintura. Para evitar esto, antes de cada fundición, se realizará la limpieza de las campanas, que consistirá en calentarlas en el horno de fundición y con un cepillo de acero retirar cualquier tipo de escoria o descarburación de su superficie.



#### 4.2.7. Prueba preliminar 07

En la Tabla 4.7 se muestran los materiales en porcentaje y masa. Además de los parámetros establecidos para la realización de la prueba preliminar 07.

Tabla 4.7. Materiales y parámetros para la prueba preliminar 07.

Cantidades en porcentaje y masa de los constituyentes principales y materiales secundarios					
Masa de la moldura de fundición 100%	Matriz pistones Al-Si al 93%	Tensioactivo polvo de Mg puro al 1%	Refuerzo SiC malla #400 al 6%	Escorificante, alu fundex extra al 0,5%	Desgasificante apartagas H7-50 al 0,25%
1290 g	1200 g	12,9 g	77,4 g	6 g	3 g
Temperaturas para el proceso de fundición de la matriz pistones AlSi12 y MC AlSi12-SiC					
Temperatura de fusión teórica AlSi12	571 °C [7]	Temperatura de colado AlSi12 recomendada	680-750 °C	Temperatura de colado AlSi12-SiC investigaciones	700-760 °C [37], [41], [80]
Parámetros en el proceso de stir casting					
tiempo de calentamiento horno-crisol-matriz	20 min	Temperatura ambiente	20 °C		
tiempo de fundición de la matriz	30 min	Temperatura de fusión de la matriz	710 °C		
SiC se mantiene calentado hasta después de escorificar y desgasificar la matriz		Temperatura de calentamiento SiC	700 °C		
tiempo de adición SiC con una rotación de las aspas sobre la matriz fundida de 500 rpm	4 min	Temperatura de la matriz al adicionar SiC	740 °C		
tiempo de agitación de la masa fundida matriz-SiC con una rotación de las aspas de 600 rpm	8 min	Temperatura de agitación de la masa fundida matriz-SiC	740 °C		
tiempo de desgasificado con lanza para apartagas H7-50	30 s	Temperatura de la masa fundida al iniciar la desgasificación	740 °C		
Se utilizó un crisol diamant de arcilla-grafito #18. Molde de arena para colado horizontal. Agitador de 4 paletas planas de Ø80 × 45 × 7 mm con inclinación de 70°		Temperatura de colado composite	720 °C		

(Fuente: Elaboración propia)

En esta prueba se utilizó los elementos y materiales citados en el ítem 4.1. Fundida la matriz a 710 °C se añadió polvo de magnesio puro, para dar paso al escorificado y desgasificado. Seguidamente el SiC, calentado en un horno eléctrico, fue adicionado a la matriz por medio de un embudo al iniciar la agitación de las aspas. Terminada la agitación de la masa fundida pistones-SiC se retiró las aspas para realizar nuevamente el desgasificado mediante la introducción de una lanza. Se retiró la lanza y se procedió al colado. En el transcurso del proceso se tuvo algunas observaciones.

Para mejorar el proceso de fabricación del MC se procedió a calentar el polvo de SiC en un horno de resistencia eléctrica, en reemplazo de la estructura de acero y el plato de arcilla. Debido a que en su interior se mantiene a una temperatura uniforme de 700 °C, además de protegerlo de la contaminación ambiental. Para introducir el SiC en el horno se utiliza dos recipientes de arcilla. Hasta sacar el SiC del horno y comenzar su adición por el embudo, se estima una pérdida de 100 °C. La Figura 4.18 muestra el horno de resistencia eléctrica con los recipientes utilizados para calentar el SiC.





Figura 4.18. Horno de resistencia eléctrica con los recipientes utilizados para calentar el SiC.  
(Fuente: Elaboración propia)

En el transcurso de las pruebas preliminares se añadió fragmentos de aros de ruedas para disolverlos en la matriz fundida antes de adicionar el SiC. Estos fueron tomados del chatarrero del laboratorio de fundición, y su estructura no fue determinada el contenido en porcentaje de Mg. Debido a que existían fragmentos grandes y aros completos que debían ser realizados los exámenes de composición química que identifiquen el porcentaje de este elemento, lo que hubiese resultado laborioso, y si el proyecto fuera privado implicaría costos adicionales. Por tal motivo solo se especuló que podrían tener cierto porcentaje de Mg. Teniéndose que agregar fragmentos de aros de ruedas en porcentajes del 2,5% al 4%, respecto al 100% del MC, para asegurar de alguna forma una cantidad cercana al 1% de Mg recomendada para mejorar la dispersión y mojabilidad matriz-refuerzo. En las anteriores pruebas preliminares no se utilizó polvo de Mg debido al alto costo que este representa, 30 USD los 50 gramos. Su ficha técnica se muestra en el Anexo A14. En esta prueba se utilizó polvo metálico de magnesio puro, Figura 4.19.



Figura 4.19. Polvo metálico de magnesio.  
(Fuente: Elaboración propia)

Para adicionar el polvo de Mg se procedió a esparcir 12,9 g sobre la superficie de la matriz, para que mediante la agitación con una cuchara se lograra su introducción y dispersión en la matriz fundida que estuvo a 710 °C. Pero lo que se consiguió es una reacción de oxidación, debido a que las partículas del polvo de Mg por su baja densidad no se sumergieron en la fundición exponiéndose al contacto directo del oxígeno del ambiente. Producto de esta oxidación se genera una pasta viscosa que se ubica encima de la capa de óxido de aluminio. Por tal motivo en la siguiente prueba se tratará de ver la forma de adicionar el polvo de Mg.

Para evitar la formación de  $Al_4C_3$  se trabajará durante el proceso de fabricación del MC a una temperatura máxima de 750 °C. Además, para resolver el problema de desgasificado de hidrógeno, se ha construido una lanza de acero sólido en forma de T con 4 orificios donde son insertados fragmentos de desgasificante apartagas, Figura 4.20. La lanza es introducida en la masa fundida al momento de finalizar de la dispersión del SiC e inmediatamente retirada una vez terminada el burbujeo. El tiempo que se emplea en sacar el crisol del horno y ubicarlo en el anillo porta crisol para colado, es suficiente para que el desgasificante acuñado en la lanza realice su acción sobre la masa fundida.



Figura 4.20. Lanza para el desgasificado del MC.  
(Fuente: Elaboración propia)

La Figura 4.21 muestra los lingotes de MC, además del corte y fractura transversal en la parte inferior del lingote 7B en el que no se observa macroporosidad. A partir de la zona superior del lingote 7A se preparó una probeta cilíndrica para el ensayo metalográfico por MEB. El pulido de la probeta reveló a simple vista que en su superficie transversal existe macroporosidad. Mientras que en el ensayo se obtuvo la microestructura de la Figura 4.22 que muestra la dispersión de las partículas de SiC en la matriz, además de la presencia de microporosidad en ciertas regiones de la microestructura.



Figura 4.21. Lingotes de MC con corte y fractura del lingote 7B.  
(Fuente: Elaboración propia)

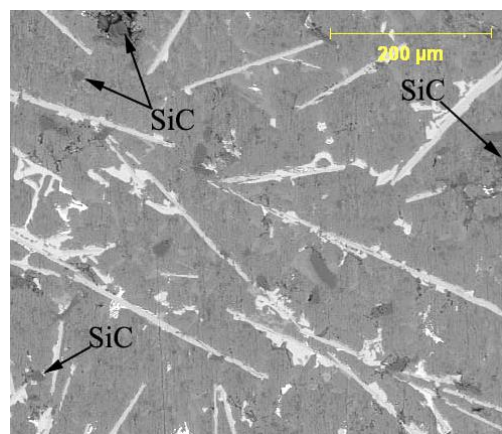


Figura 4.22. Microestructura por MEB a una probeta del lingote 7A.  
(Fuente: Elaboración propia)

#### 4.2.8. Prueba preliminar 08

El objetivo de esta prueba es para encontrar una alternativa viable y económica al momento de adicionar el polvo de Mg. Para su dispersión en la matriz fundida. Ya que en la anterior prueba se tuvo problemas de oxidación. Para esto en 1150 g de matriz fundida (pistones Al-Si) se va a tratar de adicionar 11,5 g de polvo de Mg.

Para tratar de adicionar el polvo de Mg este fue enrollado en papel aluminio. Con el propósito de formar una envoltura maciza que soporte la temperatura al ser sumergido al fondo de la matriz fundida, mediante una cuchareta de acero inoxidable. Una vez en el fondo, la envoltura de papel Al se funde por el calor de la matriz líquida, y se esperó que las partículas del polvo de Mg se disolvieran. Pero lo que ocurrió, es que gran cantidad flotó a la superficie, debido a su menor densidad y masa respecto a la matriz. Enseguida el polvo fue agitado mediante una cuchara para lograr su introducción y dispersión en la matriz, pero lo que se consiguió es oxidarlo más, debido a su exposición con el oxígeno ambiental. Esta reacción de oxidación se formó a la temperatura de la matriz, 710 °C, siendo observada claramente, ya que el polvo comienza a encenderse en presencia del oxígeno, quedando sobre la superficie de la matriz el óxido de magnesio (MgO) que tiene un aspecto viscoso y de color blanco plateado, como se muestra en la Figura 4.23. Para evitar la oxidación del polvo es adicionado bajo la protección de gas y dispersado mediante agitación mecánica, lo que aumenta el costo del MC. Sin embargo, se puede ingeniar otra técnica para disolver el Mg en la aleación fundida Al-Si, que resulte fácil y económica, antes de iniciar la dispersión del SiC.



Figura 4.23. Óxido de magnesio formado sobre la superficie de la matriz fundida.  
(Fuente: Elaboración propia)

Cuando el Mg es adicionado en una aleación de aluminio fundida sin protección, este elemento reacciona en presencia del oxígeno que se encuentra en la atmosfera del crisol, formando el producto MgO que se deposita por diferencia de densidad sobre la capa de  $Al_2O_3$  perteneciente a la oxidación del aluminio fundido. Por este motivo se observó en esta prueba la capa de MgO sobre la de  $Al_2O_3$ . Estos fenómenos pueden ser comprendidos en la investigación realizada por Paucar [83].

Las partículas del polvo de Mg son difíciles de introducir y dispersar en una aleación de Al. Ya que no se logran sumergirse por tres motivos. Primero, la capa de  $Al_2O_3$  que se forma en la superficie de la aleación fundida es una barrera que no es fácil de romper y penetrar por el peso del 1% de polvo de Mg que se adiciona en la fundición. Segundo, la tensión superficial de la aleación Al-Si es elevada, lo que dificulta la penetración de las partículas del polvo de Mg. Tercero, la densidad de cada partícula de polvo de Mg ( $1,7 \text{ g/cm}^3$ ) es menor a la fundición Al-Si ( $2,7 \text{ g/cm}^3$ ), originando que floten en la superficie de la fundición. Por estos motivos el polvo de Mg fue enrollado en papel aluminio, y sumergido al fondo de la fundición, mediante una cuchareta de acero inoxidable, lo cual no dio resultado originando los problemas mencionados al inicio de esta prueba.

#### **4.2.9. Prueba preliminar 09**

El objetivo de esta prueba es el de encontrar una alternativa viable y económica para adicionar Mg en una matriz fundida de aleación Al-Si, ya que en la anterior prueba se continua teniendo problemas de oxidación al utilizar polvo de Mg.

Experimentado el comportamiento del polvo de Mg, en las anteriores dos pruebas, se concluyó que más estabilidad para que se disuelva en una matriz fundida de Al-Si es que sea introducido cuando tiene forma de pedazo o fragmento sólido. Sin embargo, al tratar de sumergirlo presenta los problemas descritos en la prueba 08. Entonces se resolvió hacer lo siguiente. Se consiguió un aro de rueda de aleación Mg-Al, con una pureza de Mg del 93%. Posteriormente se cortó un pedazo de 12 g y una de sus puntas fue introducida a presión en el orificio de una campana de adición de Mg, la cual se la construyó a partir de la soldadura de una copa de acero inoxidable (dado) con una varilla de construcción, que sirve para la manipulación de la copa. Seguidamente la campana es sumergirla en el interior de la matriz fundida para que el Mg no pueda flotar hacia la superficie de la matriz, ya que esta introducido en la copa la cual por su peso se deposita en el fondo de la matriz. Además, el Mg fue envuelto en papel aluminio para evitar que su superficie reaccione con el oxígeno presente en la atmosfera del crisol, y no se forme inmediatamente MgO al momento de introducirlo en la matriz fundida. Una vez que el pedazo de Mg sólido está en el fondo de la matriz fundida de pistones a  $710 \text{ }^\circ\text{C}$ , su elevada temperatura comienza a extraer cada átomo de Mg y a disolverse en los 1200 g de matriz. El tiempo en que el pedazo de Mg es disuelto es aproximadamente de siete minutos. Posteriormente se toma de la varilla de construcción y se retira la campana. La tapa del horno fue colocada para evitar que el oxígeno del medio ambiente forme un proceso de oxidación con algunos átomos de Mg que llegan a la superficie de la matriz.

Sin embargo, siempre se formará una pequeña cantidad de MgO, producto del oxígeno remanente que estuvo alrededor del crisol.

La preparación de la cantidad en masa de un fragmento sólido de Mg, a partir de un aro de rueda de aleación Mg-Al, se describe y muestra en el proceso de fabricación de lingotes cilíndricos. La herramienta utilizada para la adición del pedazo de Mg en la matriz fundida se la llamará campana de adición de Mg.

Para conseguir un alto valor de pureza de Mg sólido se procedió a investigar que partes son producidas a partir de este elemento. Dando como resultado que aros de ruedas para automóviles, ánodos de baterías, pedernales de encendido, equipo deportivo ligero, arcos de tiro, son fabricados con porcentajes de más del 90% de Mg. De estas partes lo que más se tiene en el chatarrero del laboratorio de fundición son fragmentos y aros de ruedas para autos. Pero no es posible realizar a todos ellos un análisis de composición química de elementos para saber el porcentaje de Mg, porque resulta laborioso, y si el proyecto fuera privado implicaría costos adicionales, ya que varios aros pueden estar fabricados de una aleación de aluminio. Lo que se realizó para disminuir la incertidumbre de este problema fue aplicar la experiencia adquirida en anteriores pruebas de adición, en donde se sabía que el Mg se oxida fácilmente en presencia de oxígeno en un ambiente de alta temperatura. Con este conocimiento se seleccionó cinco aros de ruedas para extraer sus limallas y ponerlos en una placa de acero que fue calentada con la antorcha quemadora de GLP. Al llegar 600 °C en un minuto, se observó como las limallas del último aro se encendían con la presencia del oxígeno ambiental, dando como producto un polvo blanco plateado que se asumió que era óxido de magnesio. Con lo que se podría tener la certeza que este aro contenga elemento base Mg. Siendo comprobado mediante un análisis de MEB en el Departamento de Metalurgia Extractiva de la EPN que su porcentaje estructural es del 93%Mg y 7%Al, tratándose de una aleación Mg-Al. En la Figura 4.24 se muestra el aro de aleación Mg-Al utilizado para posteriores pruebas y fundiciones. En cambio, en el Anexo A15 los resultados de la MEB.



Figura 4.24. Aro de rueda de aleación Mg-Al (93%Mg-7%Al).  
(Fuente: Elaboración propia)

#### 4.2.10. Prueba preliminar 10

En la Tabla 4.8 se muestran los materiales en porcentaje y masa. Además de los parámetros establecidos para la realización de la prueba preliminar 10.

Tabla 4.8. Materiales y parámetros para la prueba preliminar 10.

Cantidades en porcentaje y masa de los constituyentes principales y materiales secundarios						
Masa de la moldura de fundición 100%	Matriz pistones Al-Si al 94%	Tensioactivo aro de rueda de Mg al 1% + 6 g perdidas	Refuerzo SiC malla #400 al 5%	Escorificante alu fundex extra al 0,5%	Desgasificante apartagas H7-50 al 0,25%	Afinador de grano Al5TiB al 0,2%
1200 g	1128 g	18 g	60 g	5,64 g	2,82 gr	2,256 g
Temperaturas para el proceso de fundición de la matriz pistones AlSi12 y MC AlSi12-SiC						
Temperatura de fusión teórica AlSi12	571 °C [7]	Temperatura de colado AlSi12 recomendada	680-750 °C	Temperatura de colado AlSi12-SiC investigaciones	700-760 °C [37], [41], [80]	
Parámetros en el proceso de stir casting						
tiempo de calentamiento horno-crisol-matriz	20 min	Temperatura ambiente	20 °C			
tiempo de fundición de la matriz	30 min	Temperatura de fusión de la matriz	710 °C			
tiempo de adición de Mg después de fundir la matriz	7 min	Temperatura de adición Mg	710 °C			
tiempo de adición Al5TiB después de adicionar Mg	7 min	Temperatura de adición Al5TiB	710 °C			
SiC se mantiene calentado hasta después de escorificar y desgasificar la matriz		Temperatura de calentamiento SiC	700 °C			
tiempo de adición SiC con una rotación de las aspas sobre la matriz fundida de 600 rpm	4 min	Temperatura de la matriz al adicionar SiC	740 °C			
tiempo de agitación de la masa fundida matriz-SiC con una rotación de las aspas de 900 rpm	7 min	Temperatura de agitación de la masa fundida matriz-SiC	760 °C			
tiempo de desgasificado con lanza para apartagas H7-50	30 s	Temperatura de la masa fundida al iniciar la desgasificación	760 °C			
Se utilizó un crisol diamant de arcilla-grafito #18. Molde de arena para colado horizontal. Agitador de 4 paletas planas de Ø80 × 45 × 7 mm con inclinación de 70°		Temperatura de colado composite	750 °C			

(Fuente: Elaboración propia)

En esta prueba se utilizó los elementos y materiales citados en el ítem 4.1. Fundida la matriz a 710 °C se añadió un pedazo de aro de rueda de Mg y afinador de grano para dar paso al escorificado y desgasificado. Seguidamente el SiC, calentado en horno eléctrico, fue adicionado a la matriz por medio de un embudo al iniciar la agitación de las aspas. Terminada la agitación de la masa fundida pistones-SiC se retiró las aspas para nuevamente desgasificar mediante la introducción de una lanza. Se retiró la lanza y se procedió al colado. En el transcurso del proceso se tuvo algunas observaciones.

En la desgasificación del MC, antes de realizar su colado, se observa que al introducir la lanza de acero, en la cual se ha colocado fragmentos de desgasificante apartagas, inicia un burbujeo. El tiempo para realizar el desgasificado es aproximadamente de 30 segundos, a partir de que se retira las aspas del agitador hasta sacar el crisol del horno

para ubicarlo en el anillo de colado, ya que una vez ahí se retira la lanza. Este segundo desgasificado tiene que ser rápido, ya que la masa fundida matriz-refuerzo permanece estática lo que podría desfavorece la dispersión de las partículas del SiC.

La Figura 4.25 muestra los lingotes de MC, además del corte transversal en la parte superior del lingote 10A, en el cual se observa macroporosidad. También en la parte central del mismo lingote se realizó una fractura, en donde se nota que la superficie transversal del material se desmorona en forma de granos debido a la macroporosidad.



Figura 4.25. Lingotes de MC con corte transversal y una fractura en el lingote 10A.  
(Fuente: Elaboración propia)

La macroporosidad en la matriz del MC se debe a un fenómeno de erosión del crisol arcilla-grafico. El cual se produce por la fuerte agitación de la masa fundida matriz-SiC contra las paredes del crisol, causando el desprendimiento de partículas del crisol que han sido introducidas en la masa fundida. Estas partículas desprendidas de las paredes del crisol, una vez introducidas en la masa fundida del MC, actúan como inclusiones al momento de la solidificación del material lo que generó un defecto metalúrgico de macroporosidad en la superficie del composite. Para evitar erosión y desmoronamientos en las paredes del crisol, se debe tomar en cuenta las rpm a la cual es agitada la masa fundida matriz-SiC, o a su vez desechar el crisol cuando ya exista inicios de erosión.

#### 4.2.11. Prueba preliminar 11

En esta prueba se utilizó la matriz 365.0 para ver su comportamiento durante el proceso de fabricación del MC. En la Tabla 4.9 se muestran los materiales en porcentaje y masa. Además de los parámetros establecidos para la realización de la prueba preliminar 11.



Tabla 4.9. Materiales y parámetros para la prueba preliminar 11.

Cantidades en porcentaje y masa de los constituyentes principales y materiales secundarios						
Masa de la moldura de fundición 100%	Matriz 365.0 al 94,3%	Tensioactivo aro de rueda de Mg al 0,7% + 6 g perdidas	Refuerzo SiC malla #400 al 5%	Escorificante alu fundex extra al 0,5% + 10%	Desgasificante apartagas H7-50 al 0,25% + 10%	Afinador de grano Al5TiB al 0,2%
1650 g	1555,95 g	17,55 g	82,5 g	8,558 g	4,279 g	3,112 g
Temperaturas para el proceso de fundición de la matriz Al-Si 365.0 y MC 365.0/SiC/5p						
Temperatura de fusión teórica 365.0	590 °C [67]	Temperatura de colado AlSi12 recomendada	680-750 °C	Temperatura de colado AlSi12-SiC investigaciones	700-760 °C [37], [41], [80]	
Parámetros en el proceso de stir casting						
tiempo de calentamiento horno-crisol-matriz			20 min	Temperatura ambiente		20 °C
tiempo de fundición de la matriz			30 min	Temperatura de fusión de la matriz		710 °C
tiempo de adición de Mg después de fundir la matriz			7 min	Temperatura de adición Mg		710 °C
tiempo de adición Al5TiB después de adicionar Mg			7 min	Temperatura de adición Al5TiB		710 °C
SiC se mantiene calentado hasta después de escorificar y desgasificar la matriz					Temperatura de calentamiento SiC	600 °C
tiempo de adición SiC con una rotación de las aspas sobre la matriz fundida de 500 rpm			4 min	Temperatura de la matriz al adicionar SiC		740 °C
tiempo de agitación de la masa fundida matriz-SiC con una rotación de las aspas de 700 rpm			6 min	Temperatura de agitación de la masa fundida matriz-SiC		740 °C
tiempo de desgasificado con lanza para apartagas H7-50			30 s	Temperatura de la masa fundida al iniciar la desgasificación		740 °C
Se utilizó un crisol diamant de arcilla-grafito #18. Molde de arena aglomerada para colado vertical. Agitador de 4 paletas planas de Ø80 × 45 × 7 mm con inclinación de 70°					Temperatura de colado composite	730 °C

(Fuente: Elaboración propia)

En esta prueba se utilizó los elementos y materiales citados en el ítem 4.1. Fundida la matriz a 710 °C se añadió un pedazo de aro de rueda de Mg y afinador de grano para dar paso al escorificado y desgasificado. Seguidamente el SiC, calentado en un horno eléctrico, fue adicionado a la matriz por medio de un embudo al iniciar la agitación de las aspas. Terminada la agitación de la masa fundida pistones-SiC se retiró las aspas para nuevamente desgasificar mediante la introducción de una lanza. Se retiró la lanza y se procedió al colado. En el transcurso del proceso se tuvo algunas observaciones.

En esta práctica se utilizó un molde de arena aglomerada con resina orgánica autofraguante. Este tipo de molde se empleará en las fundiciones para la fabricación de los lingotes de MCM 365.0 reforzada con partículas de SiC malla #400.

Al momento de colar el MC se observó que se va perdiendo fluidez, debido al descenso de temperatura, lo que originó viscosidad al final del colado. Esto se debe a los procesos de transferencia de calor por conducción en las paredes del crisol, por convección y radiación en la masa fundida. También es debido a la viscosidad propia de la fundición producto de la adición del SiC en la matriz. Por estos factores el colado debe realizarse rápidamente una vez sea retirado el crisol del horno.



La Figura 4.26 muestra el molde de arena aglomerada con resina orgánica autofraguante utilizado para el colad. Además de los lingotes de MC 365.0/SiC/5p solidificados.



Figura 4.26. Molde de arena aglomerada y lingotes de MC 365.0/SiC/5p.  
(Fuente: Elaboración propia)

Durante las pruebas preliminares no se ha protegido el proceso de agitación de la matriz fundida con la tapa del stir casting, lo que trajo consigo la formación de óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Esto se debe a la reacción del aluminio, contenido en la matriz fundida, con el vapor de agua y el oxígeno del medio ambiente. Esta oxidación del aluminio produce una capa viscosa que se ubica sobre la superficie de la masa fundida matriz-refuerzo, generando pérdidas de Al en la matriz Al-Si, ya que es parte del residuo sólido que se deposita al fondo del crisol después de colar la masa fundida.

Para compensar estas pérdidas, cuando se trabaja sin la tapa del stir casting, se debe aumentar un pedazo de aluminio al momento de fundir la matriz, tomando en cuenta que el residuo sólido que se deposita en el fondo del crisol, después de colar cantidades entre 1200 a 2285,75 g de masa fundida matriz-refuerzo, pesa en promedio 140 g. De estos 140 g aproximadamente 90 g son de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  el cual por medio de un balance en la ecuación de reacción química del aluminio con el vapor de agua y oxígeno, requieren de 47,65 gr de aluminio que corresponde a las perdidas. Por lo tanto, el pedazo de aluminio que se debe aumentar, siempre y cuando no se trabaje sin ninguna protección al momento del proceso de agitación será alrededor de 47,65 g.

De la mitad del lingote central se preparó una probeta cilíndrica para el ensayo metalográfico por MEB. El pulido de la probeta reveló a simple vista que existe cierta macroporosidad aún desgasificando el MC con la lanza, esto se debe a que las burbujas que genera el desgasificante, las cuales atrapan el hidrógeno, no pueden escapar con facilidad hacia la atmosfera, debido a que en la superficie de la masa fundida se forma la capa viscosa de óxido de aluminio que dificulta este proceso. Mientras que en el ensayo se obtuvo la microestructura de la Figura 4.27 que muestra las zonas de aglomeración del SiC y otras donde están dispersas.

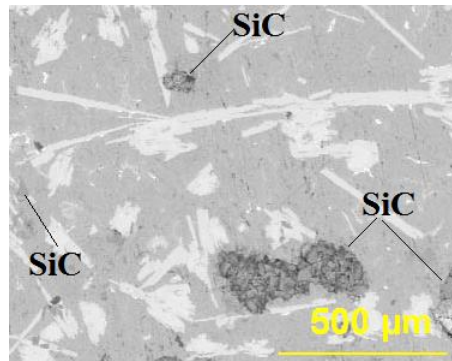


Figura 4.27. Microestructura por MEB a una muestra del lingote central.  
(Fuente: Elaboración propia)

Cuando finalizó el vaciado del MC 365.0/SiC/5p se depositó en el fondo del crisol la escoria en forma de masa viscosa, que después solidificó y tomó la morfología de un residuo sólido de 170 g. A este residuo se le extrajo 1 g de limallas para realizar una difracción de rayos x en el Departamento de Metalurgia Extractiva de la EPN. El resultado dio aluminio y silicio propios de la matriz 365.0, además del constituyente SiC utilizado para reforzar la matriz, los compuestos como  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{SiO}_2$  pertenecen al material que está conformado el crisol, sin embargo el  $\text{Al}_2\text{O}_3$  también es producto de la agitación de la matriz fundida. Otros compuestos que conforman el residuo sólido pueden pertenecer al crisol, o formarse por una reacción a alta temperatura con los elementos que están involucrados en el proceso. También pueden ser partículas de arena o impurezas que vuelan en el medio ambiente y caen en la masa fundida, o en las limallas al ser preparada para la difracción de rayos x. Dependiendo del proceso de fabricación del MC se evitará la presencia de inclusiones como partículas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{SiO}_2$  pertenecientes al material que está conformado el crisol. En la Figura 4.28 se muestra el residuo sólido de MC 365.0/SiC/5p que sobra en el crisol, además de las limallas obtenidas del residuo para su análisis de difracción de rayos x el cual es presentado en el Anexo A16.



Figura 4.28. Residuo sólido del MC 365.0/SiC/5p y limallas obtenidas.  
(Fuente: Elaboración propia)

En el transcurso de las pruebas preliminares la medición de la temperatura se lo ha venido realizando con un multímetro marca DT9208A con termocupla tipo K. Pero en esta prueba la medición fue realizada con un controlador de temperatura digital con

termocupla tipo K probeta, el mismo que será utilizado para las siguientes pruebas preliminares y las fundiciones donde se fabricará el MC 365.0/SiC/%p.

#### 4.2.12. Prueba preliminar 12

En la Tabla 4.10 se muestran los materiales en porcentaje y masa. Además de los parámetros establecidos para la realización de la prueba preliminar 12.

Tabla 4.10. Materiales y parámetros para la prueba preliminar 12.

Cantidades en porcentaje y masa de los constituyentes principales y materiales secundarios						
Masa de la moldura de fundición 100%	Matriz pistones Al-Si al 91,5% + 20 g de Al por oxidación	Tensioactivo aro de rueda de Mg al 1% + 2 g pérdidas	Refuerzo SiC malla #400 al 7,5% + 3 g pérdidas	Escorificante alu fundex extra al 0,5% + 7%	Desgasificante apartagas H7-50 al 0,25% + 7%	Afinador de grano Al5TiB al 0,2% + 0,5 g oxidación
1690 g	1566,35 g	18,9 g	129,75 g	8,38 g	4,19 g	3,633 g
Temperaturas para el proceso de fundición de la matriz pistones AlSi12 y MC AlSi12-SiC						
Temperatura de fusión teórica AlSi12	571 °C [7]	Temperatura de colado AlSi12 recomendada	680-750 °C	Temperatura de colado AlSi12-SiC investigaciones	700-760 °C [37], [41], [80]	
Parámetros en el proceso de stir casting						
tiempo de calentamiento horno-crisol-matriz	20 min	Temperatura ambiente			19 °C	
tiempo de fundición de la matriz	30 min	Temperatura de fusión de la matriz			710 °C	
tiempo de adición de Mg después de fundir la matriz	7 min	Temperatura de adición Mg			710 °C	
tiempo de adición Al5TiB después de adicionar Mg	7 min	Temperatura de adición Al5TiB			710 °C	
SiC se mantiene calentado hasta después de escorificar y desgasificar la matriz		Temperatura de calentamiento SiC			400 °C	
tiempo de adición SiC con una rotación de las aspas sobre la matriz fundida de 500 rpm	3 min	Temperatura de la matriz al adicionar SiC			730 °C	
tiempo de agitación de la masa fundida matriz-SiC con una rotación de las aspas de 700 rpm	3 min	Temperatura de agitación de la masa fundida matriz-SiC			730 °C	
tiempo de desgasificado con lanza para apartagas H7-50	30 s	Temperatura de la masa fundida al iniciar la desgasificación			730 °C	
Se utilizó un crisol diamant arcilla-grafito #18. Se reutilizó el molde de arena aglomerada utilizado en la prueba 11. Agitador de 4 paletas planas de Ø80 × 45 × 7 mm con inclinación de 70°		Temperatura de colado composite			720 °C	

(Fuente: Elaboración propia)

En esta prueba se utilizó los elementos y materiales citados en el ítem 4.1. Fundida la matriz a 710 °C se añadió un pedazo de aro de rueda de Mg y afinador de grano para dar paso al escorificado y desgasificado. Seguidamente el SiC, calentado en un horno eléctrico, fue colocado en la tapa del crisol para su adición por medio de un orificio mientras iniciaba la agitación de las aspas. Terminada la agitación de la masa fundida pistones-SiC se retiró las aspas para nuevamente realizar la desgasificación mediante la introducción de una lanza. Se retiró la lanza y se procedió al colado. En el transcurso del proceso se tuvo algunas observaciones.

Como la atmosfera que rodea al crisol puede resultar oxidante para la superficie de la masa fundida matriz-refuerzo, debido a la combustión del horno y al medio ambiente del laboratorio, se ha construido un disco circular de acero, que servirá como tapa del crisol.

En el disco se ha realizado tres orificios, uno para el libre giro del eje de las aspas, otro para insertar la termocupla, y el último para soldar un tubo por donde será adicionado el SiC. Además, se ha realizado un recinto, conformado por dos perfiles que han sido soldados en el disco circular, para colocar el SiC que es adicionado en la matriz fundida. Con la construcción de esta tapa se pretende mejorar en cada práctica la dispersión del polvo particulado de SiC. En la Figura 4.29 se muestra la tapa de acero del crisol.



Figura 4.29. Tapa de acero del crisol.  
(Fuente: Elaboración propia)

En la Figura 4.30 se muestra como el polvo de SiC, que ha sido colocado en la tapa del crisol, es adicionado por uno de sus orificios para lograr su dispersión en la matriz fundida, mediante la agitación de las aspas del equipo stir casting. Además, existe otro orificio donde ha sido introducida la termocupla para controlar la temperatura del proceso.



Figura 4.30. Polvo de SiC colocado en la tapa del crisol para adicionarlo a la matriz fundida.  
(Fuente: Elaboración propia)

Para mejorar la dispersión del SiC y el proceso de fabricación del MC, se rediseño la forma de la lanza de desgasificado de hidrógeno, construida en la prueba preliminar 07, por la mostrada en la Figura 4.31. Este rediseño se realizó para que exista la menor pérdida de temperatura de la masa fundida matriz-refuerzo al momento de introducir la lanza que está a temperatura ambiente, que en comparación con la lanza de la prueba preliminar 07, la nueva lanza tiene una menor masa y un rediseño que mejora el desgasificado. En su parte inferior es introducido en forma de cuña el desgasificante apartagas H7-50.



Figura 4.31. Lanza de desgasificado rediseñada.  
(Fuente: Elaboración propia)

La Figura 4.32 muestra los lingotes de MC, además del corte y fractura transversal en la parte inferior del lingote 12C, en el cual no se observa macroporosidad. A partir de la zona inferior del lingote 12B se preparó una probeta cilíndrica para el ensayo metalográfico por MEB. El pulido de la probeta reveló a simple vista que en su superficie existe ligera macroporosidad. Mientras que en el ensayo se obtuvo la microestructura de la Figura 4.33 que muestra la dispersión de las partículas de SiC.



Figura 4.32. Lingotes de MC con corte y fractura del lingote 12C.  
(Fuente: Elaboración propia)

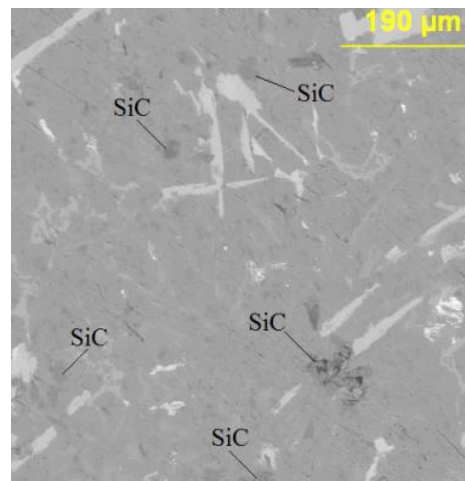


Figura 4.33. Microestructura por MEB a una muestra del lingote 12B.  
(Fuente: Elaboración propia)

A pesar de haber tapado directamente el crisol con un disco circular de acero, se tiene una ligera formación de  $Al_2O_3$ , por lo mencionado en la prueba preliminar 11. Sin embargo, este óxido, formado al momento de la agitación de la masa fundida matriz-refuerzo, es menor en relación a trabajar sin tapa en el crisol. Esto se debe a que todavía hay pequeños espacios por donde la fundición se ve expuesta a la atmosfera exterior del crisol. Para compensar esta pequeña pérdida se puede aumentar un pedazo de 20 g de Al o disminuir las rpm de las aspas para que la agitación sea lo menos fuerte posible.

#### 4.2.13. Prueba preliminar 13

En esta prueba se utilizó la matriz 365.0 para ver su comportamiento durante el proceso de fabricación del MC. En la Tabla 4.11 se muestran los materiales en porcentaje y masa. Además de los parámetros establecidos para la realización de la prueba preliminar 13.

Tabla 4.11. Materiales y parámetros para la prueba preliminar 13.

Cantidades en porcentaje y masa de los constituyentes principales y materiales secundarios.						
Masa de la moldura de fundición 100%	Matriz 365.0 al 93%	Tensioactivo aro de rueda de Mg al 1% + 2 g pérdidas	Refuerzo SiC malla #400 al 6% + 3 g pérdidas	Escorificante alu fundex extra al 0,5% primera y segunda carga	Desgasificante apartagas H7-50 al 0,25% + 7%	afinador de grano Al5TiB al 0,2% + 0,5 g oxidación
1690 g	1571,7 g	18,9 g	104,4 g	7,859 g	4,204 g	3,643 g
Temperaturas para el proceso de fundición de la matriz 365.0 y MC 365.0/SiC/6p						
Temperatura de fusión teórica 365.0	590 °C [67]	Temperatura de colado AlSi12 recomendada	680-750 °C	Temperatura de colado AlSi12-SiC investigaciones	700-760 °C [37], [41], [80]	
Parámetros en el proceso de stir casting						
tiempo de calentamiento horno-crisol-matriz	10 min		Temperatura ambiente		18 °C	
tiempo de fundición de la matriz	35 min		Temperatura de fusión de la matriz		710 °C	
tiempo de adición de Mg después de fundir la matriz	7 min		Temperatura de adición Mg		710 °C	
tiempo de adición Al5TiB después de adicionar Mg	7 min		Temperatura de adición Al5TiB		710 °C	
SiC se mantiene calentado hasta después de escorificar y desgasificar la matriz.			Temperatura de calentamiento SiC		400 °C	
tiempo de adición SiC con una rotación de las aspas sobre la matriz fundida de 500 rpm	3 min		Temperatura de la matriz al adicionar SiC		720 °C	
tiempo de agitación de la masa fundida matriz-SiC con una rotación de las aspas de 600 rpm	3 min		Temperatura de agitación de la masa fundida matriz-SiC		720 °C	
tiempo de desgasificado con campana de argón	35 s		Temperatura de la masa fundida al iniciar la desgasificación con argón		720 °C	
Se utilizó un crisol de acero Ø101 × 190 × 13mm. Molde de arena aglomerada. Agitador de 4 paletas planas de Ø60 × 30 × 5 mm con inclinación de 70°			Temperatura de colado composite		700 °C	

(Fuente: Elaboración propia)

En esta prueba se utilizó los elementos y materiales citados en el ítem 4.1. Al introducir los pistones en el interior del crisol se espolvorea sobre ellos la primera carga de escorificante alufundex extra. Fundida la matriz a 710 °C se añadió un pedazo de aro de rueda de Mg y afinador de grano para dar paso al escorificado (segunda carga) y desgasificado. Seguidamente el SiC, calentado en un horno eléctrico, fue adicionado a la matriz por medio del embudo de la tapa del crisol, al iniciar la agitación de las aspas. Terminada la agitación de la masa fundida matriz-SiC se retiró las aspas para nuevamente realizar la desgasificación mediante la introducción de una campana de desgasificado por argón. Se retiró la lanza y se procedió al colado. En el transcurso del proceso se tuvo algunas observaciones.

En el proceso de fabricación por stir casting, que se ha venido realizando en las pruebas preliminares, ha existido erosión en los crisoles cerámicos que se han empleado, a causa de la agitación de la matriz fundida, y más aún, si se adiciona un polvo cerámico de SiC, Este SiC actúa como partículas abrasivas que chocan contra las paredes del crisol y ocasionan desprendimiento de material particulado, el cual es arrastrado e introducido en la masa fundida matriz-refuerzo, siendo perjudicial en las propiedades metalúrgicas del MC solidificado. Por lo general los crisoles utilizados en la industria de la fundición del

país son de grafito y arcilla-grafito, los cuales si se revisa su respectiva ficha técnica mencionan características como resistencia a la abrasión en fundiciones estáticas, excelente conductividad térmica, tipo de metal que se debe fundir, etc. Pero no indican la posibilidad de ser utilizados en procesos de agitación con partículas cerámicas.

Para minimizar los efectos originados por el desprendimiento de las partículas del crisol, se ha construido un crisol metálico. Esto se lo ha realizado a partir de un tubo de acero sin costuras ASTM A106 para servicio a alta temperatura, aplicado en la industria petrolera. En el tubo se ha soldado una placa circular de acero AISI 4337 que sirve como base del crisol. Además, para mejorar el proceso de fabricación del MC se ha mejorado la tapa del crisol. Las ventajas de utilizar un crisol de acero en comparación al de grafito-arcilla empleado en este proyecto de investigación, es la estabilidad que brinda a la temperatura de la matriz cuando está en forma líquida (estabilidad en el gradiente de temperatura), más aún, al utilizar un horno de fundición a gas, además de no ser higroscópico. La Figura 4.34 muestra el crisol de acero, además de su tapa la cual posee un embudo para la adición del SiC, un orificio central para el libre giro del eje de las aspas, un orificio para fijar una termocupla, y otro para insertar la termocupla tipo pipeta.



Figura 4.34. Crisol de acero con su tapa.  
(Fuente: Elaboración propia)

Con el propósito de eliminar el gas hidrógeno disuelto en la matriz líquida de aleación Al-Si, además de mejorar el proceso de fabricación del MC, se desgasificó la masa fundida matriz-refuerzo con gas argón (Ar). Esto se realizó antes de ser colada en el molde de arena. Para este propósito se ha construido una campana de desgasificado.

La construcción consta de un tapón macho de  $\frac{1}{2}$ " y un tapón hembra de  $\frac{1}{2}$ " de hierro, que han sido ensamblados para formar la campana, a la cual se le ha realizado 18 orificios de diámetro  $\frac{5}{64}$ " (1,98 mm) para formar las burbujas de gas Ar. En uno de los extremos de la campana se ha realizado un orificio para soldar un tubo de acero de 8 mm de diámetro, el tubo a su vez se acopla a una manguera que sirve para la conexión del regulador de alta presión que indica tanto la presión de salida en el tanque y el caudal de trabajo.



Para realizar el insuflado de gas argón, una vez terminada la agitación y retirada las aspas, se introduce la campana en el fondo de la masa fundida matriz-refuerzo, seguidamente se abre el regulador de caudal a 2,5 LPM para dar inicio al insuflado de gas argón por los orificios de la campana por un tiempo de 35 segundos

Para determinar el número de orificios en la campana, se realizó en primera instancia 16 orificios, posteriormente se la introdujo en la masa fundida y se insufló gas argón a un caudal de 5LPM, observándose que el burbujeo en la fundición es fuerte y en poca cantidad. Posteriormente se realizó 18 orificios y el gas argón se insufló a 2,5 LPM, observándose que el burbujeo es uniforme y en una cantidad adecuada. La determinación el diámetro de los orificios y el caudal de gas argón insuflado, se tomó de los conceptos mencionados por Totten *et al.* [4] y Berg [84]. La Figura 4.35 muestra la campana de argón construida con su regulador de alta presión y conectado su tanque.



Figura 4.35. Campana de argón construida con conexión a su tanque.  
(Fuente: Elaboración propia)

Con el desgasificado de la masa fundida matriz-refuerzo al final del proceso de fundición, mediante el insuflado con gas argón, por un tiempo de 35 segundos, se consigue la eliminación de gas hidrógeno a un costo económico, gracias a la eficaz construcción de la campana que desgasifica la matriz en tan corto tiempo, y con una cantidad de argón mínima. Además de no afectar la dispersión del refuerzo en la matriz fundida.

La Figura 4.36 muestra los lingotes de MC, además del corte y fractura transversal en la parte inferior del lingote 13A, en el cual no se observa macroporosidad, y su grano visualmente se aprecia fino. A partir de la zona inferior del mismo lingote se preparó una probeta cilíndrica para el ensayo metalográfico por MEB. El pulido de la probeta reveló a simple vista que en su superficie transversal es casi nula la macroporosidad. En cambio, en el ensayo se obtuvo la microestructura de la Figura 4.37 que muestra la dispersión de las partículas de SiC en la matriz, además de la presencia de microporosidad en ciertos puntos, que en comparación a anteriores pruebas se ha eliminado casi en su totalidad.





Figura 4.36. Lingotes de MC con corte y fractura del lingote 13A.  
(Fuente: Elaboración propia)

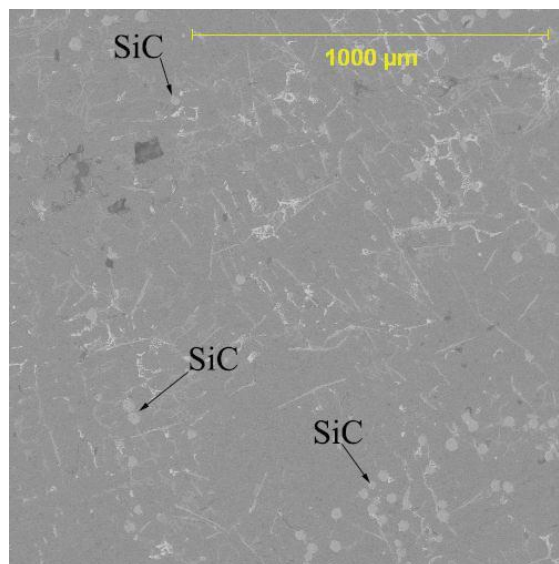


Figura 4.37. Microestructura por MEB a una muestra del lingote 13A.  
(Fuente: Elaboración propia)

En el transcurso de las pruebas preliminares se han tenido pérdidas tanto de los constituyentes principales como de los materiales secundarios, esto hizo que en cada uno de ellos se agregue una cantidad en masa, para que el MC tenga los constituyentes en los porcentajes correctos, además de mejorar su calidad por medio de los materiales secundarios. Estas cantidades han sido ajustadas de acuerdo a la experiencia que se ha venido palpando en cada prueba, y tomadas en cuenta en sus respectivas tablas.

Finalizada la prueba preliminar 13, se ha establecido un proceso de fabricación de lingotes cilíndricos de MCM 365.0 reforzada con partículas de SiC malla #400 vía stir casting, el cual se fundamentó con el apoyo del Capítulo 1, Capítulo 2, Capítulo 3 y las pruebas preliminares de este capítulo.

#### 4.2.14. Observaciones

Entre menor sean los tiempos de adición del SiC y de agitación de la masa fundida matriz-refuerzo, menor será la absorción de hidrógeno. Además, se debe tener en cuenta que la adición no debe ser de manera acumulada o en forma de grumos, ya que causa problemas de aglomeración de las partículas originando porosidades en el MC.

En el transcurso de las pruebas preliminares se ha venido utilizando los elementos y materiales descritos en el ítem 4.1. Además de introducir otros para mejorar la calidad del MC. También se ha innovado ciertos procedimientos para obtener un MC asequible en el sector industrial del país, con el objetivo de establecer un proceso de fabricación de

lingotes cilíndricos de MCM 365.0 reforzada con partículas de SiC malla #400 vía stir casting, que será detallada más adelante. La construcción de las partes y elementos finales del stir casting fueron descritos con mayor detalle en el ítem 3.6.5.

La adición del SiC en porcentajes del 7,5 al 8,5% genera un efecto de viscosidad en la matriz fundida 365.0. Además, su adición en la matriz fundida se vuelve difícil. La adición en estos porcentajes produce mayor proceso de erosión en las paredes del crisol, tendencia al aglomeramiento de las partículas de SiC que son causantes de porosidad, y el material puede tornarse más frágil. Por estos motivos los porcentajes de adición de SiC deben ser controlados si se desea tener un MC que siga manteniendo su ductilidad.

Realizadas las pruebas preliminares se ha establecido que el porcentaje de adición del refuerzo en la matriz fundida Al-Si 365.0, para el proceso de fabricación de lingotes cilíndricos de MC, será al 2%, 4%, y 6% de SiC malla #400, ya que al 6% se ha obtenido una mejor dispersión del SiC en la matriz.

Para las fundiciones donde se obtendrán lingotes de MCM Al-Si 365.0 reforzada al 2%, 4%, y 6% de SiC malla #400, utilizando el proceso de fabricación desarrollado en las pruebas preliminares, se empleará un nuevo crisol de acero tipo ensamble, diseñado y construido en el ítem 3.6.5.10.

### **4.3. Codificación para lingotes cilíndricos y probetas**

Para la gestión de los ensayos de tracción, dureza, metalográficos mediante microscopía óptica, se ha realizado la codificación para cada una de las probetas que serán obtenidas de su respectivo lingote fabricado, con el propósito de manipular fácilmente la información de cada ensayo realizado. La codificación tanto de los lingotes que serán fabricados como de las probetas, se apoyan en la norma ANSI indicada en el ítem 2.4.5. Mediante esta se ha asignado la serie 365.0 a la matriz, y la codificación 365.0/SiC/2p, 365.0/SiC/4p y 365.0/SiC/6p, para los composites que serán reforzados al 2%, 4% y 6% de SiC malla #400 respectivamente.

En la Tabla 4.12 se muestra una hoja de ruta para la codificación de lingotes y probetas, la cual indica que en cada número de fundición se obtienen 3 lingotes, fabricándose un total de 12, ya que son 4 fundiciones a realizarse. A cada lingote se le asignará su respectiva codificación. A partir de cada lingote se obtendrán las correspondientes probetas que tendrán su respectiva codificación según el ensayo a realizarse.

Tabla 4.12. Hoja de ruta para la codificación de lingotes y probetas para los respectivos ensayos.

Codificación para lingotes			Codificación para probetas		
N° de fundición	N° de lingote	Lingote fabricado (L)	Ensayos de tracción (ET)	Ensayo de dureza (ED)	Ensayo metalográfico mediante microscopía óptica (EMO)
1	1	L1.1-365.0	ET1.1-365.0	ED1.1-365.0	EMO1.3-365.0
	2	L1.2-365.0	ET1.2-365.0		
	3	L1.3-365.0	ET1.3-365.0		
2	1	L2.1-365.0/SiC/2p	ET2.1-365.0/SiC/2p	ED2.1-365.0/SiC/2p	EMO2.3-365.0/SiC/2p
	2	L2.2-365.0/SiC/2p	ET2.2-365.0/SiC/2p		
	3	L2.3-365.0/SiC/2p	ET2.3-365.0/SiC/2p		
3	1	L3.1-365.0/SiC/4p	ET3.1-365.0/SiC/4p	ED3.1-365.0/SiC/4p	EMO3.3-365.0/SiC/4p
	2	L3.2-365.0/SiC/4p	ET3.2-365.0/SiC/4p		
	3	L3.3-365.0/SiC/4p	ET3.3-365.0/SiC/4p		
4	1	L4.1-365.0/SiC/6p	ET4.1-365.0/SiC/6p	ED4.1-365.0/SiC/6p	EMO4.3-365.0/SiC/6p
	2	L4.2-365.0/SiC/6p	ET4.2-365.0/SiC/6p		
	3	L4.3-365.0/SiC/6p	ET4.3-365.0/SiC/6p		

(Fuente: Elaboración propia)

#### 4.4. Constituyentes y materiales utilizados para la fabricación de lingotes cilíndricos de MCM ANSI AA 365.0 reforzada con partículas de SiC malla #400

Los constituyentes y materiales utilizados para el proceso de fabricación de los lingotes cilíndricos vía stir casting con colado en molde de arena aglomerada son: la matriz de aleación Al-Si 365.0, refuerzo en forma de polvo particulado SiC malla #400, magnesio sólido obtenido a partir de un aro de rueda de aleación Mg-Al (93%Mg-7%Al), escorificante Alu Fundex Extra, desgasificante Aparta Gas H7-50 y afinador de grano Al5TiB. Siendo descritos con mayor detalle en el capítulo 3 y 4. A partir de estos se van a realizar cuatro fundiciones, y en cada una de ellas se obtendrán tres lingotes cilíndricos que tendrán la misma matriz 365.0 pero variaciones del 0%, 2%, 4% y 6% de SiC.

La determinación de la masa total de la moldura de fundición, para la obtención de los tres lingotes cilíndricos de MC, se lo ha detallado en el ítem 3.6.4. A partir de esta masa total se calcula la masa de cada constituyente y material que integra el composite, mediante el porcentaje que se le ha asignado a cada uno de ellos.

En la Tabla 4.13 se muestran los constituyentes y materiales, con sus respectivas cantidades en porcentaje y masa, para la fabricación de lingotes de MCM ANSI AA 365.0 reforzada con partículas de SiC malla #400 al 0%, 2%, 4% y 6%, a partir de la moldura de fundición.

Tabla 4.13. Constituyentes y materiales con sus respectivas cantidades en porcentaje y masa para la fabricación de lingotes de MCM Al-Si 365.0 reforzada con partículas de SiC malla #400.

Fundición		Lingotes de MC fabricados a partir de la moldura de fundición		Cantidades en porcentaje y masa de los constituyentes y materiales																	
N° de fundición	N° de lingotes fabricados	Codificación	Masa total de la moldura		Matriz 365.0		Tensioactivo Mg (93%Mg-7%Al)			Refuerzo SiC malla #400			Escorificante alu fundex extra			Desgasificante apartagas H7-50			Afinador de grano Al5TiB		
			%	g	%	g	%	g	más 2 g oxidación de Mg	%	g	más 3 g perdidas en recipientes	%	Primera carga g	Segunda carga g	%	g	más el 7%	%	g	más 0,5 g oxidación de Al5TiB
1	3	L1.1-365.0	100	1700	100	1700	0	0	0	0	0	0	0,5	8,5	8,5	0,25	4,250	4,548	0,2	3,4	3,9
		L1.2-365.0																			
		L1.3-365.0																			
2	3	L2.1-365.0/SiC/2p	100	1700	97	1649	1	17	19	2	34	37	0,5	8,245	8,245	0,25	4,123	4,411	0,2	3,298	3,798
		L2.2-365.0/SiC/2p																			
		L2.3-365.0/SiC/2p																			
3	3	L3.1-365.0/SiC/4p	100	1700	95	1615	1	17	19	4	68	71	0,5	8,075	8,075	0,25	4,038	4,320	0,2	3,23	4,73
		L3.2-365.0/SiC/4p																			
		L3.3-365.0/SiC/4p																			
3	3	L4.1-365.0/SiC/6p	100	1700	93	1581	1	17	19	6	102	105	0,5	7,905	7,905	0,25	3,953	4,229	0,2	3,162	4,662
		L4.2-365.0/SiC/6p																			
		L4.3-365.0/SiC/6p																			

(Fuente: Elaboración propia)

Para el escorificante, desgasificante y afinador de grano, sus cantidades en porcentaje y masa se toman a partir de la masa de la matriz.

Para efectos de la caracterización del composite la primera fundición en que se obtienen tres lingotes de material Al-Si 365.0, no se ha realizado la adición del polvo de SiC.

#### **4.5. Proceso de fabricación de lingotes cilíndricos de MCMM Al-Si 365.0 reforzada con partículas de SiC malla #400 vía stir casting**

Realizada la dispersión de las partículas de SiC en una matriz Al-Si, se describe el proceso que será utilizado para la fabricación de tres lingotes cilíndricos de MCMM 365.0 reforzada con partículas de SiC malla #400 vía stir casting, que consta de cinco bloques.

En el primer bloque se realiza la preparación de: constituyente matriz Al-Si 365.0, constituyente refuerzo SiC malla #400 y materiales secundarios, horno de fundición y herramientas utilizadas en la fundición, preparación de las cantidades en masa de los constituyentes y materiales secundarios, además de la preparación del molde de arena.

En el segundo bloque se realiza la limpieza del horno de fundición y crisol, montaje de la estructura y elementos de rotación del stir casting, centrado de las aspas del agitador y calentamiento del polvo SiC.

El tercer bloque da inicio a la fundición. Se conforma por actividades como: encendido del horno de fundición, calentamiento del horno-crisol-matriz, introducción de la matriz en el interior del crisol, fusión de la matriz, adición del Mg sólido, adición del afinador de grano, aplicación de la segunda carga de escorificante y aplicación de desgasificante.

En el cuarto bloque una vez fundida y limpia la matriz, se realiza la introducción de las aspas en la matriz 365.0 y colocación de la tapa en el crisol, y se procede a la adición del polvo cerámico de SiC malla #400 para reforzar la matriz fundida Al-Si 365.0.

Para finalizar el proceso se realiza: la desgasificación con gas argón de la masa fundida 365.0-SiC, colado de la masa fundida 365.0-SiC en molde de arena y la extracción de los lingotes de material compuesto del molde de arena.

Otro de los puntos que sustentan el desarrollo de este proceso de fabricación de lingotes, es la construcción del equipo stir casting para la dispersión de las partículas de SiC malla #400 en la matriz fundida 365.0, descrita en el ítem 3.6. Sus partes y elementos son mencionados en el transcurso del proceso de fabricación. Este proceso de fabricación de lingotes cilíndricos de MCMM 365.0 reforzada con partículas de SiC malla #400, será utilizado en cada fundición tanto para porcentajes de refuerzo de SiC del 2%, 4% y 6%.

#### 4.5.1. Preparación del constituyente matriz aleación Al-Si 365.0

El constituyente matriz Al-Si 365.0, que es un block de cilindros perteneciente a un automóvil Honda civic, se limpió con un trapo húmedo de agua para remover la suciedad superficial impregnada a este. El block limpiado se muestra en la Figura 4.38.



Figura 4.38. Block de cilindros Al-Si 365.0 removido la suciedad superficial.  
(Fuente: Elaboración propia)

Posteriormente el block de cilindros es cortado en pedazos de modo que las cargas metálicas dentro del crisol sean lo más grandes y macizas posibles. Además, la superficie debe estar libre de polvo, grasa, aceite, pintura, etc., revisar ítem 2.10.4 y 2.10.5. Para la limpieza de la superficie, estos pedazos son sumergidos en agua, a la cual se le añadió detergente y polvo desengrasante lava, para que después de dos días, con un cepillo de ropa y uno de dientes, remover la suciedad, grasa y aceite, que están adheridas a los pedazos del block. Sin embargo, la superficie de algunos pedazos, que estuvieron en contacto con el agua de refrigeración del block de cilindros, siguen fuertemente impregnados de una capa de óxido, para retirarla se expuso a estos pedazos por 5 días al sol, con lo cual se consiguió debilitar la capa de óxido, y con la ayuda de un cepillo de alambre manual, y un cepillo circular de cerdas de alambre para taladro, proceder a su fácil remoción. Con este procedimiento quedó eliminado en un 97% la escoria y el óxido adherido a la superficie de los pedazos del block. En la Figura 4.39 se muestra el block de cilindros cortado en pedazos y limpiado.

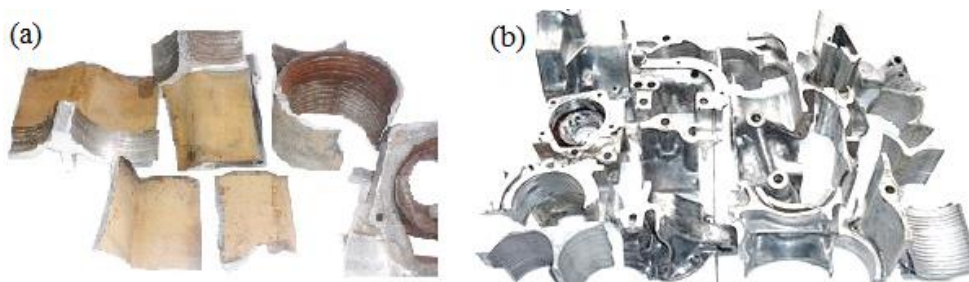


Figura 4.39. Block de cilindros Al-Si 365.0: (a) cortado en pedazos y (b) limpieza total del material.  
(Fuente: Elaboración propia)

#### 4.5.2. Preparación del constituyente refuerzo SiC malla #400

El polvo de SiC malla #40 se procedió a ponerlo en un envase plástico, Figura 4.40, debidamente limpiado y secado, para protegerlo del medio ambiente. Además, para su manipulación al momento de preparar las respectivas cantidades para cada fundición.



Figura 4.40. SiC malla #400 puesto en un envase plástico.  
(Fuente: Elaboración propia)

#### 4.5.3. Preparación de los materiales secundarios

Una vez adquirido los materiales secundarios como: escorificante alu fundex extra, desgasificante apartagas H7-50, fragmentos de magnesio sólido (93%Mg-7%Al), y la varilla circular de Al5TiB para afinamiento de grano, son puestas en recipientes plásticos con tapa rosca para protegerlos del medio ambiente, y también, para tener una mejor manipulación al momento de preparar las respectivas cantidades para cada fundición.

#### 4.5.4. Preparación del horno de fundición

La preparación del horno de GLP, ubicado en el Laboratorio de Fundición de la Facultad de Ingeniería Mecánica, consistió en el mantenimiento del mismo. La Figura 4.41 muestra su estado antes de realizar el proceso de fabricación de los lingotes cilíndricos.



Figura 4.41. Horno de fundición antes de realizar el proceso de fabricación de los lingotes.  
(Fuente: Elaboración propia)

Para el mantenimiento del horno de fundición se enlució con una capa fina de polvo cerámico la pared interna del horno, en la cual se aloja el crisol, debido a que esta por el uso comenzó a desmoronarse, generando un polvo cerámico en el interior del horno. Su tapa también se la enlució por el mismo problema. Para enlucir estas partes se utilizó un polvo cerámico comercial llamado magnesita, el cual es un hormigón refractario sílico-aluminoso. En la Figura 4.42 se muestra el recubrimiento de la pared interna del horno de fundición al preparar y aplicar el polvo de magnesita.



Figura 4.42. Recubrimiento de la pared interna del horno.  
(Fuente: Elaboración propia)

Además, se realizó el mantenimiento del venterol, cañerías y accesorios, también se adaptó otra válvula reguladora de presión de GLP, para tener una llama uniforme dentro del interior del horno que ayude a mantener estable la temperatura en el interior del crisol.

#### 4.5.5. Preparación de herramientas

Para minimizar las contaminaciones de la aleación líquida 365.0 por parte de las herramientas utilizadas, como las mencionadas en el ítem 2.10.6, y para una mayor rapidez y facilidad al momento de realizar las respectivas fundiciones, se procedió a la preparación de las mismas. Esto consistió en la construcción y posterior recubrimiento mediante la deposición de una pintura refractaria INJEMAQ AL 397 sobre su superficie.

En la Figura 4.43 se muestran las herramientas construidas y utilizadas en el proceso de fundición. (a) Cucharas pequeñas de agitación y retiro de escoria, y cucharetas perforadas de retiro de escoria, las mismas que no fue necesario recubrirlas, debido a que son de acero inoxidable y no están expuestas a tiempos prolongados en el interior de la aleación fundida 365.0. (b) Campanas para el procedimiento de escorificación y desgasificación de la fundición, para su tratamiento de limpieza, antes de iniciar la fundición, se procede a calentarlas en el horno de fundición y con un cepillo de acero quitar cualquier tipo de escoria o descarburación de su superficie, como ha sido



mencionado en la prueba preliminar 06. (c) Buje con placa circular perforada para retiro de escoria y pala de apoyo para el colado del MC, las cuales son de acero al carbono y fueron recubiertas con pintura refractaria, ya que son más susceptibles a contaminar la aleación fundida, ya sea por pérdida de elementos o la propia descarburación.

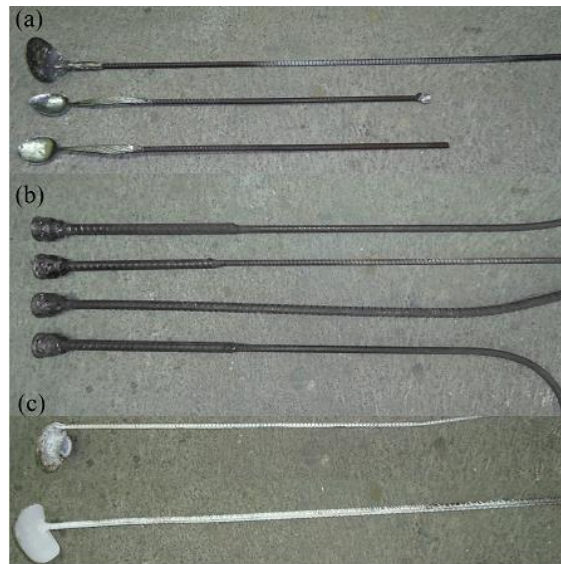


Figura 4.43. Herramientas construidas y utilizadas en el proceso de fundición.  
(Fuente: Elaboración propia)

Las cuatro campanas empleadas en el procedimiento de escorificación y desgasificación, fueron construidas a partir de reducciones de hierro para tubería de  $\frac{3}{4}$  a  $\frac{1}{2}$ , las cuales fueron soldadas a varillas de construcción para su manipulación en el interior de la fundición. En el interior de la reducción de hierro es colocado el escorificante o desgasificante, que son sumergidos en el interior de la fundición por medio de la varilla de construcción que funciona como mango. En la Figura 4.44 se muestra con mayor detalle la unión de estos elementos.



Figura 4.44. Detalle de las campanas de escorificación.  
(Fuente: Elaboración propia)

En el proceso de fundición, además de utilizar las herramientas construidas, también se empleó otros accesorios como cepillos de acero, alicates, martillos, etc. La Figura 4.45 muestra la ubicación de las herramientas y accesorios antes de iniciar la fundición.





Figura 4.45. Ubicación de las herramientas y accesorios antes de iniciar el proceso de fundición.  
(Fuente: Elaboración propia)

#### 4.5.6. Preparación de las cantidades en masa de los constituyentes y materiales

La medición de las cantidades en masa; tanto de los constituyentes principales, aleación Al-Si 365.0 y SiC malla #400; como de los materiales secundarios, magnesio sólido (93%Mg-7%Al), alufundex extra, apartagas H7-50 y afinador de grano Al5TiB; fueron realizados mediante dos balanzas analíticas, una de marca N°TEX para el constituyente 365.0, y otra de marca Sartorius para el constituyente SiC y los materiales secundarios. Estas balanzas pertenecen al Laboratorio de Fundición de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la EPN. La ficha técnica de cada balanza se muestra en la Tabla 4.14.

Tabla 4.14. Ficha técnica de las balanzas analíticas.

Ficha técnica balanza Sartorius	Ficha técnica balanza N°TEX
	
Marca : sartorius Cantidad máx. : 300 g Precisión : 0.001 g	Marca : N°TEX Cantidad máx. : 10 kg Precisión : 5 g

(Fuente: Elaboración propia)

Una vez que cada constituyente y material ha sido pesado según las cantidades en masa de la Tabla 4.13 se procede a su respectiva preparación que toma en cuenta el facilitar y mejorar el proceso de obtención del composite como se muestra a continuación.

La matriz es envuelta en papel periódico y seguidamente enrollada en cinta de embalaje, para protegerla de la humedad y contaminaciones del medio ambiente. En la Figura 4.46 se muestra la preparación de la matriz Al-Si 365.0 al 93%.

El refuerzo SiC se lo ha introducido en un recipiente plástico, completamente limpio y seco, para evitar su exposición a la humedad y a la contaminación del medio ambiente, en la Figura 4.47 se muestra la preparación del refuerzo SiC malla #400 al 6%.



Figura 4.46. Preparación de la matriz Al-Si 365.0 al 93%  
(Fuente: Elaboración propia)



Figura 4.47. Preparación del refuerzo SiC malla #400 al 6%.  
(Fuente: Elaboración propia)

La preparación del magnesio sólido consta de tres pasos. En el primero, se corta un pedazo de Mg (93%Mg-7%Al) al 1%, se remueve su suciedad con alcohol y se lo seca, además, se limpia la campana de adición de magnesio. En el segundo, una de las puntas es introducida a presión en la campana. En el tercero, el magnesio y la campana, se los ha envuelto en papel aluminio, para evitar que el pedazo de Mg sólido tenga un proceso de oxidación al ser introducido en la matriz fundida, ya que su superficie no se la está exponiendo al oxígeno que se encuentra en la atmosfera del crisol. En la Figura 4.48 se muestra la preparación del magnesio sólido.

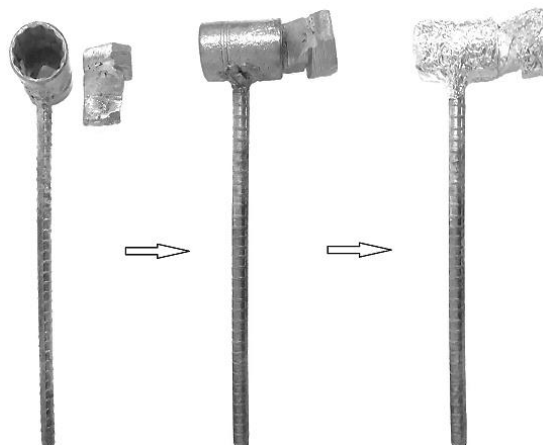


Figura 4.48. Preparación del magnesio sólido.  
(Fuente: Elaboración propia)

Los fundentes alu fundex extra (color rosado) y apartagas H7-50 (color azul), se los ha envuelto en papel aluminio, para protegerlos de la humedad y la contaminación del medio ambiente, además de evitar su dispersión hasta poder sumergirlos en el fondo de la fundición por medio de su respectiva campana. Una vez en el fondo, el papel aluminio se funde, al mismo instante que comienza la reacción del respectivo fundente con la aleación 365.0 en estado líquido. A través del mango de la campana se agita de forma circular cada fundente, lo cual mejora la reacción del fundente con la matriz fundida. En cambio, el fundente afinador de grano Al5TiB (color plateado) tiene una preparación semejante al fragmento de magnesio sólido descrito anteriormente, pero el afinador es introducido en una campana de adición de titanio. En la Figura 4.49 se muestra la preparación de las cantidades en masa de los fundentes alu fundex extra, apartagas H7-50 y afinador de grano Al5TiB.

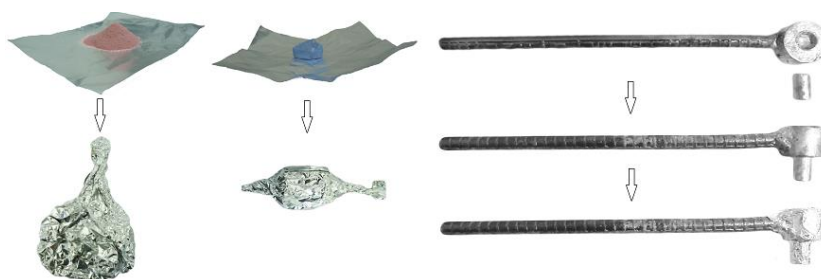


Figura 4.49. Preparación de las cantidades en masa de los fundentes alu fundex extra (rosado), apartagas H7-50 (azul) y afinador de grano Al5TiB (plateado).  
(Fuente: Elaboración propia)

#### 4.5.7. Preparación del molde de arena para colar el composite

El molde de arena aglomerada con resina orgánica autofraguante fue adquirido en la industria FUNDIRECICLAR (revisar ítems 2.10.13 y 3.7). Su preparación consiste en untar con una sustancia viscosa denominada melaza las guías macho y hembra de cada mitad del molde, para posteriormente acoplar las guías y que permanezcan unidas las mitades, con lo cual queda formada la cavidad interna del molde que tiene la forma de tres lingotes. La Figura 4.50 muestra la preparación del molde de arena aglomerada.

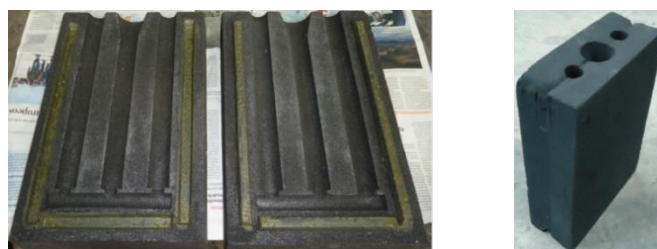


Figura 4.50. Preparación del molde de arena aglomerada.  
(Fuente: Elaboración propia)

#### **4.5.8. Limpieza del horno de fundición y crisol tipo ensamble**

Antes de comenzar la fundición de la aleación 365.0 se limpia el hogar interno del horno de fundición, así como del crisol, para evitar la formación de escoria e inclusiones no metálicas al momento de fundir la matriz, revisar ítems 2.10.4 y 2.10.5. Seguidamente ya se puede centrar el crisol de acero tipo ensamble en el interior del horno de fundición.

#### **4.5.9. Montaje de la estructura del stir casting**

La estructura que permite tanto el desplazamiento en forma vertical como el movimiento giratorio, necesarios para ubicar el agitador en el centro interior del crisol, es montada alrededor del horno de fundición. Además, esta es fijada al piso mediante 4 tornillos que absorben la vibración producida por las altas revoluciones del agitador. La Figura 4.51 muestra el montaje de la estructura del stir casting, ubicada y fijada alrededor del horno.



Figura 4.51. Montaje de la estructura del stir casting.  
(Fuente: Elaboración propia)

#### **4.5.10. Montaje de los elementos de rotación del stir casting**

En el tubo circular de la estructura del stir casting se acopla el motor eléctrico por medio de una pequeña estructura solidaria. El motor tiene tanto libertad de giro como de desplazamiento vertical, con el fin de acercar y centrar las aspas del agitador en el interior del crisol, esto ocurre una vez que el eje del agitador se acopla al motor. Además, en un costado de la estructura se ubica el variador de frecuencia, el cual permite tener el control de las revoluciones del motor y consecuentemente de las aspas del agitador. La Figura 4.52 muestra el montaje de los elementos de rotación motor-agitador que son componentes del stir casting, además del horno de fundición con sistema de GLP.



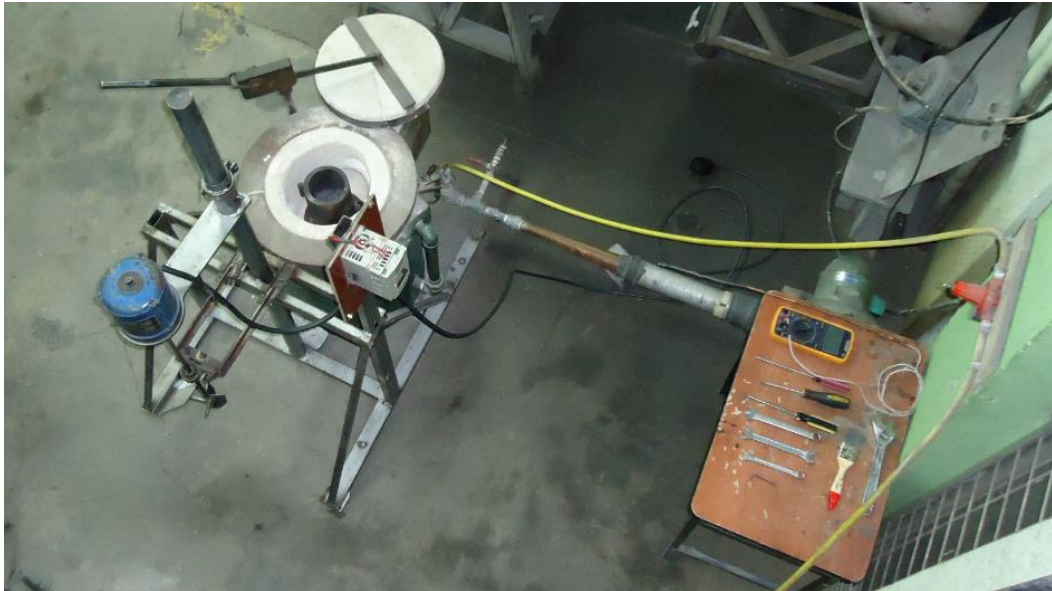


Figura 4.52. Montaje de los elementos de rotación motor-agitador del stir casting.  
(Fuente: Elaboración propia)

#### 4.5.11. Centrado de las aspas del agitador en el interior del crisol

Una vez montados los elementos de rotación del stir casting motor-agitador, se procede a colocar el crisol de acero en el interior del horno, con el objetivo de centrar las aspas del agitador en la cavidad interna del crisol. Seguidamente el motor es deslizado hacia arriba por medio de su estructura solidaria con el propósito de retirar las aspas y no entorpecer el proceso de calentamiento del crisol y la fundición. La altura desde la base del crisol hacia las aspas es de 15 mm, calculado en el ítem 3.6.5.11, así como sus dimensiones. La Figura 4.53 muestra el centrado de las aspas del agitador en el interior del crisol.



Figura 4.53. Centrado de las aspas del agitador en el interior del crisol de acero.  
(Fuente: Elaboración propia)

#### 4.5.12. Calentamiento del polvo SiC malla #400

El polvo de SiC malla #400, antes de ser añadido a la fundición Al-Si 365.0, es previamente calentado por 30 min hasta llegar a una temperatura de 300 °C, los motivos de calentarlo son para eliminar la humedad e impurezas de su superficie, y mantener la tensión superficial de la aleación Al-Si 365.0 acorde a la temperatura de su estado líquido, lo cual mejora la mojabilidad de la matriz sobre las partículas del polvo de SiC, como han sido mencionados en el ítem 2.10.11.

Considerar que las cantidades de polvo de SiC al 2%, 4% y 6%, son porcentajes bajos en comparación a la matriz 365.0, lo que calentadas a 300 °C y agregadas continuamente a la matriz que está a 720 °C, bajará no menos de 20 °C la temperatura de la matriz en el crisol, razón por la cual es suficiente calentar el SiC a esa temperatura. De todas maneras si hay un descenso de temperatura se aumentara la misma hasta los 720 °C.

El calentamiento consiste en colocar el polvo de SiC, previamente pesado según las cantidades mostradas en la Tabla 4.13, en dos recipientes de arcilla e introducirlos en el interior de un horno eléctrico hasta que la pluma del indicador analógico marque los 300 °C. La Figura 4.54 muestra el calentamiento de 105 g de polvo de SiC malla #400 en el interior del horno eléctrico, para obtener un MC 365.0/SiC/6p.



Figura 4.54. Calentamiento del polvo de SiC malla #400.  
(Fuente: Elaboración propia)

#### 4.5.13. Encendido del horno de fundición

Primero se abre la válvula del cilindro de GLP y se enciende la llama piloto. Al instante se energiza el venterol e inicia el suministro de flujo de aire en la tobera y en la cavidad interna del horno donde está el crisol y la llama piloto. Posteriormente se abre la válvula reguladora de paso de combustible para que el GLP se mezcle en la tobera con el aire

del venterol e ingresen al interior del horno y se encienda el GLP por el contacto de la llama piloto, lo que provoca que el calor producto de la llama abrace la circunferencia del crisol. Se tiene que regular el flujo de combustible y el flujo de aire, debido a la formación de hidrógeno por la incompleta combustión de gas, revisar ítem 2.10.3. Por experiencia una llama de color azul indica que la mezcla GLP-aire está en las proporciones correctas.

#### **4.5.14. Calentamiento del horno-crisol-matriz 365.0**

Una vez encendido el interior del horno de fundición se procede a calentarlo por 10 minutos, junto con el crisol de acero y el material matriz Al-Si 365.0 que es ubicado en el filo de la boca del horno (las cantidades en masa de la matriz para cada fundición son indicadas en la Tabla 4.13). El calentamiento permite eliminar la humedad que se encuentra tanto en el interior del horno y crisol, como en la matriz 365.0. La humedad es peligrosa por la formación de gas hidrógeno y de óxido de aluminio, a temperaturas de fusión de la matriz, revisar ítems 2.10.1 y 2.10.2. En la Figura 4.55 se muestra el calentamiento conjunto horno-crisol-matriz 365.0.

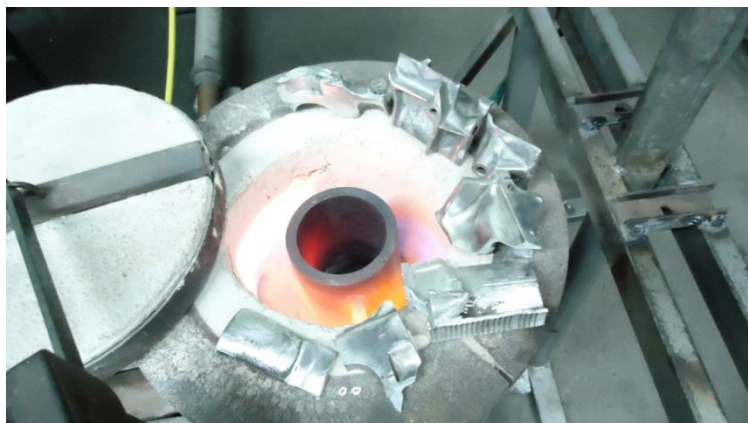


Figura 4.55. Calentamiento horno-crisol-matriz 365.0.  
(Fuente: Elaboración propia)

#### **4.5.15. Introducción de la matriz Al-Si 365.0 en el interior del crisol**

Una vez calentado por 10 minutos horno-crisol-matriz 365.0 se procede a introducir la matriz en el interior del crisol de acero, junto con la primera carga del fundente escorificante alu fundex extra según el método de aplicación de su ficha técnica mostrada en el Anexo A9. La cantidad de la primera carga es mostrada en la Tabla 4.13. Seguidamente se coloca la tapa del horno, para que no exista pérdida de calor y proteger la atmosfera interna del horno de fundición. En la Figura 4.56 se muestra la introducción de la matriz 365.0 en el interior del crisol.





Figura 4.56. Introducción de la matriz 365.0 en el interior del crisol.  
(Fuente: Elaboración propia)

#### 4.5.16. Fusión de la matriz Al-Si 365.0 en el interior del crisol

En el interior del crisol la matriz es llevada a su temperatura de fusión teórica, la cual es 590 °C, pero a esa temperatura se observa que no se funde por completo, por lo que se la elevó a 710 °C, asegura su completa fusión en un tiempo de 35 min. En la Figura 4.57 se muestra la fusión de la matriz Al-Si 365.0.



Figura 4.57. Fusión de la matriz Al-Si 365.0.  
(Fuente: Elaboración propia)

Una vez fundida la matriz no exponerla a tiempos de fusión prolongados ni a sobrecalentamientos, debido a que el vapor de agua que puede estar en el ambiente e invadiendo el interior del horno, es un factor para la formación de  $Al_2O_3$  e hidrógeno, este último soluble en aluminio a altas temperaturas, revisar ítem 2.10.1.

El control de la temperatura, en el transcurso del proceso de fabricación de lingotes cilíndricos de MCM 365.0 reforzada con partículas de SiC, es realizado mediante un controlador de temperatura digital marca maxwell MTB-48 con termocupla tipo probeta K que mide rangos de temperaturas desde -100 °C a 1000 °C, Figura 4.58, y con un multímetro marca DT9208A con termocupla tipo K el cual mide rangos de temperaturas

de -20 °C a 1000 °C, Figura 4.59. Los cables conductores de las termocuplas han sido recubiertos con un tubo de cobre, para protegerlos del calor cuando se encuentren en la atmosfera interna del crisol. El controlar que la aleación líquida no alcance altas temperatura de fusión evita la solubilidad del hidrógeno en el aluminio, la formación de  $Al_4C_3$  por reacción de la aleación Al-Si 365.0 con el SiC, ver ítems 2.10.8 y 2.10.9. Además de otros intermetálicos que fragilizan el composite fabricado.



Figura 4.58. Controlador de temperatura digital con termocupla tipo probeta K.  
(Fuente: Elaboración propia)



Figura 4.59. Multímetro DT9208A con termocupla tipo K.  
(Fuente: Elaboración propia)

#### 4.5.17. Adición del magnesio sólido en la matriz fundida 365.0

Preparada la cantidad en masa de Mg sólido al 1% y acuñado en una campana de adición de Mg, son introducidos en la superficie de la matriz, para que el Mg se sumerja en el fondo de la fundición a causa del peso de la campana. La envoltura en papel aluminio del Mg evita su oxidación al iniciar su introducción en la matriz fundida. Una vez en el fondo, el intenso calor de la matriz que está a una temperatura de 720 °C disuelve el Mg sólido aproximadamente en 7 minutos, quedando adicionado este elemento. La Figura 4.60 muestra la introducción del pedazo de Mg sólido en la matriz fundida 365.0.



Figura 4.60. Introducción del pedazo de Mg sólido en la matriz fundida 365.0.  
(Fuente: Elaboración propia)

Para la adición del magnesio primero se tuvo que pasar por varios inconvenientes, como los mencionados en las pruebas preliminares 07 y 08, hasta haber encontrado la forma y procedimiento de adicionarlo como pedazo sólido en la prueba preliminar 09. En donde se consiguió un aro de rueda de aleación Mg-Al con una pureza del 93% de Mg, y del cual se extrajo un pedazo para preparar su cantidad en masa como se lo ha descrito en el ítem 4.5.6. La adición del Mg mejora la mojabilidad de la matriz líquida sobre las partículas de SiC malla #400, como se lo ha mencionado en el ítem 2.10.12. Para cada fundición la cantidad en masa de magnesio sólido es indicada en la Tabla 4.13.

#### **4.5.18. Adición del afinador de grano en la matriz fundida 365.0**

Finalizada la adición del magnesio sólido se da inicio a la adición del afinador de grano Al5TiB en la matriz fundida. Para esto primero se procedió a preparar su cantidad en masa como se lo indica en el ítem 4.5.6. Posteriormente el pedazo de Al5TiB sólido al 0,2% que ha sido acuñado en una campana de adición de titanio, son introducidos en la superficie de la matriz, para que el afinador se sumerja en el fondo de la fundición a causa del peso de la campana. La envoltura en papel aluminio del afinador evita su oxidación al iniciar su introducción en la matriz fundida. Una vez en el fondo, el intenso calor de la matriz que está a una temperatura de 720 °C disuelve el afinador aproximadamente en 7 min, de esta manera queda adicionado este elemento. La Figura 4.61 muestra la introducción del pedazo de Al5TiB sólido en la matriz fundida 365.0.



Figura 4.61. Introducción del pedazo de Al5TiB sólido en la matriz fundida 365.0.  
(Fuente: Elaboración propia)

#### **4.5.19. Aplicación de la segunda carga de escorificante**

Disuelto el magnesio y afinador de grano en la matriz fundida Al-Si 365.0, con una cuchara se retira la escoria que se ha separado de la matriz líquida, producto de la aplicación de la primera carga de escorificante alu fundex extra. Y además, preparada la campana de hierro y la segunda carga de escorificante alu fundex extra en los ítems 4.5.5

y 4.5.6 respectivamente, se procede a introducir el escorificante en la campana. Seguidamente el escorificante es sumergido por medio del mango de la campana en el fondo de la matriz fundida con el fin de sacar el remanente de escoria. El método de aplicación del escorificante alu fundex extra se lo realiza en base a la ficha técnica mostrada en el Anexo A9. La Figura 4.62 muestra la introducción del escorificante alu fundex extra en la campana de hierro y su posterior sumergimiento en la matriz fundida.



Figura 4.62. Introducción del escorificante alu fundex extra en la campana de hierro y posterior sumergimiento en la matriz fundida.  
(Fuente: Elaboración propia)

#### 4.5.20. Aplicación del desgasificante apartagas H7-50

Una vez retirada la escoria producida al aplicar el escorificante alu fundex extra, y preparada previamente la campana de hierro y la cantidad de desgasificante apartagas H7-50 extra en los ítems 4.5.5 y 4.5.6 respectivamente, se procede a introducir el desgasificante en la campana. Seguidamente el desgasificante es sumergido por medio del mango de la campana en el fondo de la matriz fundida con el fin de expulsar el hidrógeno disuelto en la matriz. El método de aplicación se lo realiza en base a su ficha técnica mostrada en el Anexo A10. La Figura 4.63 muestra la introducción del apartagas H7-50 en la campana de hierro y su posterior sumergimiento en la matriz fundida.



Figura 4.63. Introducción del apartagas H7-50 en la campana de hierro y posterior sumergimiento en la matriz fundida.  
(Fuente: Elaboración propia)



#### **4.5.21. Introducción de las aspas en la matriz fundida 365.0 y colocación de la tapa en el crisol**

Una vez escoriificada y desgasificada la matriz fundida Al-Si 365.0, la misma está completamente limpia y lista para ser adicionada el SiC. Para adicionar el polvo de SiC malla #400 se introducen las aspas en la matriz fundida, precalentadas para eliminar la humedad y no bajar la temperatura de la fundición. A su vez, se coloca la tapa de acero en la boca del crisol y seguidamente se inicia con el giro progresivo de las aspas mediante su eje que esta acoplado al motor. El motor es controlado por su variador de velocidad. La Figura 4.64 muestra la introducción de las aspas en la matriz fundida 365.0 y la colocación de la tapa en el crisol.



Figura 4.64. Introducción de aspas en la matriz fundida 365.0 y colocación de la tapa en el crisol.  
(Fuente: Elaboración propia)

#### **4.5.22. Adición del polvo cerámico SiC para reforzar la matriz fundida 365.0**

Con las aspas introducidas en la matriz fundida a una temperatura a 720 °C, se inicia el giro de las aspas a 500 rpm. Con lo cual la matriz es agitada sobre el crisol, creando un vórtice que es aprovechado para dispersar las partículas de SiC en la matriz líquida.

El polvo cerámico de SiC malla #400, previamente iniciado su calentamiento en el ítem 4.5.12 hasta llegar a la temperatura de 300 °C, es colocado en un recipiente de arcilla que es ubicado por las cercanías de la boca del horno de fundición, en donde por medio de una cuchara comience su adición en forma continua y dispersa a través del embudo de la tapa del crisol. El tubo solado al embudo dirige las partículas de SiC hacia el vórtice que ha formado la matriz fundida 365.0. Una vez que las partículas han caído en el vórtice son introducidas y dispersadas en la matriz. El tiempo de adición del SiC es de 3 min. En este intervalo de tiempo la rotación de las aspas son de 500 rpm. Finalizada la adición, la agitación de la masa fundida matriz-refuerzo se prolonga por 3 min, y la rotación de las aspas se incrementa a 600 rpm, además la temperatura se mantiene a

720 °C. Las cantidades adicionadas de polvo de SiC en cada fundición se muestran en la Tabla 4.13.

La Figura 4.65 muestra la adición del polvo de SiC malla #400 en la matriz fundida 365.0 a través del embudo de la tapa del crisol. Además del control de temperatura que es realizado mediante dos termocuplas tipo K, recubiertas con tubo de cobre e introducidas por los orificios de la tapa del crisol, la lectura de la temperatura es interpretada por un controlador digital y un multímetro DT9208A, como se los ha mostrado en el ítem 4.5.16.



Figura 4.65. Adición del polvo de SiC malla #400 en la matriz fundida Al-Si 365.0 a través del embudo de la tapa del crisol.  
(Fuente: Elaboración propia)

Concluida la agitación de la masa fundida, se detiene el giro de las aspás. Seguidamente el mecanismo de agitación es desplazado hacia arriba para no entorpecer la desgasificación con gas argón y el retiro del crisol en el interior del horno de fundición.

#### **4.5.23. Desgasificación con gas argón de la masa fundida aleación Al-Si 365.0-SiC malla #400**

Para eliminar el hidrógeno disuelto en la matriz líquida 365.0 se procede a utilizar un equipo de desgasificación utilizado en la prueba preliminar 13, el cual consta de un tanque de argón, regulador de alta presión y un tubo de acero de Ø 8 mm unido a la campana desgasificadora que ha sido construida en este proyecto de investigación.

Preparado el equipo de desgasificación, se apaga la llama del horno de fundición y se mantiene el crisol en su interior, en este momento se procede a introducir y a desplazar la campana por todo el fondo de la masa fundida 365.0-SiC por un tiempo de 35 segundos. Con lo cual el efecto de las burbujas de argón que salen por la campana a través de los orificios de Ø1,98 mm realizan su efecto de eliminar el hidrógeno disuelto en la matriz fundida, que está a una temperatura de 720 °C. El caudal de insuflado de gas Ar es de 2,5 LPM. La Figura 4.66 muestra el desgasificación de la masa fundida mediante gas Ar.



Figura 4.66. Desgasificación de la masa fundida mediante gas argón.  
(Fuente: Elaboración propia)

#### 4.5.24. Colado de la masa fundida Al-Si 365.0-SiC en molde de arena

Realizada la desgasificación de la masa fundida Al-Si 365.0-SiC malla #400, y con su temperatura descendida a 700 °C, se procede a su colado. Para lo cual se retira el crisol de acero del interior del horno y se lo ubica en un anillo porta crisol, seguidamente de las barras del anillo se levanta el crisol para acercarlo y colarlo en el molde de arena aglomerada que fue previamente preparado en el ítem 4.5.7. El molde de arena fue previamente calentado a 200 °C. La Figura 4.67 muestra el colado de la masa fundida matriz Al-Si 365.0 reforzada al 6% de SiC malla #400 en molde de arena aglomerada.

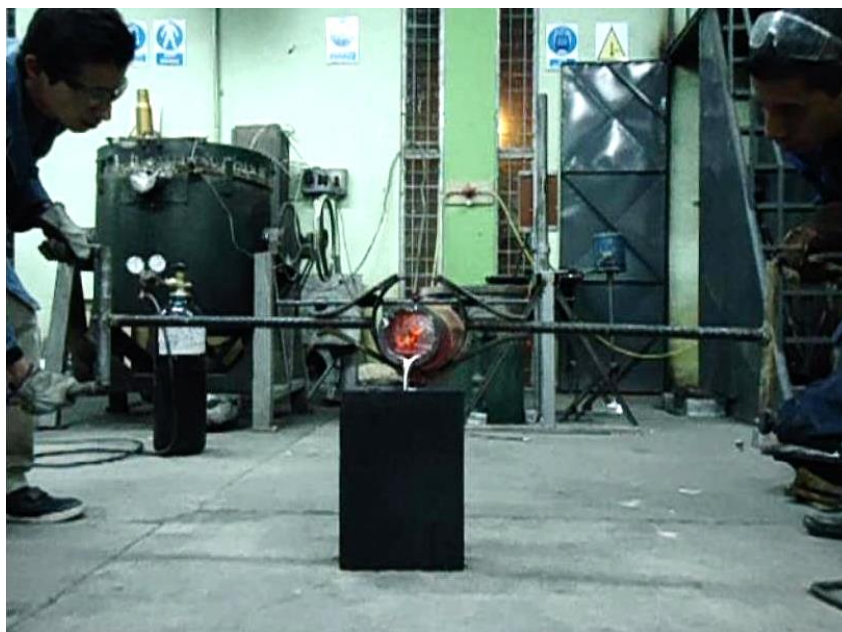


Figura 4.67. Colado de la masa fundida matriz Al-Si 365.0 reforzada al 6% de SiC malla #400 en molde de arena aglomerada.  
(Fuente: Elaboración propia)

#### 4.5.25. Extracción de los lingotes de material compuesto del molde de arena

Una vez solidificada y enfriada la masa fundida Al-Si 365.0-SiC en el molde de arena aglomerada, se procede a abrirlo para extraer los tres lingotes cilíndricos de MCMM Al-Si 365.0 reforzada al 6% con partículas de SiC malla #400 vía stir casting, obtenidos en el transcurso de este proceso de fabricación. Los lingotes serán cortados para obtener una longitud de 200 mm con un diámetro de 26 mm, para posteriormente realizar la preparación de las probetas a caracterizar. En la Figura 4.68 se muestra la extracción de los tres lingotes de MC 365.0/SiC/6p del molde de arena.



Figura 4.68. Extracción de los tres lingotes de MC 365.0/SiC/6p del molde de arena.  
(Fuente: Elaboración propia)

#### 4.6. Materiales y parámetros utilizados en el proceso de fabricación de lingotes cilíndricos 365.0, 365.0/SiC/2p, 365.0/SiC/4p y 365.0/SiC/6p

Los materiales utilizados en el proceso de fabricación de lingotes cilíndricos de material 365.0, MCMM 365.0/SiC/2p, MCMM 365.0/SiC/4p y MCMM 365.0/SiC/6p, han sido mostrado en ítem 4.4, en cambio sus parámetros como tiempo de fusión, temperatura, rpm del agitador y otros parámetros, fueron mencionados en la redacción del ítem 4.5. Para resumir estos materiales y parámetros, se los ha expuesto en sus respectivas tablas que a continuación se presentan. Además, se muestran los lingotes cilíndricos previo maquinado para la preparación de probetas.

##### 4.6.1. Lingotes cilíndricos de material 365.0

En la Tabla 4.15 se muestran los materiales en porcentaje y masa. Además de los parámetros establecidos para la fabricación de lingotes cilíndricos 365.0.



Tabla 4.15. Materiales y parámetros para la fabricación de lingotes 365.0.

Cantidades en porcentaje y masa de los constituyentes principales y materiales secundarios.						
Masa de la moldura de fundición 100%	Matriz Al-Si 365.0 al 100%	Tensioactivo aro de rueda de Mg al 1% + 2 g pérdidas	Refuerzo SiC malla #400	Escorificante alu fundex extra al 0.5% 1ra y 2da carga	Desgasificante apartagas H7-50 al 0,25% + 7%	Afinador de grano Al5TiB al 0,2% + 0,5 g oxidación
1700 g	1700 g	0 g	0 g	8,5 g	4,548 g	3,9 g
Temperaturas referenciales para el proceso de fundición de la matriz Al-Si 365.0						
Temperatura de fusión teórica 365.0	590 °C	Temperatura de colado recomendadas			700-750 °C	
Parámetros en el proceso de fabricación de lingotes						
tiempo de calentamiento horno-crisol-matriz	10 min	Temperatura ambiente	18 °C			
tiempo de fundición de la matriz	35 min	Temperatura de fusión de la matriz	710 °C			
tiempo de adición Al5TiB después de fundir la matriz	15 min	Temperatura de adición Al5TiB	710 °C			
tiempo de desgasificado con campana de argón	35 s	Temperatura de la matriz al iniciar la desgasificación con argón	720 °C			
Se utilizó un crisol de acero de Ø101 × 190 × 13 mm. Molde de arena aglomerada.		Temperatura de colado de la matriz	700 °C			

(Fuente: Elaboración propia)

La Figura 4.69 muestra los tres lingotes obtenidos de aleación Al-Si 365.0 con su respectiva codificación. Las dimensiones en bruto de cada lingote es Ø26 × 270 mm, pero las de maquinado para la obtención de probetas es Ø26 × 200 mm, ya que se resta 70 mm debido a la formación de rechupes. Por esto, en la preparación de probetas para ensayos de tracción, dureza y metalográficos, se muestran lingotes con esas dimensiones. En el Anexo A17 se muestra su plano de maquinado para la obtención de las probetas.



Figura 4.69. Lingotes obtenidos de MCM 365.0.

(Fuente: Elaboración propia)

#### 4.6.2. Lingotes cilíndricos de MCM 365.0/SiC/2p

En la Tabla 4.16 se muestran los materiales en porcentaje y masa. Además de los parámetros establecidos para la fabricación de lingotes cilíndricos 365.0/SiC/2p.

Tabla 4.16. Materiales y parámetros para la fabricación de lingotes 365.0/SiC/2p.

Cantidades en porcentaje y masa de los constituyentes principales y materiales secundarios.						
Masa de la moldura de fundición 100%	Matriz Al-Si 365.0 al 97%	Tensioactivo aro de rueda de Mg al 1% + 2 g pérdidas	Refuerzo SiC malla #400 al 2% + 3 g pérdidas	Escorificante alu fundex extra al 0,5% 1ra y 2da carga	Desgasificante apartagas H7-50 al 0,25% + 7%	Afinador de grano Al5TiB al 0,2% + 0,5 g oxidación
1700 g	1649 g	19 g	37 g	8,245 g	4,411 g	3,798 g
Temperaturas referenciales para el proceso de fundición de la matriz Al-Si 365.0 y MC 365.0/SiC/2p						
Temperatura de fusión teórica 365.0	590 °C	Temperatura de colado recomendadas	700-750 °C	Temperatura de colado AlSi10-SiC recomendadas	700-760 °C	
Parámetros en el proceso de fabricación de lingotes cilíndricos vía stir casting						
tiempo de calentamiento horno-crisol-matriz	10 min	Temperatura ambiente	18 °C			
tiempo de fundición de la matriz	35 min	Temperatura de fusión de la matriz	710 °C			
tiempo de adición de Mg después de fundir la matriz	7 min	Temperatura de adición Mg	710 °C			
tiempo de adición Al5TiB después de adicionar Mg	7 min	Temperatura de adición Al5TiB	710 °C			
SiC se mantiene calentado hasta después de escorificar y desgasificar la matriz.		Temperatura de calentamiento SiC	300 °C			
tiempo de adición SiC con una rotación de las aspas sobre la matriz fundida de 500 rpm	3 min	Temperatura de la matriz al adicionar SiC	720 °C			
tiempo de agitación de la masa fundida matriz-SiC con una rotación de las aspas de 600 rpm	3 min	Temperatura de agitación de la masa fundida matriz-SiC	720 °C			
tiempo de desgasificado con campana de argón	35 s	Temperatura de la masa fundida al iniciar la desgasificación con argón	720 °C			
Se utilizó un crisol de acero de Ø101 × 190 × 13 mm. Molde de arena aglomerada. Agitador de 4 paletas planas de Ø60 × 30 × 5 mm con inclinación de 70°		Temperatura de colado composite	700 °C			

(Fuente: Elaboración propia)

La Figura 4.70 muestra los tres lingotes obtenidos de MC 365.0/SiC/2p con su respectiva codificación. Las dimensiones en bruto de cada lingote es de Ø26 × 270 mm, pero las de maquinado para la obtención de probetas es Ø26 × 200 mm, ya que se resta 70 mm debido a la formación de rechupes. Por esto, en la preparación de probetas para ensayos de tracción, dureza y metalográficos, se muestran lingotes con esas dimensiones. El Anexo A17 muestra su plano de maquinado para la obtención de las probetas.



Figura 4.70. Lingotes obtenidos de MCM 365.0/SiC/2p.  
(Fuente: Elaboración propia)

### 4.6.3. Lingotes cilíndricos de MCMM 365.0/SiC/4p

En la Tabla 4.17 se muestran los materiales en porcentaje y masa. Además de los parámetros establecidos para la fabricación de lingotes cilíndricos 365.0/SiC/4p.

Tabla 4.17. Materiales y parámetros para la fabricación de lingotes 365.0/SiC/4p.

Cantidades en porcentaje y masa de los constituyentes principales y materiales secundarios.						
Masa de la moldura de fundición 100%	Matriz Al-Si 365.0 al 95%	Tensioactivo aro de rueda de Mg al 1% + 2gr pérdidas	Refuerzo SiC malla #400 al 4%+3gr pérdidas	Escorificante alu fundex extra al 0,5% 1ra y 2da carga	Desgasificante apartagas H7-50 al 0,25% + 7%	Afinador de grano Al5TiB al 0,2% + 0,5 g oxidación
1700 g	1615 g	19 g	71 g	8,075 g	4,32 g	3,73 g
Temperaturas referenciales para el proceso de fundición de la matriz Al-Si 365.0 y MC 365.0/SiC/4p						
Temperatura de fusión teórica 365.0	590 °C	Temperatura de colado recomendadas	700-750 °C	Temperatura de colado AlSi10-SiC recomendadas	700-760 °C	
Parámetros en el proceso de fabricación de lingotes cilíndricos vía stir casting						
tiempo de calentamiento horno-crisol-matriz	10 min		Temperatura ambiente	18 °C		
tiempo de fundición de la matriz	35 min		Temperatura de fusión de la matriz	710 °C		
tiempo de adición de Mg después de fundir la matriz	7 min		Temperatura de adición Mg	710 °C		
tiempo de adición Al5TiB después de adicionar Mg	7 min		Temperatura de adición Al5TiB	710 °C		
SiC se mantiene calentado hasta después de escorificar y desgasificar la matriz.			Temperatura de calentamiento SiC	300 °C		
tiempo de adición SiC con una rotación de las aspas sobre la matriz fundida de 500 rpm	3 min		Temperatura de la matriz al adicionar SiC	720 °C		
tiempo de agitación de la masa fundida matriz-SiC con una rotación de las aspas de 600 rpm	3 min		Temperatura de agitación de la masa fundida matriz-SiC	720 °C		
tiempo de desgasificado con campana de argón	35 s		Temperatura de la masa fundida al iniciar la desgasificación con argón	720 °C		
Se utilizó un crisol de acero de Ø101 × 190 × 13 mm. Molde de arena aglomerada. Agitador de 4 paletas planas de Ø60 × 30 × 5 mm con inclinación de 70°				Temperatura de colado composite	700 °C	

(Fuente: Elaboración propia)

La Figura 4.71 muestra los tres lingotes obtenidos de MC 365.0/SiC/4p con su respectiva codificación. Las dimensiones en bruto de cada lingote es de Ø26 × 255 mm, pero las de maquinado para la obtención de probetas es Ø26 × 200 mm, ya que se resta 55 mm debido a la formación de rechupes. Por esto, en la preparación de probetas para ensayos de tracción, dureza y metalográficos, se muestran lingotes con esas dimensiones. El Anexo A17 muestra su plano de maquinado para la obtención de las probetas.



Figura 4.71. Lingotes obtenidos de MCMM 365.0/SiC/4p.  
(Fuente: Elaboración propia)

#### 4.6.4. Lingotes cilíndricos de MCM 365.0/SiC/6p

En la Tabla 4.18 se muestran los materiales en porcentaje y masa. Además de los parámetros establecidos para la fabricación de lingotes cilíndricos 365.0/SiC/6p.

Tabla 4.18. Materiales y parámetros para la fabricación de lingotes 365.0/SiC/6p.

Cantidades en porcentaje y masa de los constituyentes principales y materiales secundarios						
Masa de la moldura de fundición 100%	Matriz Al-Si 365.0 al 93%	Tensioactivo aro de rueda de Mg al 1% + 2 g pérdidas	Refuerzo SiC malla #400 al 6% + 3 g pérdidas	Escorificante alu fundex extra al 0.5% 1ra y 2da carga	Desgasificante apartagas H7-50 al 0,25% + 7%	Afinador de grano Al5TiB al 0,2% + 0,5 g oxidación
1700 g	1581 g	19 g	105 g	7,905 g	4,229 g	3,662 g
Temperaturas referenciales para el proceso de fundición de la matriz Al-Si 365.0 y MC 365.0/SiC/6p						
Temperatura de fusión teórica 365.0	590 °C	Temperatura de colado recomendadas	700-750 °C	Temperatura de colado AlSi10-SiC recomendadas	700-760 °C	
Parámetros en el proceso de fabricación de lingotes cilíndricos vía stir casting						
tiempo de calentamiento horno-crisol-matriz			10 min	Temperatura ambiente		18 °C
tiempo de fundición de la matriz			35 min	Temperatura de fusión de la matriz		710 °C
tiempo de adición de Mg después de fundir la matriz			7 min	Temperatura de adición Mg		710 °C
tiempo de adición Al5TiB después de adicionar Mg			7 min	Temperatura de adición Al5TiB		710 °C
SiC se mantiene calentado hasta después de escorificar y desgasificar la matriz.				Temperatura de calentamiento SiC		300 °C
tiempo de adición SiC con una rotación de las aspas sobre la matriz fundida de 500 rpm			3 min	Temperatura de la matriz al adicionar SiC		720 °C
tiempo de agitación de la masa fundida matriz-SiC con una rotación de las aspas de 600 rpm			3 min	Temperatura de agitación de la masa fundida matriz-SiC		720 °C
tiempo de desgasificado con campana de argón			35 s	Temperatura de la masa fundida al iniciar la desgasificación con argón		720 °C
Se utilizó un crisol de acero de Ø101 × 190 × 13 mm. Molde de arena aglomerada. Agitador de 4 paletas planas de Ø60 × 30 × 5 mm con inclinación de 70°				Temperatura de colado composite		700 °C

(Fuente: Elaboración propia)

La Figura 4.72 muestra los tres lingotes obtenidos de MC 365.0/SiC/6p con su respectiva codificación. Las dimensiones en bruto de cada lingote es de Ø26 × 255 mm, pero las de maquinado para la obtención de probetas es Ø26 × 200 mm, ya que se resta 55 mm debido a la formación de rechupes. Por esto, en la preparación de probetas para ensayos de tracción, dureza y metalográficos, se muestran lingotes con esas dimensiones. El Anexo A17 muestra su plano de maquinado para la obtención de las probetas.



Figura 4.72. Lingotes obtenidos de MCM 365.0/SiC/6p.  
(Fuente: Elaboración propia)

#### 4.6.5. Lingotes cilíndricos previo maquinado para la preparación de probetas

Una vez fabricados los lingotes cilíndricos se procede a cortar su canal de alimentación, quedando únicamente los lingotes en bruto, posteriormente se los codifica según el ítem 4.3. En la Figura 4.73 se muestra los 12 lingotes obtenidos previa preparación de probetas mediante maquinado en torno.



Figura 4.73. Lingotes cilíndricos previa preparación de probetas.  
(Fuente: Elaboración propia)

#### 4.7. Preparación de probetas para ensayo de tracción

Una vez fabricados los lingotes cilíndricos, un total de 12, como se muestra en la Tabla 4.13, se procede a su mecanizado por arranque de viruta mediante torno, obteniéndose las probetas que serán realizadas los ensayos de tracción. La Figura 4.74 muestra un ejemplo del mecanizado a realizarse al lingote para obtener una probeta ET4.3-365.0/SiC/6p para su posterior ensayo de tracción.

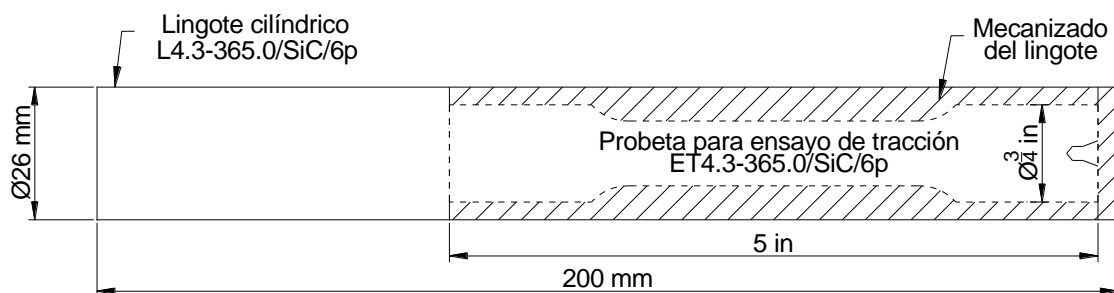
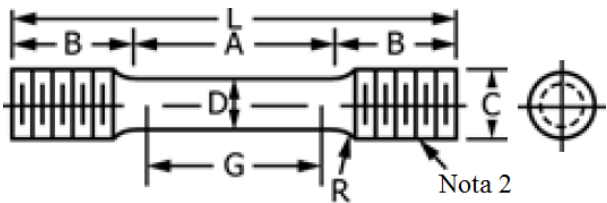


Figura 4.74. Probeta ET4.3-365.0/SiC/6p para ensayo de tracción obtenida a partir de un lingote cilíndrico L4.3-365.0/SiC/6p.  
(Fuente: Elaboración propia)

Las dimensiones que se debe mecanizar al lingote para obtener las probetas son mostradas en la Tabla 4.19. Estas dimensiones están en función de la norma para ensayos de tracción ASTM E8/E8M-16a [85]. A partir de ella se decidió elaborar probetas de formas cilíndricas, con extremos roscados, y con una longitud de calibración de la probeta de 4 veces su diámetro, estas probetas pertenecen al espécimen 1 de la norma.

Tabla 4.19. Dimensiones de la probeta para ensayo de tracción según norma ASTM E8/E8M-16a.

 <p>Nota 2: En muestras, toda rosca estándar es permisible ya que establece la alineación y una ayuda adecuada para asegurar que la muestra se rompa dentro de la sección reducida. Para las probetas se utilizara rosca normalizada UNS (Unified National Standard) de la serie UNC (Unificada Nacional Gruesa), con designación <math>\frac{3}{4}</math>-10UNC-2A</p>	G Longitud de calibración	50±0.1mm
	D Diámetro	12.5±0.2 mm
	R Radio de filete	10 mm
	A Longitud de la sección reducida	56 mm
	L Longitud total aproximada	126 mm
	B Longitud del tramo final	35 mm
	C Diámetro de la sección final	20 mm

Una vez preparadas las 12 probetas, serán realizadas a cada una de ellas su respectivo ensayo de tracción estándar, con lo cual se obtendrá: el diagrama esfuerzo-deformación ingenieril, carga máxima, resistencia a la tracción (resistencia última), esfuerzo de fluencia y % de elongación.

Para determinar el esfuerzo de fluencia o de cedencia del material, se aplica el concepto de fluencia convencional o desplazada, o esfuerzo de fluencia al 0.2% offset, a partir del diagrama esfuerzo-deformación ingenieril, debido a que en el aluminio y sus aleaciones, esta resistencia no se detecta con facilidad.

#### 4.8. Preparación de probetas para ensayo de dureza

Una vez obtenidas las probetas para los ensayos de tracción, del material sobrante de los lingotes, se continua con el mecanizado por arranque de viruta mediante torno, obteniéndose las probetas ED1.1-365.0, ED2.1-365.0/SiC/2p, ED3.1-365.0/SiC/4p, ED4.1-365.0/SiC/6p, para su ensayo de dureza. En la Figura 4.75 se muestra un ejemplo del mecanizado a realizarse al lingote para obtener una probeta ED4.1-365.0/SiC/6p para su posterior ensayo de dureza. Las dimensiones de esta probeta son  $\varnothing 25 \times 30$  mm.

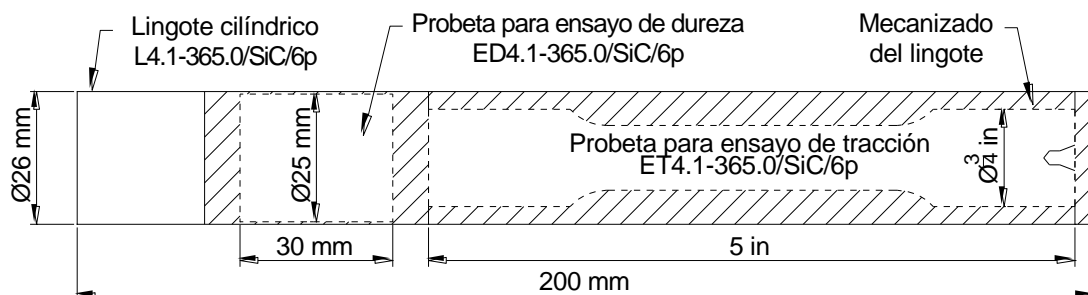


Figura 4.75. Probeta ED4.1-365.0/SiC/6p para ensayo de dureza obtenida a partir del lingote cilíndrico L4.1-365.0/SiC/6p.  
(Fuente: Elaboración propia)

A pesar de que la norma para ensayos de dureza Brinell ASTM E10-15a [86], en su literal 6.1, menciona que no establece una forma o tamaño estándar para la obtención de una probeta, en cambio, en su literal 6.1.1, si recomienda que el espesor del material a ensayar deberá ser por lo menos diez veces la profundidad de la indentación, pudiéndose utilizar como guía la tabla 4 de su norma para determinar una profundidad de indentación a partir del diámetro de bola a utilizarse.

Tomando en cuenta esta recomendación, se procede a establecer el diámetro de la bola de indentación con la que se va a trabajar. Para los materiales fabricados en este proyecto de investigación la bola de indentación tendrá un diámetro de 10 mm, lo que según la tabla 4 de la norma ASTM E10-15a puede dejar una altura de indentación de 2.6 mm. Entonces las medidas aproximadas de la probeta para el ensayo de dureza Brinell son de  $\varnothing 25 \times 30$  mm, como se muestra en la Figura 4.75, que es más de diez veces la altura de indentación. Además, se deberá tener en cuenta al momento de preparar la probeta, que su superficie deberá ser bien pulida y plana. Para esto el tratamiento de la superficie se lo ha realizado como un pulido metalográfico con lijas # 240, 600 y 1500.

Una vez preparadas las probetas, serán realizadas a cada una de ellas su respectivo ensayo de dureza, tomando en cuenta los puntos 7.5, 7.6, 7.7 y 7.8 de su norma ASTM E10-15a. Además, por medio de la tabla 3 condiciones de ensayo y recomendaciones del rango de dureza, expuestos en la norma, se determina el valor nominal de la fuerza de ensayo para la indentación en el material, en base al diámetro de la bola seleccionada anteriormente. Lo que da como resultado la selección de fuerza de ensayo de 500Kgf, para rangos de dureza de 15.9 a 109HBW. El número de indentaciones a realizarse en una muestra serán siete, y se descartarán dos (una medida de mayor diámetro y una de menor diámetro de indentación), quedando 5 indentaciones para determinar su dureza.

A cada diámetro de indentación, dejado por la bola de wolframio en la superficie de la probeta, se calcula su valor de dureza mediante la tabla del número de dureza Brinell mostrada en el apéndice X1 de su norma ASTM E10-15a. La tabla está en función de la carga nominal aplicada y el diámetro de la bola de indentación. Estos dos parámetros para la realización del ensayo de dureza a las probetas serán:

$F = 500\text{Kg} = 4903\text{N}$ , carga seleccionada para realizar la indentación al material.

$D = 10\text{mm}$ , diámetro seleccionado para la bola de indentación de wolframio.

$d$  = diámetro dejado por la bola de indentación al aplicar la carga.

La dureza Brinell de la probeta será el promedio de las durezas calculadas a las cinco indentaciones, como lo muestra la Ecuación 4.1.

$$\overline{HB} = HB1 + HB2 + HB3 + HB4 + HB5 \quad (4.1)$$

#### 4.9. Preparación de probetas para ensayo metalográfico mediante microscopio óptico

Una vez obtenidas las probetas para los ensayos de tracción, del material sobrante de los lingotes, se continua con el mecanizado por arranque de viruta mediante torno, obteniéndose las probetas EMO1.3-365.0, EMO2.3-365.0/SiC/2p, EMO3.3-365.0/SiC/4p, EMO4.3-365.0/SiC/6p, para su ensayo metalográfico mediante microscopio óptico. En la Figura 4.76 se muestra un ejemplo del mecanizado a realizarse al lingote para obtener una probeta EMO4.3-365.0/SiC/6p para su posterior ensayo metalográfico, las dimensiones de esta probeta son  $\varnothing 25 \times 15 \text{ mm}$ .

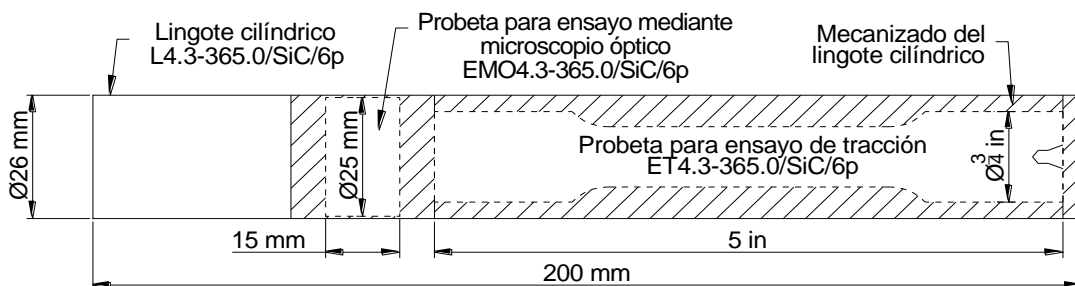


Figura 4.76. Probeta EMO4.3-365.0/SiC/6p para ensayo metalográfico mediante microscopio óptico obtenida a partir del lingote cilíndrico L4.3-365.0/SiC/6p.

(Fuente: Elaboración propia)



Las dimensiones de las probetas son obtenidas en base a la recomendación de la guía normalizada para la preparación de muestras metalográficas ASTM E3-11 [87], donde menciona, en su literal 6.1, que los especímenes a pulir por lo general tienen dimensiones aproximadas de 12 a 25 mm tanto en formas cuadradas como para circulares, y con una altura no mayor a la necesaria para un manejo cómodo durante el pulido. El pulido de las probetas se realizará por medio de una pulidora automática, posteriormente se realizará un ataque químico, para iniciar su ensayo metalográfico por medio de un microscopio óptico, en el cual se obtendrán microestructuras con aumento a 100X, con el objetivo de observar las fases formadas y la dispersión de las partículas de SiC malla #400 en la matriz aleación Al-Si 365.0, para sus respectivo análisis.

#### **4.10. Costo del proyecto de fabricación del composite**

La suma del costo de materiales mecánicos y eléctricos, costo de componentes y elementos disponibles en el mercado, costos indirectos, costo de manufactura de elementos y partes del stir casting, costo de manufactura de herramientas utilizadas para el desarrollo de pruebas preliminares y el proceso de fabricación del MC, costo de manufactura de elementos y partes utilizadas para el desarrollo de las pruebas preliminares, costo de materiales para el desarrollo de pruebas preliminares, costo de ingeniería, costo de elaboración de probetas y ensayos de laboratorio, costo de materiales para la obtención de tres lingotes cilíndricos de MC 365.0/SiC/6p y los costos de oficina y coordinación, representa el costo del proyecto de investigación para caracterizar un material compuesto de matriz aleación de aluminio silicio reforzada con partículas de carburo de silicio, a partir de la fabricación de materiales 365.0, 365.0/SiC/2p, 365.0/SiC/4p y 365.0/SiC/6p. El costo del proyecto no toma en cuenta el valor de utilización de herramientas manuales como llaves hexagonales, desarmadores, alicates, etc., horno de fundición y consumo de luz y agua para uso personal. Los costos de elaboración de probetas y ensayos de laboratorio, son valores referenciales que se cobran para el sector industrial del país.

##### **4.10.1. Costo de materiales mecánicos y eléctricos**

Los primeros costos están dados por los materiales mecánicos y eléctricos, Tabla 4.20, necesarios para la fabricación del stir casting y herramientas para el proceso de fundición, y que necesitan procesos posteriores hasta tener una forma útil. Son los materiales para la fabricación de la estructura del agitador, crisoles de acero, tapa de acero para el crisol, campana de desgasificado, cucharetas de retiro de escoria, etc.

Tabla 4.20. Costo de materiales mecánicos y eléctricos.

Materiales	Cantidad	Costo unitario USD	Costo total USD
Tubo estructural redondo Ø1½" × 2 mm × 6 m	1/2	25	12,5
Tubo estructural rectangular 50 × 25 × 3 mm × 6 m	1	25,5	25,5
Angulo de 25 × 25 × 2 mm × 6 m	1/2	25,2	12,6
Perfil estructural tipo T 20 × 30 × 2 mm × 6m	1	19	19
Platina 25 × 3 mm × 6 m	1/3	25,5	8,5
Platina 12 × 3 mm × 6 m	1/2	11,2	5,6
Tubo redondo de acero de 1/4" × 1 mm × 6 m	1/3	6	2
Tubo estructural redondo galvanizado de 3/8" × 1,5 mm × 6 m	1/3	13,5	4,5
Tubo estructural redondo galvanizado de ½" × 1,5 mm × 6 m	1/2	19,2	9,6
Tubo estructural redondo galvanizado de 1" × 1,5 mm × 6 m	1/3	36,9	12,3
Cañería de cobre flexible de Ø8 × 0,8 mm × 15 m	1/3	30	10
Eje de acero ASTM 4340 de Ø ½" × 3 m	2	10	20
Disco de acero A36 de Ø210 × 6 mm	2	8,9	17,8
Plancha de acero A36 de 40 × 30 × 8 mm	1	16,9	16,9
Varilla de construcción Ø18 mm × 6 m	1	12,2	12,2
Varilla de construcción Ø12 mm × 6 m	1	5,4	5,4
Varilla de construcción Ø8 mm × 6 m	1	2,4	2,4
Reducciones de hierro de ¾" a ½" para tubería	6	1	6
Tapón macho de hierro ½" para tubería	6	1	6
Tapón hembra de hierro ½" para tubería	6	1	6
Tubo de acero sin costuras ASTM A 106, Ø127 × 13 mm × 6 m	1/10	200	20
Acero AISI 4337 Ø130 mm × 18 mm	1	8,24	8,24
Acero AISI 4337 Ø180 mm × 25 mm	1	18	18
Copa de acero inoxidable 22 mm	1	10	10
Cable sucre # 12	6	3,5	21
Cable flexible # 12	3	0,75	2,25
		<b>Total</b>	<b>294,29</b>

(Fuente: Elaboración propia)

#### 4.10.2. Costo de componentes y elementos disponibles en el mercado

Lo conforman componentes y elementos disponibles en el mercado y que no necesitan procesos secundarios para poder ser utilizados. La Tabla 4.21 presenta estos costos.

Tabla 4.21. Costos de componentes y elementos disponibles en el mercado.

Componentes y elementos	Cantidad	Costo unitario USD	Costo Total USD
Motor Siemens 3PH-0,4 kW-60 Hz	1	125	125
Variador de frecuencia Delta 1 PH/3 PH-1,5 kW-50 Hz/60 Hz	1	250	250
Enchufe tipo industrial	1	7,5	7,5
Interruptor trifásico de encendido	1	6,80	6,8
Terminales eléctricos tipo riel	1	1,3	1,3
Multímetro digital DT9208A	1	19,5	19,5
Termocuplas tipo K	6	5,5	33
Controlador de temperatura digital Maxwell MTB-48	1	52,27	52,27
Termocupla tipo K probeta	1	12,33	12,33
Perno hexagonal 3/8"-16UNC × 1½"	10	0,1	1
Perno hexagonal 3/8"-16UNC × 1"	8	0,1	0,8
Tuerca hexagonal 3/8"-16UNC	10	0,03	0,3
Tuerca tipo mariposa 3/8"-16UNC	8	0,05	0,4
Perno hexagonal 5/8"-11UNC × 2¾"	6	1	6
Tuerca hexagonal 5/8"-11UNC	6	0,35	2,1
Arandela de presión 5/8"	6	0,2	1,2
Arandela plana 5/8"	6	0,07	0,42
Válvula reguladora GLP 0,5-4 bar, 12 kg/h, 16 bar máx.	1	20	20
Rodamiento de brida NSK UCP201-08.	1	12	12
Crisol arcilla-grafito diamant #18	2	80	160
Plato de arcilla Ø260 mm	3	3,5	10,5
Olla y tapa de arcilla Ø240 × 100 × 9 mm	1	5	5
Ollita de arcilla Ø65 × 70 × 7 mm	3	0,6	1,8
Recipiente de arcilla Ø135 × 55 × 8 mm	3	1,5	4,5
		<b>Total</b>	<b>733,72</b>

(Fuente: Elaboración propia)

### 4.10.3. Costos indirectos

Estos costos lo integran los materiales, elementos, componentes y servicios, que están involucrados de forma indirecta. En la tabla 4.22 se muestran los costos indirectos.

Tabla 4.22. Costos indirectos.

Materiales, elementos, componentes, servicios	Cantidad	Costo unitario USD	Costo total USD
Envase de polvo desengrasante lava	1	1,31	1,31
Cepillo de alambre manual	5	1	5
Juego de cepillos pequeños manuales de cerdas de acero y bronce	1	1	1
Juego de cepillo circular de alambre para taladro	1	6	6
Juego de piedras de desbaste para taladro manual	1	7	7
Costalillo 25 kg de magnesita hormigón refractario sílice-alúmina	1	25,31	25,31
Pintura refractaria INJEMAQ AL 397	1 Kg	14,42 USD/Kg	14,42
Cucharas de acero inoxidable	10	0,33	3,3
Cucharetas perforada de acero inoxidable	3	2,64	7,92
Hoja de sierra 300-24TPI para corte para acero	12	0,7	8,4
Manguera para GLP de alta presión	7 m	0,75 USD/m	5,25
Electrodos E6011	6 Kg	1,8 USD/Kg	10,8
Electrodo 7018	2 Kg	2,2 USD/Kg	4,4
Juego de Brocas de acero 8 mm a 14 mm	1	30	30
Juego de Brocas de acero 3/16 a 1/2	1	35	35
Juego de Brocas de acero 16 a 25 mm	1	35	35
Broca de acero-cobalto 5/64"	4	2	8
Broca de cobalto de 1/4"	3	3,20	9,6
Broca de cobalto de 3/8"	2	7,50	15
Broca de cobalto de 1/2"	2	4,45	8,9
Broca de cobalto de 5/8"	1	5,70	5,7
Broca de cobalto de 3/4"	1	7,30	7,3
Juego de machuelos M5	1	9	9
Envoltura de film aluminio (papel aluminio)	2	1	2
Modelo de madera 270 × 370 × 130 mm para elaboración del molde de arena aglomerada	1	45	45
Sierra de acero circular de 14"	1	58,30	58,3
Disco de corte 178 × 1,6 × 22,2 mm	5	4,10	20,5
Disco de corte 115 × 1,6 × 22,2 mm	5	2,8	14
Disco de desbaste 115 × 6,3 × 22,2 mm	3	4,5	13,5
Disco laminado 115 × 22,2 grit #120	1	13	13
Grata tipo copa Ø75mm M14 con hilos de acero trenzado	1	4	4
Cepillo tipo copa Ø19mm con hilos de acero 0,3mm para taladro	2	3	6
Lija de SiC #120 hoja de 230 × 280 mm	1	0,35	0,35
Lija de SiC #180 hoja de 230 × 280 mm	1	0,35	0,35
Lija de SiC #240 hoja de 230 × 280 mm	1	0,40	0,4
Lija de SiC #360 hoja de 230 × 280 mm	1	0,45	0,45
Lija de SiC #600 hoja de 230 × 280 mm	1	0,50	0,5
Lija de SiC #1000 hoja de 230 × 280 mm	1	0,60	0,6
Lija de SiC #1500 hoja de 230 × 280 mm	1	0,70	0,7
Cinta eléctrica aislante	2	0,65	1,3
Rollo de lana de vidrio 1200 × 600 × 50 mm, 750 °C	1	20	20
Monocrystalline diamond suspension 1 um, metkon 250 ml	1	185	185
		<b>Total</b>	<b>649,56</b>

(Fuente: Elaboración propia)

### 4.10.4. Costo de manufactura de elementos y partes del stir casting

Estos costos están relacionados con los procesos de manufactura de elementos y partes que conforman el stir casting, los cuales para su manufactura emplea los materiales mecánicos y eléctricos, además de los componentes disponibles en el mercado. El costo de cada actividad en el proceso de manufactura está determinado según el mercado industrial donde se requiere manejo de máquinas herramientas así como el salario básico

unificado. El proceso de manufactura es realizada por los autores de este proyecto de investigación. En la Tabla 4.23 se muestra estos costos.

Tabla 4.23. Costo de manufactura de elementos y partes del stir casting.

Elementos y partes	Proceso de manufactura o de fabricación	Tiempo en horas	Costo USD/h	Costo de actividad USD	Costo total USD
Estructura del agitador	Corte con disco de los tubos estructurales circular y rectangular	4	2,45	9,8	83,69
	Corte con disco del perfil estructural tipo T	0,8	2,45	1,96	
	Corte con disco de la platina	0,8	2,45	1,96	
	Elaboración de orificios con taladro manual de la platina	0,8	2,33	1,864	
	Soldadura eléctrica SMAW de todos las partes de la estructura	6	10	60	
	Retiro de escoria en cordones de soldadura con cepillo manual de acero	0,5	2,23	1,115	
	Elaboración de orificios con taladro manual del tubo estructural circular	1,5	2,33	3,495	
	Elaboración de orificios con taladro manual del tubo estructural rectangular	1,5	2,33	3,495	
Estructura solidaria del motor	Corte de plancha A36 de 8mm por plasma según forma indicada	0,3	60	18	45,55
	Elaboración de orificios con taladro manual de la plancha con broca de ½"	0,8	2,33	1,864	
	Corte con disco de tubo estructural Ø 3" del bocín guía	1,5	2,45	3,675	
	Construcción de la abrazadera de para fijación del bocín	2	2,23	4,46	
	Soldadura SMAW de las partes para formar la estructura del motor	1,5	10	15	
	Retiro de escoria en cordones de soldadura con cepillo manual de acero	0,1	2,23	0,223	
	Elaboración de orificios con taladro manual del bocín y abrazadera.	1	2,33	2,33	
Estructura para soporte de la chumacera	Corte con disco del perfil estructural tipo T	1	2,45	2,45	17,06
	Elaboración de orificios con taladro manual de los perfiles tipo T	1,5	2,33	3,495	
	Soldadura eléctrica SMAW de los perfiles	1	10	10	
	Retiro de escoria en cordones de soldadura con cepillo manual de acero	0,5	2,23	1,115	
Acople eje motor-eje agitador	Perforado axial en torno del eje de acero	0,33	15	4,95	12,52
	Refrentado de caras del eje de acero	0,33	15	4,95	
	Elaboración de orificio transversal con taladro pedestal para la rosca M5	0,5	3	1,5	
	Roscado con machuelo M5 para el alojamiento de perno prisionero M5	0,5	2,23	1,115	
Agitador según dimensiones del crisol acero	Refrentado del eje del agitador	0,25	15	3,75	30,73
	Cilindrado en el extremo del eje para el acople con otras partes de rotación	0,25	15	3,75	
	Corte con disco de la hoja de resorte de ballesta para obtención de aspas	1,5	2,45	3,675	
	Redondeado de bordes de las aspas con piedra de desbaste para taladro	0,5	3	1,5	
	Soldadura eléctrica SMAW de las aspas al eje de agitación	1,75	10	17,5	
	Retiro de escoria en cordones de soldadura con cepillo manual de acero	0,25	2,23	0,558	
Tapa del crisol	Refrentado de disco circular de acero A-36 de Ø210 × 6 mm	1	15	15	31,35
	Perforado en el centro del disco circular mediante torno	0,1	15	1,5	
	Elaboración de orificios con taladro pedestal del disco circular	1	3	3	
	Corte con hoja de sierra del tubo de 1/2" para adición del SiC	0,1	2,23	0,223	
	Corte con hoja de sierra de tubo de 3/8" para protección de termocupla	0,1	2,23	0,223	
	Corte con disco de la plancha de acero de 2 mm para formación de cono	0,3	2,45	0,735	
	Doblado manual de la plancha para formar cono de adición de SiC	0,6	2,23	1,338	
	Soldadura SMAW para el cierre del cono	0,25	10	2,5	
	Soldadura SMAW de los tubos y cono en el disco circular	0,5	10	5	
	Retiro de escoria en cordones de soldadura con cepillo manual de acero	0,3	2,23	0,669	
Limpieza de la tapa fabricada con cepillo de hilos de acero para taladro	0,5	2,33	1,165		
Crisol de acero tipo ensamble (fundiciones)	Corte con disco del tubo circular sin costuras ASTM A según medida	0,25	2,45	0,613	58,58
	Torneado para planitud de las caras del tubo circular sin costuras de acero	0,75	15	11,25	
	Torneado para planitud de la tapa circular base de acero AISI 4337	1,5	15	22,5	
	Elaboración de 4 orificios con taladro pedestal en la tapa circular base	1,5	3	4,5	
	Corte con disco de varilla de construcción para soportes de sujeción	0,1	2,45	0,245	
	Soldadura MIG de los pernos 5/8-11UNC × 2" en el tubo circular	1,5	10	15	
	Soldadura SMAW de soportes de sujeción del crisol	0,25	10	2,5	
	Ensamble tubo-tapa mediante ajuste tuerca-arandela de presión-perno	0,25	2,23	0,558	
	Retiro de escoria en cordones de soldadura con cepillo manual de acero	0,1	2,23	0,223	
	Limpieza del crisol con grata tipo copa	0,25	2,45	0,613	
	Limpieza del interior del crisol con cepillo de hilos para taladro	0,25	2,33	0,583	
<b>Total</b>					<b>279,48</b>

(Fuente: Elaboración propia)

#### 4.10.5. Costo de manufactura de herramientas utilizadas para el desarrollo de pruebas preliminares y el proceso de fabricación del composite

Estos costos, Tabla 4.24, están relacionados con la manufactura de las herramientas que se utilizaron en las pruebas preliminares para establecer un proceso de fabricación de lingotes cilíndricos de MC, como de las fundiciones finales para la fabricación del MC. El

costo de cada actividad en el proceso de manufactura está determinado según el mercado industrial donde se requiere manejo de máquinas herramientas, así como el salario básico unificado cuando son actividades manuales. El proceso de manufactura es realizada por los autores de este proyecto de investigación.

Tabla 4.24. Costo de manufactura de herramientas utilizadas para el desarrollo de pruebas preliminares y el proceso de fabricación del MC.

Herramienta	Proceso de fabricación o de manufactura	Tiempo en horas	Costo USD/h	Costo de actividad USD	Costo USD	#	Costo total USD
Campana de hierro para adición del escorificante alu fundex extra	Corte con disco de la varilla de construcción	0,1	2,45	0,245	3,58	2	7,16
	Perforado con taladro pedestal de orificios en la reducción de hierro	0,5	3	1,5			
	Soldadura SMAW de varilla de construcción-reducción de hierro	0,1	10	1			
	Retiro de escoria en cordón de soldadura con cepillo manual de acero	0,1	2,23	0,223			
	Limpieza con grata de la herramienta fabricada	0,25	2,45	0,613			
Campana de hierro para adición del desgasificante apartagas	Corte con disco de la varilla de construcción	0,1	2,45	0,245	3,58	2	7,16
	Elaboración de orificios con taladro pedestal en la reducción de hierro	0,5	3	1,5			
	Soldadura SMAW de varilla de construcción-reducción de hierro	0,1	10	1			
	Retiro de escoria en cordón de soldadura con cepillo manual de acero	0,1	2,23	0,223			
	Limpieza con grata de la herramienta fabricada	0,25	2,45	0,613			
Cuchara de agitación y retiro de escoria	Corte con disco de la varilla de construcción	0,1	2,45	0,245	2,08	10	20,8
	Soldadura SMAW de varilla de construcción- cuchara de acero	0,1	10	1			
	Retiro de escoria en cordón de soldadura con cepillo manual de acero	0,1	2,23	0,223			
	Limpieza con grata de la herramienta fabricada	0,25	2,45	0,613			
Cuchareta perforadas de retiro de escoria	Corte con disco de la varilla de construcción	0,1	2,45	0,245	2,08	3	6,24
	Soldadura SMAW de varilla de construcción- cuchareta de acero	0,1	10	1			
	Retiro de escoria en cordón de soldadura con cepillo manual de acero	0,1	2,23	0,223			
	Limpieza con grata de la herramienta fabricada	0,25	2,45	0,613			
Buje con placa circular perforada para retiro de escoria	Corte con disco de la varilla de construcción	0,1	2,45	0,245	2,08	1	2,08
	Soldadura SMAW de varilla de construcción- buje de acero	0,1	10	1			
	Retiro de escoria en cordón de soldadura con cepillo manual de acero	0,1	2,23	0,223			
	Limpieza con grata de la herramienta fabricada	0,25	2,45	0,613			
Pala de apoyo para el colado	Doblado de la placa de acero para obtener forma de la pala de acero	0,5	2,23	1,115	3,20	1	3,20
	Corte con disco de la varilla de construcción	0,1	2,45	0,245			
	Soldadura SMAW de varilla de construcción- buje de acero	0,1	10	1			
	Retiro de escoria en cordón de soldadura con cepillo manual de acero	0,1	2,23	0,223			
	Limpieza con grata de la herramienta fabricada	0,25	2,45	0,613			
Campana de adición de magnesio	Corte manual de varilla construcción Ø8 × 17 mm	0,15	2,23	0,335	2,51	1	2,51
	Limpieza de la copa de acero inoxidable 22 mm	0,15	2,23	0,335			
	Soldadura varilla construcción-copa	0,15	10	1,5			
	Limpieza de la campana con cepillo manual de acero	0,15	2,23	0,335			
Campana de adición de afinador de grano	Corte varilla construcción Ø8 mm × 17 mm	0,15	2,23	0,335	3,26	1	3,26
	Taladrado Ø10 × 3 mm en la cabeza de la campana de acero inoxidable	0,25	3	0,75			
	Limpieza de la cabeza de la campana con cepillo manual de acero	0,15	2,23	0,335			
	Soldadura varilla construcción-cabeza de campana	0,15	10	1,5			
	Limpieza de la campana con cepillo manual de acero	0,15	2,23	0,335			
Campana de gas argón	Ensamble de tapón macho y hembra de hierro ½" para tubería	0,1	2,23	0,223	7,11	2	14,22
	Elaboración de 18 orificios con broca 5/64" con taladro manual	1,5	2,23	3,345			
	Elaboración de orificio con taladro pedestal para ingreso de argón	0,2	3	0,6			
	Corte con hoja de sierra del tubo de acero de Ø8 mm	0,1	2,23	0,223			
	Soldadura SMAW de elementos	0,25	10	2,500			
	Retiro de escoria en cordón de soldadura con cepillo manual de acero	0,1	2,23	0,223			
<b>Total</b>							<b>66,63</b>

(Fuente: Elaboración propia)

#### 4.10.6. Costo de manufactura de elementos y partes utilizadas para el desarrollo de las pruebas preliminares

Estos costos, Tabla 4.25, están relacionados con los procesos de manufactura de elementos y partes necesarios para el desarrollo de las pruebas preliminares, los cuales para su manufactura es necesaria la utilización de materiales mecánicos y componentes disponibles en el mercado. El proceso de manufactura es realizada por los autores de este proyecto de investigación.

Tabla 4.25. Costo de manufactura de elementos y partes utilizados para las pruebas preliminares.

Elementos y partes	Proceso de manufactura o de fabricación	Tiempo en horas	Costo USD/h	Costo de actividad USD	Costo USD	#	Costo total USD
Tapa del stir casting	Corte circular de plancha A36 de 1,5 mm mediante plasma	0,15	60	9			
	Taladrado manual de la plancha circular para realización de orificios	0,75	2,23	1,673			
	Corte con disco de platinas formar la periferia circular de la tapa	1,5	2,45	3,675			
	Doblado de platinas según forma circular de la tapa	2,5	2,23	5,575			
	Corte con disco de platinas para alojamiento del polvo SiC	0,5	2,45	1,225			
	Corte con hoja de sierra de tubo para adición de SiC	0,1	2,23	0,223	63,32	1	63,32
	Corte con disco de varilla de construcción para agarradera de la tapa	0,25	2,45	0,613			
	Doblado manual de la varilla para agarraderas de la tapa	0,5	2,23	1,115			
	Soldadura SMAW de elementos para formación de la tapa	4	10	40			
Inserción de lana de vidrio en el recinto	0,1	2,23	0,223				
Estructura de acero para el calentamiento del polvo SiC	Corte con disco de ángulos y varillas de construcción para la estructura	1,25	2,45	3,063			
	Doblado circular manual de la varilla de construcción	1	2,23	2,230			
	Soldadura SMAW de elementos	0,75	10	7,5	13,24	1	13,24
	Retiro de escoria en cordones de soldadura con cepillo manual	0,2	2,23	0,446			
Embudo de adición de SiC	Corte con disco de la plancha de acero de 1,5 mm	0,25	2,45	0,613			
	Doblado de plancha en forma de cono	1	2,23	2,23			
	Corte con disco del tubo circular de ½” para adición del polvo SiC	0,1	2,45	0,245			
	Corte con disco del tubo estructural rectangular para soporte	0,1	2,45	0,245			
	Corte con disco del tubo estructural circular para soporte	0,2	2,45	0,49	17,71	1	17,71
	Soldadura SMAW para el cierre del cono	0,25	10	2,5			
	Soldadura SMAW de todos los componentes	1	10	10			
	Retiro de escoria en cordones de soldadura con cepillo manual	0,1	2,23	0,223			
Limpieza del embudo con cepillo de hilos para taladro	0,5	2,33	1,165				
Agitador según dimensiones del crisol cerámico	Corte con disco de la hoja de resorte de ballesta para obtener aspas	1,5	2,45	3,675			
	Redondeado de bordes de las aspas con piedra de para taladro	0,5	3	1,5	23,23	5	116,15
	Soldadura eléctrica SMAW de las aspas-eje de agitación	1,75	10	17,5			
	Retiro de escoria en cordones de soldadura con cepillo manual	0,25	2,23	0,558			
Molde de arena aglutinante	Preparación de la arena	0,2	2,23	0,446			
	Preparación de la caja de moldeo y modelos	0,1	2,23	0,223			
	Elaboración de la primera mitad y segunda mitad del molde de arena	2	2,23	4,46	5,91	10	59,1
	Ensamble de las dos mitades del molde de arena	0,1	2,23	0,223			
Molde de arena aglomerante	Secado del molde con antorcha de GLP	0,25	2,23	0,558			
	Retiro de arena y suciedad en el molde	0,1	2,23	0,223			
Molde de arena aglomerante	Aplicación de pegamento en las guías macho y hembra del molde	0,12	2,23	0,268	0,759	2	1,518
	Acople de las guías para ensamble de las mitades del molde	0,1	2,23	0,223			
	Corte con disco de la barra sólida	0,1	2,45	0,245			
Lanza en forma de T para el desgasificado	Elaboración de orificios con taladro pedestal	1	3	3			
	Soldadura en T de las barras sólidas	0,1	10	1	5,03	1	5,03
	Retiro de escoria en cordones de soldadura con cepillo manual	0,1	2,23	0,223			
	Limpieza de la lanza con cepillo manual de acero	0,25	2,23	0,558			
	Corte con disco de la varilla de construcción y bulones de pistón	0,2	2,45	0,49			
Lanza de desgasificado rediseñada	Soldadura de varilla de construcción-bulones	0,1	10	1	2,27	1	2,27
	Retiro de escoria en cordones de soldadura con cepillo manual	0,1	2,23	0,223			
	Limpieza de la lanza con cepillo manual de acero	0,25	2,23	0,558			
	Corte con disco de la hoja de resorte de ballesta para obtener aspas	1,5	2,45	3,675			
Agitador según dimensiones del crisol de acero	Redondeado de bordes de las aspas con piedra de para taladro	0,5	3	1,5	23,23	2	46,46
	Soldadura eléctrica SMAW de las aspas-eje de agitación	1,75	10	17,5			
	Retiro de escoria en cordones de soldadura con cepillo manual	0,25	2,23	0,558			
	Corte con disco del tubo circular sin costuras de acero según medida	0,25	2,45	0,613			
Crisol de acero	Torneado para planitud de las caras del tubo circular sin costuras	0,75	15	11,25			
	Torneado para planitud de la tapa circular base de acero AISI 4337	1	15	15			
	Corte con disco de varilla de construcción para soportes de sujeción	0,1	2,45	0,245	48,83	1	48,83
	Soldadura SMAW de la tapa circular y soportes en el tubo circular	2	10	20			
	Retiro de escoria en cordones de soldadura con cepillo manual	0,25	2,23	0,558			
	Limpieza del crisol con grata tipo copa	0,5	2,33	1,165			
	Refrentado de disco circular de acero A-36 de Ø 210 × 6 mm	1	15	15			
	Elaboración de orificio en el centro del disco mediante torno	0,1	15	1,5			
Tapa de crisol cerámico	Elaboración de orificios con taladro tipo pedestal en el disco circular	1	3	3			
	Corte con disco de platina para recinto de alojamiento del SiC	0,1	2,45	0,245			
	Doblado manual de las platinas de alojamiento del SiC	0,1	2,23	0,223			
	Corte con disco de varilla de construcción para mango de la tapa	0,1	2,45	0,245			
	Doblado manual de la varilla de construcción	0,1	2,23	0,223	32,06	1	32,06
	Corte con hoja de sierra del tubo de ½” para adición del SiC	0,1	2,23	0,223			
	Corte con disco de la plancha de acero para formación de cono	0,3	2,45	0,735			
	Doblado manual de la plancha para formar cono de adición de SiC	0,6	2,23	1,338			
	Soldadura SMAW para el cierre del cono	0,25	10	2,5			
	Soldadura SMAW del tubo, cono, platinas y varilla, en el disco	0,5	10	5			
	Retiro de escoria en cordones de soldadura con cepillo manual	0,3	2,23	0,669			
	Limpieza de tapa fabricada con cepillo de hilos de acero para taladro	0,5	2,33	1,165			
	Mantenimiento del horno de fundición	Preparación a polvo del hormigón refractario magnesita	3	2,23	6,69		
Enlucido de la pared interna del horno de fundición con magnesita		3	2,23	6,69			
Enlucido de la tapa del horno de fundición con magnesita		0,5	2,23	1,115	27,88	1	27,88
Instalación de válvula reguladora de presión		2	2,23	4,46			
Cambio de manguera de gas industrial		1	2,23	2,23			
Sellado de las uniones del sistema de aire con tira de caucho		1	2,23	2,23			
Instalación de una base metálica para el venterol		2	2,23	4,46			
<b>Total</b>							<b>433,57</b>

(Fuente: Elaboración propia)

#### 4.10.7. Costo de materiales para el desarrollo de pruebas preliminares

Estos costos involucran los constituyentes principales, materiales secundarios, gas argón, tanque de GLP, consumo de energía eléctrica, arena aglutinada que tiene un costo aproximado de reutilización de 0,33 USD el kilogramo, y el molde de arena aglomerada que se toma su costo de fabricación debido a que fue adquirido como un servicio. Hay que recalcar que los moldes de arena aglomerada fueron fabricados gratuitamente por la industria FUNDIRECICLAR, sin embargo, para cuantificar el costo total de este proyecto de investigación, se ha puesto un valor aproximado de 6 USD por molde. También no se ha contabilizado el tiempo que empleado en realizar las fundiciones ya que su costo fue tomado en cuenta en los costos de ingeniería. En la Tabla 4.26 se muestran estos costos.

Tabla 4.26. Costo de materiales para el desarrollo de las pruebas preliminares.

Constituyentes, materiales y energía	Cantidad	Costo unitario	Costo total USD
Pistones para blocks de cilindros de motores de combustión interna	16,626 kg	1,21 USD/kg	20,11
Block Honda Civic Al-Si 365.0 (chatarra)	3,128 kg	1,21 USD/kg	3,785
Polvo de SiC malla #400	1,107 kg	9,92 USD/kg	10,981
Polvo de Mg	24,4 g	0,6 USD/g	14,64
Aro de rueda de Mg (93%Mg-7%Al) (chatarra)	0,0854 kg	1,21 USD/kg	0,103
Alufundex extra (polvo)	0,0961 kg	4,96 USD/kg	0,477
Apartagas H-50 (pastilla)	0,0445 kg	11,36 USD/kg	0,506
Afinador de grano Al5TiB (varilla)	0,126 kg	4 USD/kg	0,504
Gas argón insuflado a un caudal de 2,5 LPM	0,00146 m <sup>3</sup>	20 USD/m <sup>3</sup>	0,03
Tanque de GLP 15 kg	8 tanques	2 USD/tanque	16
Consumo de energía de la resistencia eléctrica de 2240 W para el calentamiento del polvo SiC por 0,5 h (5 pruebas preliminares)	5,6 kWh	0,09 USD/kWh	0,371
Consumo de energía variador de frecuencia 1,5 W para la agitación de aspas con un promedio de agitación de 0,25 h por prueba (11 pruebas)	4,125 kWh	0,09 USD/kWh	0,411
Consumo de energía del venterol de 550 W durante aproximadamente 1,15 h en cada prueba preliminar	8,938 kWh	0,09 USD/kWh	0,804
Arena aglutinada reciclada y reutilizada en las pruebas preliminares	15Kg	0,33 USD/kg	4,95
Molde de arena aglomerada 240 × 340 × 100 mm, 9,74 kg	2 moldes	7 USD/molde	14
		<b>Total</b>	<b>87,67</b>

(Fuente: Elaboración propia)

#### 4.10.8. Costo de ingeniería

En estos costos se toma en cuenta cuatro actividades: diseño mecánico, investigación científica, pruebas piloto y caracterización del MC fabricado, empleando para cada una de ellas 4 horas al día. Para la realización de cada prueba piloto se desarrolla únicamente las actividades propias del proceso de fundición como son la preparación de constituyentes principales y materiales secundarios, ubicación y limpieza de herramientas en el lugar de trabajo, proceso de fundición para la fabricación de lingotes cilíndricos de MC y posterior análisis de laboratorio de los lingotes fabricados. El costo por hora empleada en cada actividad es de 6 USD que se ha obtenido del salario que percibe un ingeniero mecánico trabajando en el sector industrial del país, que es aproximadamente 1000 USD al mes. La Tabla 4.27 muestra los costos de ingeniería.

Tabla 4.27. Costos de ingeniería.

Actividades	Tiempo en horas	Costo USD/h	Total
Diseño mecánico (diseño en Solid Works del stir casting)	168	6	1008
Investigación científica (consulta en tesis de maestría, tesis doctorales, papers, handbooks y toda clase de fuentes científicas, para sustentar teóricamente el proceso de fabricación del MC)	336	6	2016
Pruebas pilotos (se realiza pruebas preliminares respaldándose en la investigación científica, para establecer un proceso de fabricación de lingotes cilíndricos de MC, y posterior análisis de laboratorios pertinentes)	420	6	2520
Caracterización del MC (en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Mecánica se realizan pruebas de tracción, dureza y microscopia óptica, para posterior análisis de datos)	84	6	504
		<b>Total</b>	<b>6048</b>

(Fuente: Elaboración propia)

#### 4.10.9. Costo de elaboración de probetas y ensayos de laboratorio

Estos costos corresponden a la elaboración de probetas mediante maquinado en torno de los lingotes fabricados de MC, y a los ensayos realizados en los diferentes laboratorios de la universidad para caracterizar el MC, los cuales no tuvieron valor económico alguno, pero de igual forma son expuestos para conocer el costo total del proyecto de investigación. La Tabla 4.28 muestra estos costos.

Tabla 4.28. Costo de ensayos de laboratorio.

Tipo de actividad	Cantidad	Costo unitario	Costo total USD
Ensayo de espectrometría de chispa	3 muestras sólidas	50 USD/ensayo	150
Ensayo de microscopia electrónica de barrido	13 probetas que requirieron 20 horas en el microscopio	105 USD/hora	2100
Ensayo de diámetro de partículas para el SiC	1 muestra en forma de polvo	126 USD/ensayo	126
Ensayo de difracción de rayos-x	1 muestra en forma de limallas	120 USD/ensayo	120
Ensayo de tracción	14 probetas	22 USD/probeta	700
Ensayo de dureza	5 probetas a cada una se la realizó 7 indentaciones	10 USD/indentación	350
Ensayo de microscopia óptica	5 probetas	150 USD/probeta	750
Elaboración de probetas para ensayos de tracción, dureza y microscopia óptica, mediante maquinado en torno	18 lingotes cilíndricos de Ø26 × 200 mm	15 USD/lingote	270
Pulido en máquina automática metkon de las probetas para microscopia óptica	5 probetas	50 USD/probeta	250
		<b>Total</b>	<b>4816</b>

(Fuente: Elaboración propia)

#### 4.10.10. Costo de materiales para la obtención de tres lingotes cilíndricos de MC 365.0/SiC/6p

Estos costos, Tabla 4.29, involucran los constituyentes principales, materiales secundarios, tanque de GLP, gas Ar, consumo de energía de los elementos involucrados al momento de realizar la fundición, molde de arena aglomerada que es contabilizado su costo de fabricación debido a que fue adquirido como un servicio, necesarios para fabricar 3 lingotes cilíndricos de MC 365.0/SiC/6p de Ø26 × 270 mm.



Tabla 4.29. Costos de materiales para la obtención de 3 lingotes de MC 365.0/SiC/6p.

Materiales	Cantidad	Costo unitario	Precio Total USD
Block Honda Civic Al-Si 365.0 (chatarra)	1,581 kg	1,21 USD/kg	1,913
Polvo de SiC malla #400	0,105 kg	9,92 USD/kg	1,042
Aro de rueda de Mg (93%Mg-7%Al) (chatarra)	0,019 kg	1,21 USD/kg	0,023
Alufundex extra (polvo)	0,016 kg	4,96 USD/kg	0,079
Apartagas H-50 (pastilla)	0,00423 kg	11,36 USD/kg	0,048
Afinador de grano Al5TiB (varilla)	0,0037 kg	4 USD/kg	0,015
Gas argón insuflado a un caudal de 2,5 LPM	0,00146 m <sup>3</sup>	20 USD/m <sup>3</sup>	0,03
Tanque de GLP 15 kg	1/4 tanque	2	0,5
Consumo de energía de la resistencia eléctrica 2240 W para calentar el SiC por 0,5 h	1,12 kWh	0,09 USD/kWh	0,101
Consumo de energía del variador de frecuencia 1,5W para agitar las aspas por 0,1 h	0,15 kWh	0,09 USD/kWh	0,014
Consumo de energía del venterol de 550 W por un tiempo de 1,093 h	0,6 kWh	0,09 USD/kWh	0,054
Molde de arena aglomerante 240 × 340 × 100 mm; 9,74 kg	1 molde	7 USD	7
Elemento humano técnicos-fundidores (preparación y fundición)	2 horas	2,23 USD/h	4,460
		<b>Total</b>	<b>15,28</b>

(Fuente: Elaboración propia)

#### 4.10.11. Costos de oficina y coordinación

Estos costos corresponden a impresiones e insumos de oficina, comunicación telefónica, transporte de materiales y transporte personal. Su costo total aproximado es de 200 USD.

#### 4.10.12. Costo total del proyecto de investigación

El costo total del proyecto de investigación, Tabla 4.30, que incluye costo de elaboración de probetas y ensayos de laboratorio (subsidiados por los Laboratorios de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Laboratorio DEMEX) es de 13624,2 USD. En cambio, los costos asumidos en tiempo y dinero por los autores de este proyecto es de 8808,2 USD representando el mayor valor asumido y priorizando el mínimo costo para su desarrollo.

Tabla 4.30. Costo total del proyecto de investigación.

Tipo de costo	Costo total	Costo asumido por los autores del proyecto
Materiales mecánicos eléctricos y electrónicos	294,29	294,29
Componentes y elementos disponibles en el mercado	733,72	733,72
Indirectos	649,56	649,56
Manufactura de elementos y partes del stir casting.	279,48	279,48
Manufactura de herramientas para el desarrollo de pruebas preliminares y el proceso de fabricación del material compuesto.	66,63	66,63
Manufactura de elementos y partes para el desarrollo de las pruebas preliminares	433,57	433,57
Materiales para el desarrollo de pruebas preliminares	87,67	87,67
Ingeniería	6048	6048
Elaboración de probetas y ensayos de laboratorio.	4816	----
Materiales para la obtención de 3 lingotes cilíndricos de MC 365.0/SiC/6p	15,28	15,28
Oficina y coordinación.	200	200
<b>Total</b>	<b>13624,2</b>	<b>8808,2</b>

(Fuente: Elaboración propia)

## CAPÍTULO 5

### CARACTERIZACIÓN DEL LOS MATERIALES FABRICADOS

En este capítulo se presentan los resultados del ensayo de tracción, dureza, metalográficos y densidad, de las probetas de aleación 365.0; como de las probetas de los MC 365.0/SiC/2p, 365.0/SiC/4p y 365.0/SiC/6p, obtenidas de los lingotes cilíndricos que fueron fabricados por el proceso stir casting con colado en molde de arena. El objetivo es realizar su análisis y comparación de resultados. Además, para ampliar el alcance de este proyecto, se ha fabricado un MC C-365.0/SiC/6p con el mismo proceso de fabricación pero colado en molde de acero, siendo sus valores de tracción y dureza, comparados con los materiales 365.0, 365.0/SiC/2p, 365.0/SiC/4p y 365.0/SiC/6p, obteniendo resultados notorios. Finalmente se presentan las potenciales aplicaciones y comparaciones de los MC 365.0/SiC/6p y C-365.0/SiC/6p con diversos materiales.

#### 5.1. Resultados del ensayo de tracción

El ensayo de tracción se lo realizó en la máquina hidráulica universal Tinius Olsen modelo "Super L", la cual se encuentra en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la EPN. Por medio de un software que está conectado a la máquina se obtiene el diagrama esfuerzo vs deformación, carga máxima, resistencia a la tracción (resistencia última), y el % de elongación, a partir del diámetro promedio de la probeta. Los ensayos fueron realizados por personal calificado que está a cargo del laboratorio. Los diagramas esfuerzo vs deformación de las 12 probetas realizadas el ensayo de tracción se muestran en el Anexo A18, además en cada diagrama se determina el esfuerzo de fluencia o de cedencia del material, mediante el concepto de fluencia convencional o desplazada al 0.2% offset indicado en el ítem 4.7. Los resultados del ensayo de tracción realizado a las 12 probetas son mostrados en el informe técnico del Anexo A19. El módulo de Young no fue determinado, debido a que los valores de deformación obtenidos en cada alargamiento de las probetas no tienen la exactitud para la realización del cálculo, a causa de que el valor del desplazamiento fue registrado entre los cabezales de la máquina hidráulica.

Los valores del esfuerzo de fluencia ( $\sigma_y$ ), resistencia a la tracción ( $\sigma_u$ ) y % de elongación (% $\epsilon$ ) de cada probeta, son tabulados y agrupados en la Tabla 5.1, Tabla 5.2, Tabla 5.3 y Tabla 5.4, según el tipo de material que se ha elaborado en cada fundición.

Tabla 5.1. Valor promedio de las propiedades mecánicas del material aleación 365.0 sometida al ensayo de tracción.

<b>Probetas de la primera fundición aleación 365.0</b>	<b><math>\sigma_y</math> MPa</b>	<b><math>\sigma_u</math> MPa</b>	<b>%<math>\epsilon</math></b>
ET1.1-365.0	104	113,5	4
ET1.2-365.0	97	105,6	2,8
ET1.3-365.0	97	105,1	3,6
Valor promedio	99	108	3,5

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla 5.2. Valor promedio de las propiedades mecánicas del composite 365.0/SiC/2p sometida al ensayo de tracción.

<b>Probetas de la segunda fundición MC 365.0/SiC/2p</b>	<b><math>\sigma_y</math> MPa</b>	<b><math>\sigma_u</math> MPa</b>	<b>%<math>\epsilon</math></b>
ET2.1-365.0/SiC/2p	91	99,4	2,3
ET2.2-365.0/SiC/2p	---	110,1	3,4
ET2.3-365.0/SiC/2p	86	91,9	3,8
Valor promedio	89	101	3,2

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla 5.3. Valor promedio de las propiedades mecánicas del composite 365.0/SiC/4p sometida al ensayo de tracción.

<b>Probetas de la tercera fundición MC 365.0/SiC/4p</b>	<b><math>\sigma_y</math> MPa</b>	<b><math>\sigma_u</math> MPa</b>	<b>%<math>\epsilon</math></b>
ET3.1-365.0/SiC/4p	115	122,8	---
ET3.2-365.0/SiC/4p	110	117,2	---
ET3.3-365.0/SiC/4p	110	117,1	2,4
Valor promedio	112	119	---

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla 5.4. Valor promedio de las propiedades mecánicas del composite 365.0/SiC/6p sometida al ensayo de tracción.

<b>Probetas de la cuarta fundición MC 365.0/SiC/6p</b>	<b><math>\sigma_y</math> MPa</b>	<b><math>\sigma_u</math> MPa</b>	<b>%<math>\epsilon</math></b>
ET4.1-365.0/SiC/6p	128	136,7	---
ET4.2-365.0/SiC/6p	120	128,1	---
ET4.3-365.0/SiC/6p	120	128	3,2
Valor promedio	123	131	---

(Fuente: Elaboración propia)

## 5.2. Resultados del ensayo de dureza Brinell

El ensayo de dureza Brinell se lo realizó en la máquina hidráulica Pittsburgh Instruments and Machine CO N<sub>o</sub> 1929, la cual se encuentra en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la EPN. El ensayo fue realizado

por personal calificado que está a cargo del laboratorio a las probetas ED1.1-365.0, ED2.1-365.0/SiC/2p, ED3.1-365.0/SiC/4p y ED4.1-365.0/SiC/6p, en base a lo indicado en el ítem 4.8. Los resultados que avalan el ensayo de dureza realizado a cada probeta son mostrados en el informe técnico del Anexo A20.

Realizado el ensayo de dureza a cada probeta seleccionada, su valor representa la dureza promedio (HB promedio) para los tres lingotes fabricados en cada fundición. A continuación se presenta la Tabla 5.5 donde se muestra el valor de la dureza promedio Brinell para cada material fabricado.

Tabla 5.5. Valor promedio de dureza Brinell de los materiales fabricados.

Probetas seleccionadas	Dureza Brinell HB en cada indentación					HB promedio
	Realizada con una bola de wolframio de Ø10 mm y con una carga de 500 kgf					
	1	2	3	4	5	
ED1.1-365.0	45	45	45	48	48	46
ED2.1-365.0/SiC/2p	53	53	53	53	48	52
ED3.1-365.0/SiC/4p	57	53	57	57	57	56
ED4.1-365.0/SiC/6p	61	57	57	57	57	58

(Fuente: Elaboración propia)

### 5.3. Resultados del ensayo metalográfico mediante microscopio óptico

El pulido de las probetas para el ensayo metalográfico mediante microscopio óptico, se la realizó en una pulidora automática Metkon, la cual se encuentra en el Laboratorio de Metalografía de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la EPN. Una vez pulidas las probetas EMO1.3-365.0, EMO2.3-365.0/SiC/2p, EMO3.3-365.0/SiC/4p y EMO4.3-365.0/SiC/6p, se realiza los ataques químicos empleados por Fuentes [39]. Entonces se realizó un ataque químico para evidenciar la microestructura de los materiales mediante una solución diluida de HF al 0,5%. Además, es utilizado un reactivo colorante de  $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$  para diferenciar el Si del SiC, La preparación de las probetas fue realizado por personal calificado que está a cargo del laboratorio, y una vez terminado se realiza el ensayo metalográfico mediante un microscopio óptico Olympus GX41, el cual muestra las microestructuras mediante un software comunicado al microscopio.

La probeta EMO1.3-365.0 solo contiene la microestructura de la matriz AISi10Mn. Sus características representan al material 365.0 fabricado a partir de la primera fundición. La Figura 5.1 muestra la microestructura de la matriz metálica 365.0 con aumento a 100X.



Figura 5.1. Microestructura de la matriz 365.0 con aumento a 100X.  
(Fuente: Elaboración propia)

La probeta EMO2.3-365.0/SiC/2p contiene 2% de SiC en la matriz metálica 365.0. Sus características representan al MC 365.0/SiC/2p fabricado a partir de la segunda fundición. En la Figura 5.2 se muestra la microestructura del MC 365.0/SiC/2p con aumento a 100X.

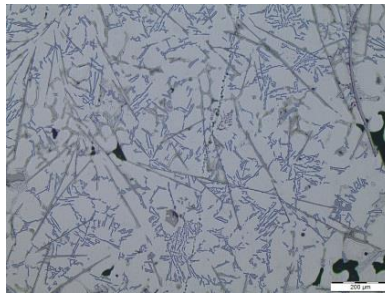


Figura 5.2. Microestructura del composite 365.0/SiC/2p con aumento a 100X.  
(Fuente: Elaboración propia)

La probeta EMO3.3-365.0/SiC/4p contiene 4% de SiC en la matriz metálica 365.0. Sus características representan al MC 365.0/SiC/4p fabricado a partir de la tercera fundición. En la Figura 5.3 se muestra la microestructura del MC 365.0/SiC/4p con aumento a 100X.

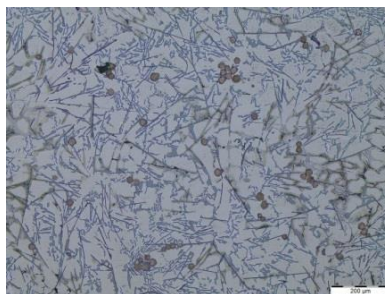


Figura 5.3. Microestructura del composite 365.0/SiC/4p con aumento a 100X.  
(Fuente: Elaboración propia)

La probeta EMO4.3-365.0/SiC/6p contiene 6% de SiC en la matriz metálica 365.0. Sus características representan al MC 365.0/SiC/6p fabricado a partir de la cuarta fundición. En la Figura 5.4 se muestra la microestructura del MC 365.0/SiC/6p con aumento a 100X.

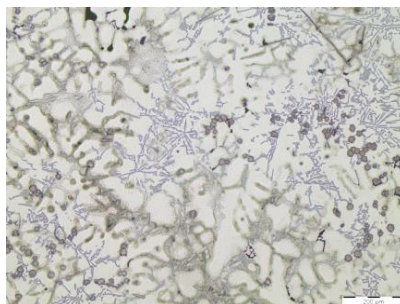


Figura 5.4. Microestructura del composite 365.0/SiC/6p con aumento a 100X.  
(Fuente: Elaboración propia)

## 5.4. Resultados de la densidad

La densidad mostrada en la Tabla 5.6 es obtenida a partir del valor de la masa sobre su volumen. El volumen se calculó a partir de las dimensiones de las probetas del ensayo metalográfico mediante microscopio óptico, ya que por haber sido maquinadas en torno y pulidas para el ensayo, alcanzan una forma regular que permite su cálculo. Con una balanza digital de precisión diez milésimas se obtiene el valor de la masa de las probetas

Tabla 5.6. Densidad de los materiales fabricados.

Material fabricado	Dimensiones de las probetas cm	Masa g	Volumen cm <sup>3</sup>	Densidad g/cm <sup>3</sup>
EMO1.3-365.0	Ø2,5 x 1,45	18,8243	7,11767	2,6447
EMO2.3-365.0/SiC/2p	Ø2,5 x 1,47	18,8114	7,21585	2,6070
EMO3.3-365.0/SiC/4p	Ø2,472 x 1,374	17,3727	6,59437	2,6345
EMO4.3365.0/SiC/6p	Ø2,462 x 1,412	17,9101	6,76012	2,6494

(Fuente: Elaboración propia)

## 5.5. Análisis y comparación de resultados

Una vez obtenidos los valores de las propiedades de los materiales fabricados 365.0, 365.0/SiC/2p, 365.0/SiC/4p y 365.0/SiC/6p, se realiza un análisis y comparación de los valores de tracción y dureza. El análisis microestructural del ensayo metalográfico permitirá observar las fases formadas en los materiales. Para ampliar el alcance de este proyecto se ha fabricado un MC C-365.0/SiC/6p colado en coquilla de acero, con el objetivo de comparar sus valores de tracción y dureza, frente a los otros composites.

### 5.5.1. Valores de las propiedades de los materiales fabricados

Para el análisis de resultados se elaboró la Tabla 5.7, la cual contiene los valores promedio de las propiedades de los materiales fabricados en cada fundición, y que han sido obtenidos en los ítems anteriores. Además, para el análisis de resultados se presentan las propiedades de un lingote de MC que fue fabricado con la matriz Al-Si

365.0 y reforzada al 6% de SiC malla #400, bajo el mismo proceso de fabricación empleado en este proyecto de investigación, pero colado en coquilla de acero para mejorar sus propiedades. La codificación de este MC es C-365.0/SiC/6p (la letra C significa coquilla), sus materiales, parámetros y otros aspectos del composite se muestran en el Anexo A21.

Tabla 5.7. Valores de las propiedades de los materiales fabricados.

Material fabricado	$\sigma_y$ MPa	$\sigma_u$ MPa	HB	% $\epsilon$	$\delta$ gr/cm <sup>3</sup>
365.0	99	108	46	3.5	2,6447
365.0/SiC/2p	89	101	52	3.2	2,6070
365.0/SiC/4p	112	119	56	---	2,6345
365.0/SiC/6p	123	131	58	---	2,6494
C-365.0/SiC/6p	206	217	78	3.7	2.6595
$\sigma_y$ =Esfuerzo de fluencia $\sigma_u$ =Resistencia de tracción      HB=Dureza Brinell $\epsilon$ =Elongación					

(Fuente: Elaboración propia)

### 5.5.2. Análisis de los valores de tracción

Para el análisis del esfuerzo de fluencia se ha preparado la Figura 5.5, donde se muestra que a medida que se eleva el contenido de SiC en la matriz 365.0 el esfuerzo va incrementándose a excepción del MC 365.0/SiC/2p (2% de SiC). El MC 365.0/SiC/6p (6% de SiC) presenta el mayor esfuerzo de fluencia de todos los composites fabricados en molde de arena con un valor de 123 MPa, pero comparado con el MC C-365.0/SiC/6p colado en coquilla y con igual contenido en % de SiC este lo supera, ya que el esfuerzo de fluencia se ha incrementado a 206 MPa. La Figura 5.5 también presenta la desviación estándar del esfuerzo de fluencia de los MC fabricados en molde de arena, a excepción del MC C-365.0/SiC/6p, ya que su valor pertenece a un solo lingote.

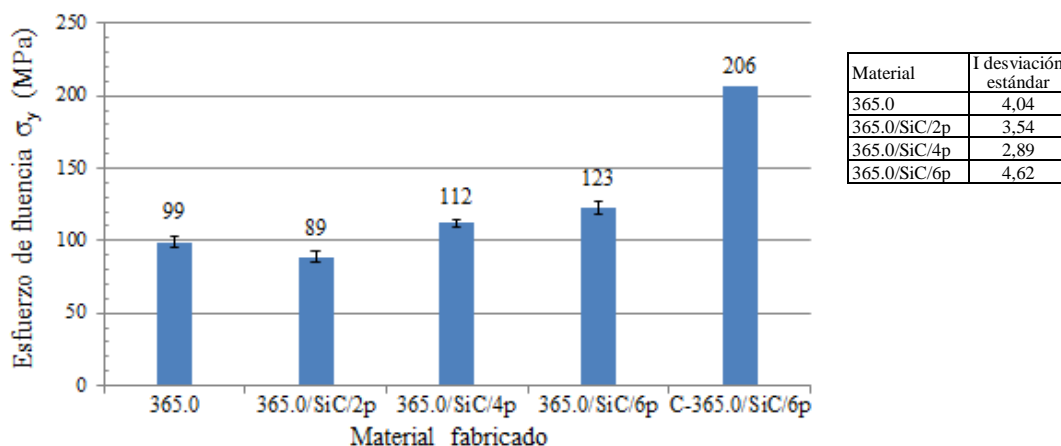


Figura 5.5. Comparación del esfuerzo de fluencia de los materiales fabricados.

(Fuente: Elaboración propia)

Para el análisis de la resistencia a la tracción se ha preparado la Figura 5.6, donde se muestra que a medida que se eleva el contenido de SiC en la matriz 365.0 la resistencia va incrementándose a excepción del MC 365.0/SiC/2p (2% SiC). El MC 365.0/SiC/6p (6% SiC) presenta la mayor resistencia a la tracción de todos los composites fabricados en molde de arena con un valor de 131 MPa, pero comparado con el MC C-365.0/SiC/6p colado en coquilla y con igual contenido en % de SiC este lo supera, ya que la resistencia se ha incrementado a 217 MPa. La Figura 5.6 también presenta la desviación estándar de la resistencia a la tracción de los MC fabricados en molde de arena, a excepción del MC C-365.0/SiC/6p, ya que su valor pertenece a un solo lingote.

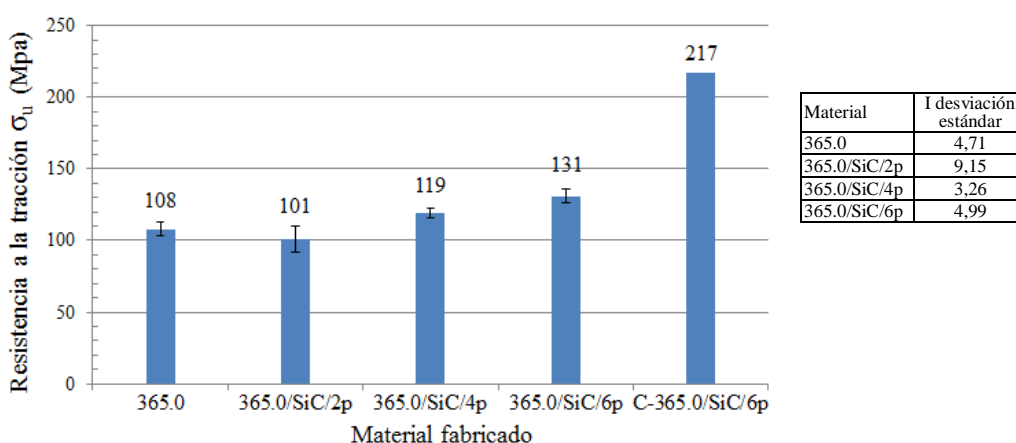


Figura 5.6. Comparación de la resistencia a la tracción de los materiales fabricados.  
(Fuente: Elaboración propia)

Para el análisis del % de elongación se ha preparado la Figura 5.7, donde se muestra que esta propiedad es difícil de ser evaluada ya que en los MC 365.0/SiC/4p (4% de SiC) y 365.0/SiC/6p (6% de SiC), no pudo ser la establecida, debido a que las probetas se han fracturado fuera de la longitud de calibración, la causa probable es la fragilización de los MC debido a la adición de las partículas de SiC. Aun así, al momento de adicionar 2 % de SiC en la matriz 365.0 se puede observar una reducción de esta propiedad.

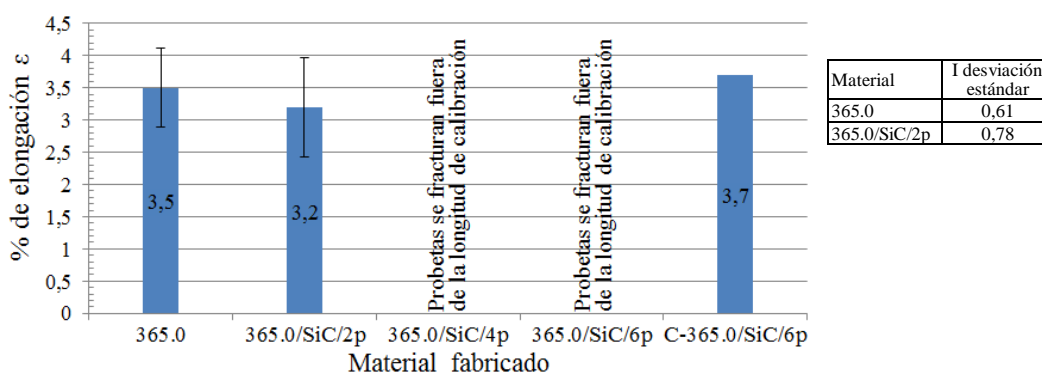


Figura 5.7. Comparación de los % de elongación de los materiales fabricados.  
(Fuente: Elaboración propia)



### 5.5.3. Análisis de la dureza

Para el análisis de la dureza se ha preparado la Figura 5.8, donde se muestra que a medida que se eleva el contenido de partículas de SiC en la matriz 365.0 la dureza va incrementándose. El MC 365.0/SiC/6p (6% SiC) presenta la mayor dureza de todos los composites fabricados en molde de arena con un valor de 58 HB, pero comparado con el MC C-365.0/SiC/6p colado en coquilla y con igual contenido en % de SiC este lo supera, ya que la dureza se ha incrementado a 78 HB. La Figura 5.8 también presenta la desviación estándar de la dureza de los MC fabricados.

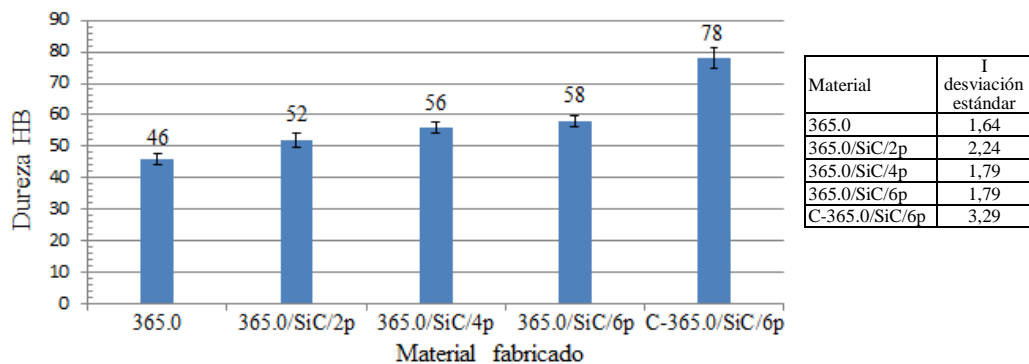


Figura 5.8. Comparación de dureza de los materiales fabricados.  
(Fuente: Elaboración propia)

### 5.5.4. Análisis microestructural del ensayo metalográfico mediante microscopio óptico

Para el análisis microestructural es necesaria la identificación de las diversas fases presentes en la microestructura del material fabricado para esto se procederá a utilizar conceptos de formación de fases y morfología del aluminio y sus aleaciones, descritos por la ASM Handbook Volume 9 Metallography and Microstructures [69], en donde, a través de la identificación morfológica se determina las fases principales y las fases intermetálicas que se han formado en el material. En el reconocimiento de fases intermetálicas se escribirá únicamente sus elementos químicos involucrados. Además, la Tabla 3.10 será de ayuda para reconocer la morfología de algunas fases formadas en aleaciones de aluminio-silicio.

#### 5.5.4.1. Análisis de la microestructura 365.0

Para el análisis de la microestructura 365.0 se ha preparado la Tabla 5.8 donde se resumen los parámetros del proceso de fabricación del material y la Figura 5.9 donde se muestra su microestructura.

Tabla 5.8. Parámetros del proceso de fabricación del material 365.0.

Proceso de fabricación: por fusión	Tipo de crisol: crisol de acero
Materia prima: 10,32%Si; 0,23%Fe; 0,35%Mn; 0,29%Mg; %Al al balance	Temperatura de fusión: 710 °C
Tipo de molde: molde desechable de arena aglomerante	Temperatura de desgasificación: 720 °C
Técnica de colado: por fuerza de gravedad	Temperatura de colado: 700 °C

(Fuente: Elaboración propia)

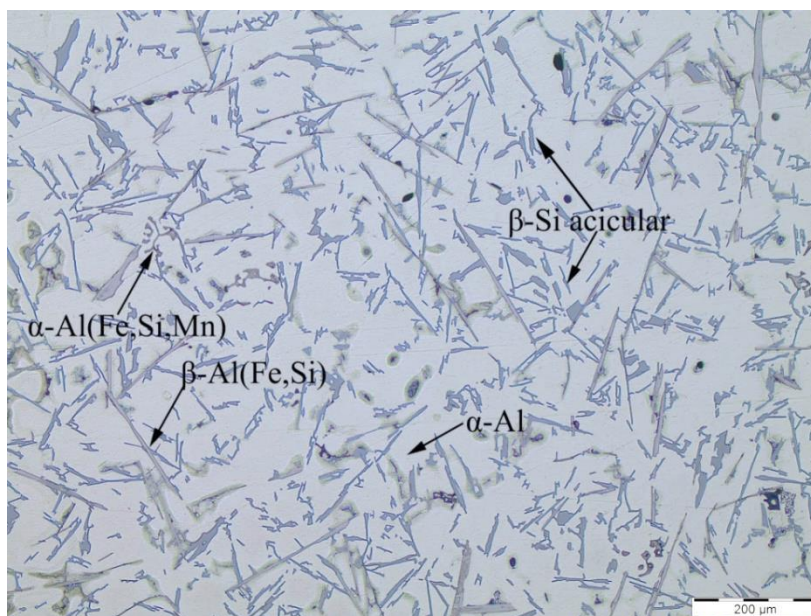


Figura 5.9. Microestructura 365.0.

(Fuente: Elaboración propia)

La microestructura muestra que el material 365.0 es una aleación hipoeutéctica, constituido de dos fases sólidas independientes cuando solidificó el material. La primera es una fase primaria de solución sólida de Al ( $\alpha$ ), y la segunda es una fase secundaria en forma de Si tipo acicular o laminar ( $\beta$ ) que se precipita en la solución sólida de Al.

La microestructura muestra que en el material se han formado las fases intermetálicas  $\beta$ -Al(Fe,Si) de morfología tipo agujas y  $\alpha$ -Al(Fe,Si,Mn) de morfología tipo escritura china. Las fases de tipo acicular y tipo aguja son causantes de fragilidad en el material. Por esta razón si va estar sometido a solicitaciones mecánicas debe ser realizado un tratamiento térmico, en donde el contenido de manganeso en la material contrarreste los efectos perjudiciales del contenido de Fe en las aleaciones de Al-Si, debido a la formación de la fase  $\alpha$ -Al(Fe,Si,Mn) en forma de escritura china, a expensas de la fase  $\beta$ -Al(Fe,Si) en forma de agujas afiladas. Además, la fase de Si acicular se transforme a una morfología laminar fina o globular según el tipo de tratamiento. Se observa algunos puntos negros que son porosidad producto de la disolución de hidrógeno en el aluminio.

### 5.5.4.2. Análisis de la microestructura 365.0/SiC/2p

Para el análisis de la microestructura 365.0/SiC/2p se ha preparado la Tabla 5.9 donde se resumen los parámetros del proceso de fabricación del MC y la Figura 5.10 donde se muestra su microestructura.

Tabla 5.9. Parámetros del proceso de fabricación del material 365.0/SiC/2p.

Proceso de fabricación: stir casting	Tipo de crisol: crisol de acero
Materia matriz: 10,32%S; 0,23%Fe; 0,35%Mn; 0,29%Mg; %Al al balance	Temperatura de fusión: 710 °C
Material refuerzo: 2% de SiC malla #400	Temperatura de agitación: 720 °C
Tipo de molde: molde desechable de arena aglomerante	Temperatura de desgasificación: 720 °C
Técnica de colado: por fuerza de gravedad	Temperatura de colado: 700 °C

(Fuente: Elaboración propia)

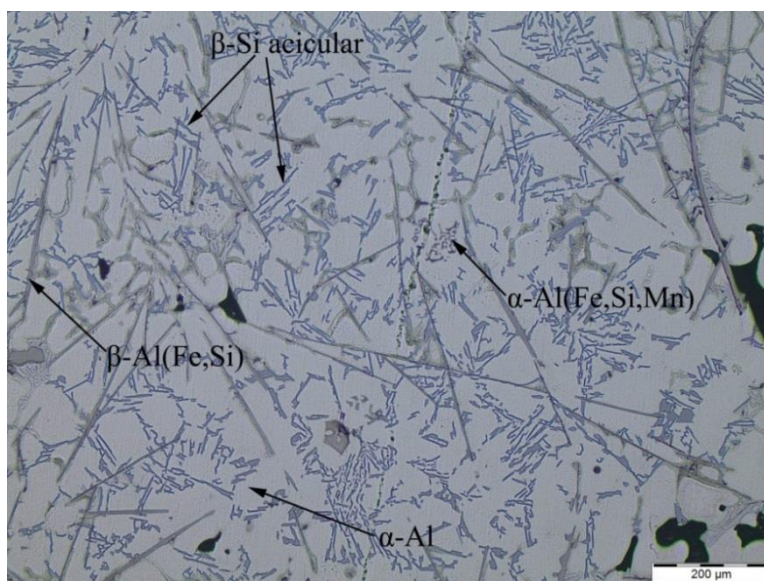


Figura 5.10. Microestructura 365.0/SiC/2p.

(Fuente: Elaboración propia)

La microestructura del MC 365.0/SiC/2p muestra que la matriz está constituida por una fase primaria de Al ( $\alpha$ ) y una fase secundaria de Si ( $\beta$ ) con morfología acicular, las fases intermetálicas  $\beta$ -Al(Fe,Si) de morfología tipo agujas y  $\alpha$ -Al(Fe,Si,Mn) de morfología tipo escritura china. Las de tipo acicular y agujas disminuyen las propiedades mecánicas del material. En la microestructura de la probeta no se observa la fase dispersa de SiC.

En la matriz del composite se observan una cantidad apreciable de microrechupes que perjudicaron la resistencia del MC, ya que en comparación con la aleación 365.0 que posee una resistencia de tracción de 108 MPa, esta es menor con un valor de 101 MPa.

El valor de la resistencia de tracción en el MC 365.0/SiC/2p debería ser mayor al del material matriz 365.0, ya que las partículas de SiC adicionadas al 2% en la matriz 365.0

incrementan el valor de esta propiedad, pero los microrechupes existentes en el material, sumado a que en ciertas regiones no existe dispersión de partículas de SiC, originan su disminución. Estos defectos de fabricación pueden ser controlados de algunas formas. En el caso de los microrechupes hay que evitar la generación de turbulencias al momento de colar la masa fundida en el molde de arena (la velocidad del flujo de la colada debe ser lo más uniforme), también se puede mejorar la forma y tipo de molde (un molde metálico favorece la solidificación), o actuando sobre la fluidez del MC. En el caso de la falta de dispersión se puede mejorar las dimensiones, la forma o la velocidad de las aspas, además, hay que evitar la sedimentación de las partículas a causa del estatismo de la masa fundida matriz 365.0-partículas SiC.

#### 5.5.4.3. Análisis de la microestructura 365.0/SiC/4p

Para el análisis de la microestructura 365.0/SiC/4p se ha preparado la Tabla 5.10 donde se resumen los parámetros del proceso de fabricación del MC y la Figura 5.11 donde se muestra su microestructura.

Tabla 5.10. Parámetros del proceso de fabricación del material 365.0/SiC/4p.

Proceso de fabricación: stir casting	Tipo de crisol: crisol de acero
Materia matriz: 10,32%S; 0,23%Fe; 0,35%Mn; 0,29%Mg; %Al al balance	Temperatura de fusión: 710 °C
Material refuerzo: 4% de SiC malla #400	Temperatura de agitación: 720 °C
Tipo de molde: molde desechable de arena aglomerante	Temperatura de desgasificación: 720 °C
Técnica de colado: por fuerza de gravedad	Temperatura de colado: 700 °C

(Fuente: Elaboración propia)

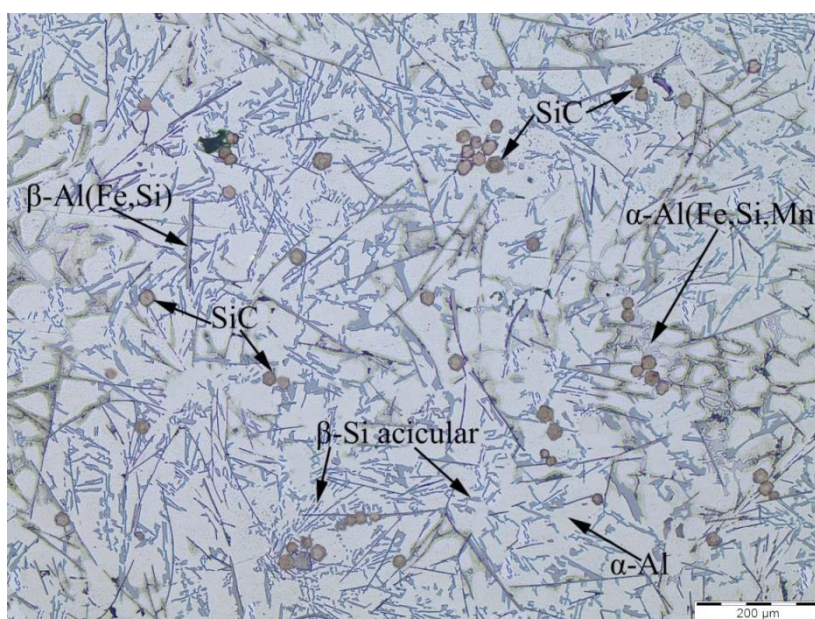


Figura 5.11. Microestructura 365.0/SiC/4p.

(Fuente: Elaboración propia)



La microestructura del MC 365.0/SiC/4p muestra que la matriz está constituida por una fase primaria de Al ( $\alpha$ ) y una fase secundaria de Si ( $\beta$ ) con morfología acicular, las fases intermetálicas  $\beta$ -Al(Fe,Si) de morfología tipo agujas y  $\alpha$ -Al(Fe,Si,Mn) de morfología tipo escritura china. La tipo acicular y agujas disminuyen las propiedades mecánicas del MC.

La microestructura muestra la fase dispersa de partículas de SiC que han sido arrojadas hacia los límites de grano de la matriz. En ciertas regiones de la matriz hay aglomeración de partículas, y en otras existe una pobre dispersión, aun así el valor de resistencia y dureza se han incrementado con relación a los materiales 365.0 y 365.0/Si/2p, como se puede observar en la Tabla 5.7 donde se ha tabulado las propiedades de los materiales fabricados. La falta de dispersión homogénea de las partículas de SiC pudo deberse a dos factores, el primero es el tiempo de desgasificación con gas argón, y el segundo es tanto el tiempo como la forma de solidificación de la masa fundida en el molde de arena.

#### 5.5.4.4. Análisis de la microestructura 365.0/SiC/6p

Para analizar la microestructura 365.0/SiC/6p se ha preparado la Tabla 5.11 que resume los parámetros de fabricación y la Figura 5.12 donde se muestra su microestructura.

Tabla 5.11. Parámetros del proceso de fabricación del material 365.0/SiC/6p.

Proceso de fabricación: stir casting	Tipo de crisol: crisol de acero
Materia matriz: 10,32%S; 0,23%Fe; 0,35%Mn; 0,29%Mg; %Al al balance	Temperatura de fusión: 710 °C
Material refuerzo: 6% de SiC malla #400	Temperatura de agitación: 720 °C
Tipo de molde: molde desechable de arena aglomerante	Temperatura de desgasificación: 720 °C
Técnica de colado: por fuerza de gravedad	Temperatura de colado: 700 °C

(Fuente: Elaboración propia)

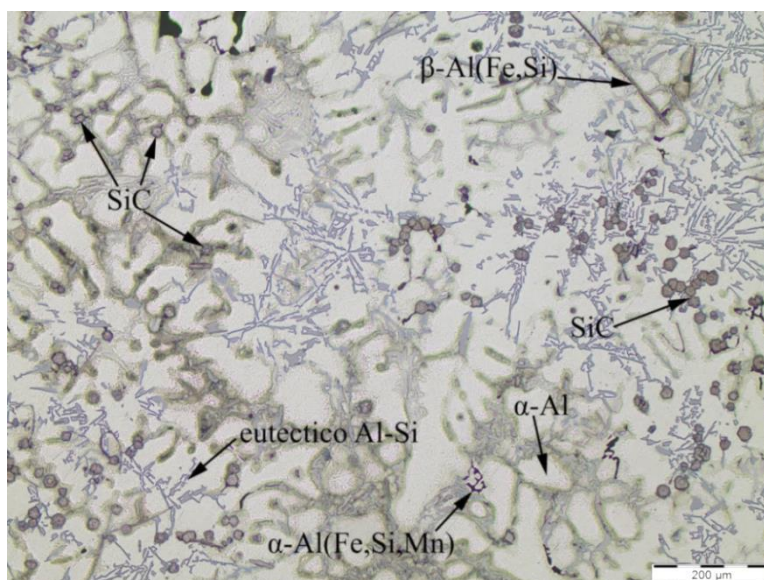


Figura 5.12. Microestructura 365.0/SiC/6p.  
(Fuente: Elaboración propia)

La microestructura 365.0/SiC/6p muestra que su matriz 365.0 está constituida por la fase primaria de Al ( $\alpha$ ) y la fase secundaria eutéctica Al-Si( $\beta$ ), las fases intermetálicas  $\beta$ -Al(Fe,Si) de morfología tipo agujas y  $\alpha$ -Al(Fe,Si,Mn) de morfología tipo escritura china. La fase intermetálica tipo agujas es casi nula, favoreciendo a las propiedades del composite.

La forma como solidifica este tipo de composites es descrita en el ítem 3.5.3, lo cual ayuda a entender como sucede la solidificación del MC 365.0/Si/6p a través de su microestructura que muestra la siguiente evolución: (a) crecimiento dendrítico de la fase primaria Al- $\alpha$  que empuja a las partículas de SiC hacia los límites de grano, (b) continúa el crecimiento dendrítico, (c) solidificación casi completa en la cual ya se nota la formación de granos de Al- $\alpha$ , y de los límites de grano en donde se deposita la fase de Si eutéctica y la fase dispersa de partículas de SiC y (d) solidificación total de la matriz Al-Si 365.0, en la cual el refuerzo tipo partículas de SiC se ha dispersado en los límites de grano.

En las diversas investigaciones que se han realizado a microestructuras de MCM Al-Si reforzada con partículas de SiC, mencionan que la adición de partículas de SiC tiene influencia en el tamaño de grano de la matriz del MC. Este fenómeno de afinamiento de estructura se observa en la microestructura del MC 365.0/SiC/6p, en la cual existe mayor formación de granos dendríticos Al- $\alpha$ , y también la formación de la fase secundaria tipo eutéctica Al-Si( $\beta$ ). En la microestructura de la probeta se observa la fase dispersa de partículas de SiC en los límites de grano de la matriz 365.0.

El MC 365.0/SiC/6p en comparación a los composites fabricados con los mismos constituyentes principales, materiales secundarios, molde de arena aglomerada y parámetros de fabricación, es el que posee las mejores propiedades mecánicas como se muestra en la Tabla 5.7. Se puede mejorar aún más estas propiedades al realizar un adecuado tratamiento térmico.

El MC C-365.0/SiC/6p con dispersión al 6% de SiC tiene una resistencia a la tracción de 217 MPa y dureza de 78 HB, que en comparación con el MC 365.0/SiC/6p que posee el mismo porcentaje de dispersión de SiC y con un valor de resistencia a la tracción de 123 MPa y dureza de 58 HB, presenta mejores propiedades debido a la utilización de la coquilla de acero.

## **5.6. Potenciales aplicaciones y comparaciones de los MC 365.0/SiC/6p y C-365.0/SiC/6p con diversos materiales**

La Tabla 5.12 es elaborada a partir de la Tabla 3.11, en la cual se exponen propiedades de esfuerzo de fluencia, resistencia a la tracción, dureza, módulo de Young y elongación, además de aplicaciones industriales para MCMM Al-Si reforzadas con partículas de SiC, aleaciones Al-Si, fundiciones grises y hierros dúctiles, con el objetivo de comparar entre si las propiedades de estos materiales con los MC 365.0/SiC/6p y C-365.0/SiC/6p fabricados en este proyecto de investigación, como también presentar las potenciales aplicaciones industriales que pueden tener los MC fabricados.

Como se muestra en la Tabla 5.12 las propiedades de un material están influenciadas por el proceso de fabricación, la serie de la aleación y posterior tratamiento térmico. Esto se evidencia al comparar los materiales entre si. Por ejemplo, los materiales colados en molde de arena y sin ningún tratamiento (F) poseen propiedades mecánicas menores, comparados con los materiales colados con técnicas de baja presión o por fuerza de gravedad en molde permanente de coquilla o lingoteras de acero. Los valores de las propiedades mecánicas del MC C-365.0/SiC/6p colado por fuerza de gravedad en coquilla de acero y sin ningún tratamiento térmico, fabricado en este proyecto, superan los valores de algunas aleaciones Al-Si 3xx.x, y también con respecto a MC reforzados con porcentajes similares de SiC su resistencia y dureza no dista mucho de aquellos.

Una diferencia marcada que tienen las fundiciones grises y hierros fundidos, con las aleaciones de Al-Si y los MC (incluso con adición de partículas de SiC al 20%), es la dureza. Esta propiedad los hace ideales para ser utilizados en tambores de frenos, blocks de cilindros, cabezotes, y en aplicación donde sean sometidos a desgaste, pero con una desventaja, su peso es aproximadamente tres veces el de un MC de matriz Al-Si, lo representa en un gasto energético elevado. Por este motivo las investigaciones se centran en obtener un MC que supere o iguale las propiedades de fundiciones grises y hierros dúctiles. Para ello el desarrollo de un MCMM Al-Si reforzada con partículas cerámicas sea de SiC, B<sub>4</sub>C, TiC, etc., tipo partículas, fibras, whiskers o monofilamentos, debe conjugar entre si propiedades de bajo peso, excelente transferencia de calor, alta resistencia y dureza, alta ductilidad y tenacidad, así como resistencia a la corrosión y al desgaste, dando como resultado un alto rendimiento con un menor consumo de combustible. Las potenciales aplicaciones que pueden tener los MC 365.0/SiC/6p y C-365.0/SiC/6p son obtenidas por comparación con los otros materiales de Tabla 5.12.

Tabla 5.12. Potenciales aplicaciones y comparación de los MC 365.0/SiC/6p y C-365.0/SiC/6p con aleaciones Al-Si, fundiciones grises y hierros dúctiles.

Serie del material	Elementos de la matriz en %	Proceso de fabricación (Ørefuerzo)/Técnica de colado	$\sigma_y$ MPa	$\sigma_u$ MPa	HB	E GPa	% ε	Ref.	Típicas aplicaciones.
A356.0	6.5-7.5Si, 0.2Cu 0.25-0.45Mg	Arena de moldeo/F Arena de moldeo/T6 Molde Permanente/T61	83 207 207	159 278 283	--- 75 90	72.4	6 6 10	[7]	Blocks y cabezotes de motores de autos de competición, aros de ruedas de autos, carcasas de ejes traseros, chasis de camión, ruedas de aeronaves, cárteres.
365.0	9.5-11.5Si 0.15Fe, 0.5-0.8 Mn, 0.1-0.5Mg	Baja presión en molde arena-F Baja presión molde de arena-T6 Die casting a alta presión-F	96 250 120	175 299 250	61 109 75	74 74 74	2 4 5	[67] [68]	Miembros transversales para autos, juntas de inclinación de cabinas de camiones, buje de rueda para motos, elementos de motores, aplicaciones navales y aeroespaciales, etc.
A413.2-F	11Si, 0.6Fe	Fundición horno eléctrico	65	180	85	---	9	[35]	Lingotes fabricados por Pulkit Bajaj, los utilizo para la caracterización, no menciona aplicación alguna.
A413.2/SiC/2.5p-F	0.5Mn, 0.1Mg 0.2Ti	Stir casting (Ø100 µm SiC) / Colado por fuerza de gravedad en molde permanente tipo lingotera	78	220	92	---	7.5	[35]	
A413.2/SiC/5p-F	No adicionó %Mg para el MC		85	245	83	---	5.5	[35]	
A413.2/SiC/7.5p-F			112	250	150	---	3.2	[35]	
A356.0-F	7.5Si, 0.5Fe	Fundición horno eléctrico	---	---	60	---	---	[79]	Típicas aplicaciones para A356.0.
A356.0/SiC/3p-F	0.3Mn, 0.2Cu No adicionó %Mg para el MC	Stir casting (no especifica Ø SiC) / Colado en molde de acero	148	217	73	---	---	[79]	Lingotes fabricados por Satyanarayan <i>et al.</i> , los utilizó para la caracterización.
A356.0/SiC/6p-F			153	222	71	---	---	[79]	
A359-F	9.45Si, 0.12Fe 0.03Mn 0.61Mg 0.135Ti	Fundidos y colados por fuerza de gravedad en molde de arena	84	114	---	52	1.1	[39]	Lingotes fabricados por la empresa Teksid y caracterizado por Fuentes.
A359-T6			236	243	52	72	0.6	[39]	
A359/SiC/20p-F	Se desconoce si la empresa Teksid adicionó %Mg para el MC	Stir casting (Ø42 µm SiC) / Colado por gravedad en molde de arena	150	180	---	83	0.9	[39]	
A359/SiC/20p-T6			---	242	120	97	0.3	[39]	
A359/SiC/20p-T6			---	247	---	105	0.3	[39]	
4xx.x-F	12.5Si	Fundición en horno eléctrico	---	190	65	---	---	[80]	Típicas aplicaciones para 4xxx.x
4xx.x/SiC/3p-F	12.5Si No se adicionó %Mg para el MC	Stir casting (Ø50 µm SiC) / No especifica el tipo de molde	---	250	72	--	--	[80]	La investigación menciona que el MC puede ser empleado en blocks de motores, pistones, camisas.
A356./SiC/10p-T61			287	308	---	82	0.6	[81]	Pistones, bielas, camisas de cilindros, tambor de frenos, discos de frenos, cilindros para blocks.
A356/SiC/15p-T61			329	336	---	91	0.3	[81]	
A356/SiC/20p-T61			336	337	---	98	0.4	[81]	
4xx.x/SiC/5p-F	9.78Si, 0.15Fe	Pulvimetalurgia con proceso de forja.	---	208	51	---	---	[82]	Pistones para compresores de aire acondicionado para vehículos.
365.0-F		Refundido en horno a gas	99	108	46	--	3.5		Pines sometidos a bajas cargas mecánica.
365.0/SiC/2p-F	10.32Si, 0.23Fe 0.35Mn 0.29Mg	Stir casting (Ø25.8 µm SiC) 365.0/SiC/2p, 365.0/SiC/4p, 365.0/SiC/6p colados por fuerza de gravedad en molde de arena aglomerada, C-365.0/SiC/6p colado por fuerza de gravedad en coquilla de acero	89	101	52	--	3.2		Los MC 365.0/SiC/6p y C-365.0/SiC/6p, fabricados en este proyecto, pueden tener potenciales aplicaciones en pistones de compresores, cilindros de ruedas de freno de tambor, guías sometidas a desgaste por la circulación de mordazas estiradoras de films PP. Siempre que sean realizados un tratamiento térmico.
365.0/SiC/4p-F			112	119	56	--	---		
365.0/SiC/6p-F	Se adicionó 1%Mg para fabricar MC		123	131	58	--	---		
C-365.0/SiC/6p-F			206	217	78	--	3.7		
SAE J431 grado G2500	3.2-3.5C, 0.6- 0.9Mn, 2-2.4Si, 0.15S	Fundición gris	---	173	170	---	0.6	[9]	Blocks de cilindros, cabezotes, pistones, discos de embrague, cuerpos de bombas de aceite, cajas de transmisión, tambores de freno, todo esto para servicio ligero.
SAE J431 grado G3000	3.1-3.4C, 0.6- 0.9Mn, 1.9-2.3Si 0.15S	Fundición gris	---	207	187	---	0.6	[9]	Blocks de cilindros, cabezotes, pistones, discos de embrague, tambores de freno, todo esto para servicio mediano.
SAE J431 grado G3500	3-3.3C, 0.6-.9Mn 1.8-2.2Si, 0.15S	Fundición gris	---	241	207	---	0.6	[9]	Blocks de motores diésel, volantes de inercia, cajas de transmisión para maquinaria pesada.
SAE J431 grado G3500c	3.5C, 0.6-0.9Mn, 1.3-1.8Si, 0.12S	Fundición gris		241	207		0.6	[9]	Tambores de freno para servicio extra pesado
SAE AMS 5315C	3C, 2.5Si, 0.08P	Hierro dúctil	310	414	190	---	15	[9]	Blocks de motores, bombas, carcasas, cuerpos de válvulas, engranajes, bridas, cilindros.
ASTM A 536 grado 80-55-06	-----	Hierro dúctil	379	552	---	---	6	[9]	Cigüeñales, engranajes, rodillos

$\sigma_y$ =Esfuerzo de fluencia.  $\sigma_u$ =Resistencia última. HB=Dureza Brinell. E=Módulo de elasticidad o módulo de Young. ε=Elongación.

(Fuente: Elaboración propia)



## CAPÍTULO 6

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1. Conclusiones

Las investigaciones no mencionan un problema que se debe tomar en cuenta al momento de fabricar un MCMC vía stir casting. Este es el proceso de erosión que sufre un crisol cerámico al momento de agitar las partículas de SiC en la matriz fundida. La agitación desprende material particulado de las paredes del crisol las mismas que se introducen en la masa fundida matriz-refuerzo afectando las propiedades del MC si no son eliminadas.

La desgasificación con gas argón de la masa fundida matriz Al-Si 365.0-refuerzo SiC es fundamental para eliminar el hidrógeno disuelto. Además de mejorar las propiedades del MC. Sin embargo, en la desgasificación antes de realizar el colado, se mantiene estática la masa fundida, lo que puede ocasionar la sedimentación de las partículas de SiC en el fondo de la matriz. Por tal motivo, para evitar la sedimentación se diseñó y construyó una campana de alto desempeño para insuflar argón en el la masa fundida por 35 segundos.

En todos los MC fabricados se ha trabajado bajo las mismas condiciones de temperatura, 710 °C para la fusión de la matriz, 720 °C al adicionar el SiC, y 700 °C para colar el MC. Estas temperaturas ayudan a evitar la formación de carburo de aluminio, debido a la estabilidad térmica que se genera entre la matriz Al-Si 365.0 con las partículas de SiC.

El dispersar partículas de SiC malla #400 en porcentajes del 4% y 6% en la matriz Al-Si 365.0 ha incrementado la resistencia en cada MC fabricado, a excepción del MC al 2% de SiC. Esto se debe a que en su proceso de fabricación se tuvo gran cantidad de microrechupes originados al momento de colar y la posterior solidificación del composite.

El dispersar partículas de SiC malla #400 en porcentajes del 2, 4 y 6% en la matriz Al-Si 365.0 incrementó la dureza en cada MC fabricado, obteniéndose valores de 52, 56 y 58 HB respectivamente, en comparación a la matriz Al-Si 365.0 que tuvo un valor de 46 HB.

El crecimiento dendrítico empuja al gas o aire disuelto en la matriz líquida hacia los límites de grano de la matriz en donde se encuentran con las partículas de SiC, originando que los gases atrapen a las partículas, lo que se evidencia como porosidad en la cual se aglomeran las partículas de SiC. Esto se puede observar en las microestructura de la Figura 4.17 correspondiente a las pruebas preliminares.

En las primeras pruebas preliminares donde la masa fundida fue expuesta al medio ambiente, se tuvo atrapamiento de gases, debido a la agitación de la matriz fundida Al-Si y partículas de SiC. Esto conllevó a la formación de porosidades en la superficie del MC después de su solidificación, y se evidenció ya que no se desgasificó la masa fundida.

El material compuesto de matriz metálica Al-Si 365.0 reforzada al 6% de partículas de SiC (365.0/SiC/6p) colado bajo fuerza de gravedad en molde desechable de arena aglomerada posee las mejores propiedades mecánicas en comparación al resto de composites fabricados bajo los mismos parámetros. Este fenómeno es causado por la dispersión de partículas cerámicas en los límites de grano de la matriz Al-Si 365.0. Por lo que, a mayor porcentaje de partículas mayor será el incremento de resistencia y dureza.

Como parte del análisis de resultados se obtuvo un composite C-365.0/SiC/6p bajo el mismo proceso de fabricación creado en esta investigación, pero colado en un molde permanente de acero. Este composite al 6% de partículas cerámicas de SiC, posee una resistencia de 217 MPa con una dureza de 78 HB. Comparado con el MC 365.0/SiC/6p colado en molde de arena, y con el mismo porcentaje de partículas de SiC, representa una mejora en la fabricación de un MC. Por tal motivo, si se desea obtener excelentes propiedades mecánicas se deberá colar el composite en un molde permanente.

Las potenciales aplicaciones de los composites 365.0/SiC/6p y C-365.0/SiC/6p que se muestran en la Tabla 5.12 han sido establecidas en base a comparación de su resistencia, dureza y % de elongación con el resto de materiales de la Tabla 5.12. En donde se muestra que estos materiales por ser resistentes a procesos de abrasión, alta resistencia a la tracción, alta ductilidad y tenacidad, poseer estabilidad térmica, resistente a la corrosión, baja densidad, son ideales para ser aplicados en blocks de cilindros, pistones, tambores de freno, cuerpos de bombas de aceite, entre otras.

El polvo de SiC que fue calentado a 300 °C no debe ser adicionado de manera acumulada o en forma de grumos, ya que esto causa problemas de aglomeración de las partículas de SiC en los límites de grano de la matriz 365.0. Aun cuando la agitación de las aspas traten de dispersar homogéneamente las partículas. Una de las causas de la aglomeración se debe a las dimensiones micrométricas de las partículas de SiC, las cuales son de difícil separación al momento de su ingreso a la aleación líquida.

Si se desea dispersar porcentajes mayores al 6% de SiC en una matriz de aleación Al-Si, el proceso de fabricación elaborado en este proyecto de investigación resultaría una alternativa viable.

## 6.2. Recomendaciones

Se recomienda trabajar con un crisol que sea de acero inoxidable, hierro dúctil o una fundición gris. Estos materiales soportan procesos de erosión debido a su alto valor de dureza, lo que significaría un menor desgaste de sus paredes internas debido a la agitación del SiC en matrices de Al-Si.

Se recomienda antes de colar el MC realizar la desgasificación con gas argón, para evitar la formación de porosidades al momento de la solidificación del composite, teniendo en cuenta que esta debe ser en un corto tiempo.

Se recomienda antes de emprender un proyecto de fabricación y caracterización de un material compuesto de matriz aleación Al-Si reforzada con partículas de SiC, establecer una base científica y una estructuración que permita su desarrollo. Como se ha visto en esta investigación se requiere de un dominio de varias materias científicas que involucran una relación unas con otras.

Para mejorar las propiedades mecánicas de los MC 365.0/SiC/6p y C-365.0/SiC/6p, y como trabajo futuro se recomienda posterior a su obtención realizar un tratamiento térmico que mejore sus propiedades.

Se recomienda no calentar el polvo de SiC malla #400 a temperaturas mayores a 500 °C, ya que las partículas del polvo se unen entre sí (se agrupan) lo que dificulta la adición en la matriz fundida, porque se tendría que separarlas lo cual representa un demora o peor aún el enfriamiento de las mismas.

Como trabajo a futuro se recomienda realizar: un estudio del tratamiento térmico de MCM Al-Si reforzada con partículas de SiC, estudiar las propiedades de la interfaz formada por la matriz y refuerzo, estudiar las propiedades del composite con refuerzos que varían del 10% al 20% de SiC, estudiar las propiedades del composite a diferentes diámetros de las partículas de SiC.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Richards, *Aluminium: its history, occurrence, properties, metallurgy and applications, including its alloys*. Philadelphia: Baird & CO Industrial Publishers, 1896.
- [2] M. Katz, *Los minerales como materia prima: bauxita y minerales de hierro*. Inst. Nac. Educ. Tecnológica, Buenos Aires: Ministerio de Educación, Ciencia y Tecnología de la Nación, 2006.
- [3] D. Rubinos, "Utilización de lodos rojos de bauxita en la contención e inactivación de residuos tóxicos y peligrosos", tesis doctoral, Univ. Santiago de Compostela, España, 2007.
- [4] G. Totten and D. MacKenzie, *Handbook of Aluminium Volume 1 Physical Metallurgy and Process*. United State, New York: Marcel Dekker, 2003.
- [5] J. Davis, *ASM Specialty Handbook: Aluminum and Aluminum Alloys*. USA: ASM International, 1993.
- [6] W. Smith, y J. Hashemi, *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*, 4ta ed. México: Graw-Hill, 2006.
- [7] *ASM Handbook Volume 2 Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, USA: ASM International, 1990.
- [8] J. Shackelford y W. Alexander, *Materials Science and Engineering Handbook*, 3rd ed. United State: CRC Press LLC, 2001.
- [9] *ASM Handbook Volume 1 Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys*. USA: ASM International, 1990.
- [10] M. Groover, *Fundamentos de manufactura moderna*, 3ra ed. México: Prentice-Hall Hispanoamericana, 2007.
- [11] J. Catalá, "Caracterización mecánica, química y microestructural de las bandas utilizadas en el proceso de colada continua de aluminio hazelett", tesis magistral, Univ. Pol. Valencia, España, 2012.
- [12] P. Mangonon, *Ciencia de Materiales Selección y Diseño*, 1ra ed. México: Pearson Educación, 2001.
- [13] J. Kaufman and E. Rooy, *Aluminum alloy castings: properties, processes, and applications*. USA: ASM International, 2004.
- [14] J. Kaufman, *Introduction to Aluminum Alloys and Tempers*. USA: ASM International, 2000.
- [15] M. Warmuzek, *Aluminum-Silicon Casting Alloys Atlas of Microfractographs*. USA: ASM International, 2004.
- [16] D. Askeland, *La ciencia e ingeniería de los materiales*. México: Grupo editorial Iberoamérica, 1987.

- [17] Industrias DOJE, “Las aleaciones de fundición de silicio”, 2013. [En línea]. Disponible en: [http:// www.doje.com/es/blog/las-aleaciones-de-fundicion-de-silicio.html](http://www.doje.com/es/blog/las-aleaciones-de-fundicion-de-silicio.html)
- [18] “Silicio”, *Wikipedia*, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/Silicio>
- [19] *ASM Handbook Volume 15 Casting*, USA: ASM International, 1998.
- [20] E. de Bengy, E. Tremps, D. Fernández, y J. Enríquez, “*Fabricación de camisas para motores diésel*”, FUNDI Press, 2012.
- [21] European Aluminium Association, “The Aluminium Automotive Manual Applications–Power train–Engine blocks”, 2011 [Online]. Available: <http://european-aluminium.eu/resource-hub/aluminium-automotive-manual/>
- [22] European Aluminium Association, “The Aluminium Automotive Manual Manufacturing-Casting methods”, 2002 [Online]. Available: <http://european-aluminium.eu/resource-hub/aluminium-automotive-manual/>
- [23] U. Schilling y S. Schnaibel, *Reacondicionamiento de bloques de motores de aluminio*, Heilbronn: MS Motor Service International GmbH, 2009.
- [24] Motiv Engines Blog, “Sand Casting the Engine Block”, 2014. [En línea]. Disponible en: <https://motivengines.wordpress.com/2014/05/30/sand-casting-the-engine-block/>
- [25] T. Gilles, *Automotive engines Diagnosis, Repair, and Rebuilding*, 7th ed. USA: Cengage Learning, 2015.
- [26] S. Kalpakjian y S. Schmid, *Manufactura, ingeniería y tecnología*, 5ta ed. México: Pearson Educación, 2008.
- [27] J. Coletto, “Desarrollo de componentes de base aluminio reforzados con fibra corta de grafito”, tesis doctoral, Univ. Comp. Madrid, España, 2001.
- [28] *ASM Handbook volumen 21 Composites*, USA: ASM International, 2001.
- [29] Office of Technology Assessment, *Advanced Materials by Design*, Washington DC: U.S. Government Printing Office, 1998.
- [30] M. Ashby, *Materials Selection in Mechanical Design*, 4th ed. Burlington: Elsevier, 2011.
- [31] W. Callister, *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales 1*, 3ra ed. Barcelona: Reverté, 2002.
- [32] F. Stupenengo, *Materiales y materias primas. Capítulo 10: Materiales compuestos*, Buenos Aires: INET, 2011.
- [33] J. Dávila, S. Galeas, V. Guerrero, P. Pontón, N. M. Rosas, V. Sotomayor, y C. Valdivieso, *Nuevos materiales: aplicaciones estructurales e industriales*. Quito: Imprefepp, 2011.
- [34] Totten y D. Mackenzie, *Handbook of Aluminum Volume 2 Alloy Production and Materials Manufacturing*. New York: Marcel Dekker, 2003.

- [35] P. Bajaj, "Mechanical behaviour of aluminium based metal matrix composites reinforced with SIC and Alumina", Master's thesis, Thapar Univ., Patiala, 2011.
- [36] BDM Federal, Inc. and NADIBO, "Metal Matrix Composites (MMC) Sector Study An assessment of the MMC Technology Based Applications and Marketplace", NATIBO, Virginia, USA-30, Aug. 1993.
- [37] N. Chawla and K. Chawla, *Metal Matrix Composites*, 2nd ed. New York: Springer, 2013.
- [38] K. Kainer, *Metal Matrix Composites: custom-made materials for automotive and aerospace engineering*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co, 2006.
- [39] E. Fuentes, "Efecto de la microestructura en las propiedades de materiales compuestos base aluminio", tesis doctoral, Univ. Pol. Catalunya, España, 2007.
- [40] S. G. Fishman, A. K. Dhingra, "Cast Reinforced Metal Composites", En Symposium on Advances in Cast Reinforced Metal, Chicago, USA, 1988, pp. 24-30.
- [41] J. Hashim, "The production of metal matrix composites using the stir casting technique", doctoral thesis, Dublin City Univ., Dublin, 1999.
- [42] A. Suárez, "Evaluación de la mojadura de partículas cerámicas por aluminio mediante el método de infiltración", tesis doctoral, Univ. Alicante, España, 1999.
- [43] P. K. Mallick, *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design*, 3rd ed. USA: CRC press, 2007.
- [44] F. Morales, "Desarrollo de sustratos de carburo de silicio mediante carburización e implantación iónica de silicio monocristalino", tesis doctoral, Univ. Cádiz, España, 2003.
- [45] J. Cuevas, "Propiedades electrónicas de alambres cuánticos de carburo de silicio tipo  $\beta$ ", tesis magistral, Inst. Pol. Nacional, México, 2009.
- [46] C. Rodríguez, "Obtención de  $\beta$ -SiC mediante una fuente alterna de energía como las microondas", tesis magistral, Univ. Nac. Aut. México, México, 1999.
- [47] J. Velázquez, "Fabricación de Depósitos Compositos por Rociado Térmico de Partículas Recubiertas por Mecanofusión", tesis magistral, Inst. Pol. Nacional, México, 2009.
- [48] Goodfellow, "Standard Price List for Alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)", 2016. [En línea]. Disponible en: [http://www.goodfellow.com/pdf/416\\_1111010.pdf](http://www.goodfellow.com/pdf/416_1111010.pdf)
- [49] A. Vázquez y J. De Damborenea, *Ciencia e ingeniería de la superficie de los materiales metálicos*. Madrid: CSIC, 2001.
- [50] F. Ruiz-Cabello, "Efecto de la rugosidad y heterogeneidad superficial en fenómenos de mojado", tesis doctoral, Univ. Granada, España, 2009.
- [51] V. K. Singh, S. Chauhan, P. C. Gope, y A. K. Chaudhary, "Enhancement of Wettability of Aluminum Based Silicon Carbide Reinforced Particulate Metal Matrix Composite", *High Temp. Mater. Processes*, vol. 34, no. 2, pp. 163-170, 2014

- [52] K. Sukumaran, S. Pillai, R. Pillai, V. Kelukutty, B. Pai, K. Satyanarayana, y K. Ravikumar, "The effects of magnesium additions on the structure and properties of Al-7 Si-10 SiCp composites", *J. Mater. Sci.*, vol. 30, no. 6, pp. 1469-1472, 1995.
- [53] Y.V. Naidich, V. Zhuravlev, y N. Krasovskaya, "Silicon carbide wettability by binary alloys (Al-Si and Au-Si systems)", *High Temp.*, jul.1997.
- [54] G. R. Edwards, & D. L. Olson, "Fundamental concepts of wettability and interfacial bond strength in aluminum matrix, SiC-reinforced composites", *Center for Welding and Joining Research*, CO, USA, pp. 1-53, 1990.
- [55] M. Wohlerl and D. Bourell, "Rapid prototyping of Mg/SiC composites by a combined SLS and pressureless infiltration process", *En Solid Freeform Fabrication Symposium*, Texas Univ., pp. 79-88, Ago. 1996.
- [56] J. M. Ureña, L. Gómez de Salazar, P. Gil, E. E. Rodrigo, J. L. Martínez, y E. Baldonado, "Estudio de la reactividad entre aleaciones de aluminio y partículas de SiC", *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, vol. 39, no. 2, pp. 243-250, 2000.
- [57] Roongarun Buntan, P. Daraporn, S. Peeradech, D. Kanjana, A. Oat y P. Tapany, "Mechanical Properties of Stir-Mixed SiCp-Reinforced Aluminium Composites", *JOM*, vol.21, no. 2, pp. 73-83, 2011.
- [58] E. da Costa, F. Velasco, y M. Torralba, "Materiales compuestos de matriz metálica. II parte. Métodos de procesado y consolidación de MMCs reforzados con partículas", *Revista de metalurgia*, vol. 36, no. 3, pp. 193-197, 2000.
- [59] W. McCabe, J. Smith, y P. Harriott, *Operaciones unitarias en ingeniería química*, 4ta ed. España: McGraw-Hill, 1998.
- [60] A. Vian y J. Ocón, *Elementos de ingeniería química*. España: Aguilar, 1976.
- [61] S. Nagata, "Mixing: principles and applications", Japon: Halsted Press, 1975.
- [62] A. C. Mak, "Solid-liquid mixing in mechanically agitated vessels", Doctoral dissertation, London University, England, 1992.
- [63] García, R, *Combustión y combustibles*, 2001.
- [64] F. Millán, "Fabricación y caracterización de la aleación de aluminio reciclado con adición de silicio particulado", tesis magistral, Univ. Nac. Colombia, 2016.
- [65] J. Figueroa, "Selección y aplicación de fundentes en la fusión de aluminio para piezas de fundición", Fundytec, México, 2009.
- [66] N. D. Titov y Yu. A. Stepánov, *Tecnología del proceso de fundición*. URSS: Mir, 1981.
- [67] Rheinfelden alloys, "Primary Aluminium Alloys for Pressure Die Casting", Rheinfelden alloys GmbH & Co. KG, 2015 [Online]. Available: <http://rheinfelden-alloys.eu/en/downloads/>
- [68] Rheinfelden alloys, "Primary aluminium Casting alloys", Rheinfelden alloys GmbH & Co. KG, 2015 [Online]. Available: <http://rheinfelden-alloys.eu/en/downloads/>

- [69] *ASM Handbook volume 9 Metallography and Microstructures*, USA: ASM International, 2004.
- [70] D. Zipperian, "Silicon carbide abrasive grinding", *Quality Matters Newsletter*, vol. 1, no. 2, pp. 1-3, 2002.
- [71] KB Alloys, "Foundrymen's Guide" [Online]. Available: <http://es.slideshare.net/FoundryJoe/kb-alloys-foundrymans-guide-to-sr-and-ti-bor-23865466>
- [72] A. Güemes y N. Martín, *Ciencia de materiales para ingenieros*. España: Pearson Educación, 2012.
- [73] Z. Jastrzebski, *Naturaleza y propiedades de los materiales para ingeniería*, 2da ed. México: Pearson Educación, 1979.
- [74] S. Avner, *Introducción a la metalurgia física*, 2da ed. México: McGraw-Hill, 1995.
- [75] D. N. Wang'ombe, S. E. Maube, S. M. Maranga y J. M. Kihui, "Effect of Iron-intermetallics on the Fluidity of Recycled Aluminium Silicon Cast Alloys", in *Sustainable Research and Innovation Conference*, pp. 224-227, dec. 2014.
- [76] L. Hurtalova, J. Belan, E. Tillova y M. Chalupova, "Changes in structural characteristics of hypoeutectic Al-Si cast alloy after age hardening", *J. Mater. Sci.*, vol. 18, no. 3, pp. 228-233, 2012.
- [77] P. Fernández y O. J. Restrepo, "Análisis microestructural de una aleación de aluminio A356-T6 en conectores de alta tensión", *Revista Facultad de Ingeniería*, vol. 44, pp. 20-29, 2008.
- [78] R. Arrabal, "Optimización de la resistencia a la corrosión y oxidación de materiales compuestos A3xx.x-SiCp mediante tratamientos de modificación superficial con sales lantánidas", tesis doctoral, Univ. Comp. Madrid, España, 2006.
- [79] Satyanarayan, D. Roystan, M. Shreesaravanan, Balaguru, and C.Devanathan, "A Study on Mechanical Properties of Aluminium LM25- Sic Composites Fabricated Using Stir Casting Technique," *IJARTET*, vol. 2, pp. 45-53, Feb. 2015.
- [80] M. Vinoth, L. Arun, and P. Bhimagoud, "The Fabrication Process and Mechanical Characterization of Pure Al-Si Mmc's for Engine Applications. International Journal of Innovative Research in Science", *J. Eng. Technol*, vol. 3, n. 6, pp. 13514-13521, 2014.
- [81] S. V. Prasad y R. Asthana, "Aluminum metal-matrix composites for automotive applications: tribological considerations", *Tribol. Lett.*, 17(3), 445-453, 2004.
- [82] H. Soo and S. Hyung, "The fabrication process and mechanical properties of SiC p/Al-Si metal matrix composites for automobile air-conditioner compressor pistons," *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 202-208, Sept. 2015.
- [83] K. Paucar, "Comportamiento a la corrosión de aleaciones Mg-Al con elementos lantánidos", tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España, 2013.
- [84] El Periódico de Berg, "Información para fundidores N°1, p.2.". [En línea]. Disponible en: [http://bergsl.com/assets/pdf/periodicos/periodico\\_1.pdf](http://bergsl.com/assets/pdf/periodicos/periodico_1.pdf)



[85] ASTM E8/E8M-16a, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.

[86] ASTM E10-15a, Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

[87] ASTM E3-11, Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.

## **ANEXOS**

## ANEXO A1. NORMA ANSI H35.1 STANDARDS PARA LA DESIGNACIÓN DE TRATAMIENTOS

Tabla A1.1. Norma ANSI H35.1 standards para la designación de tratamientos de los materiales de aluminio y sus aleaciones.

Designación Básica	Características principales del tratamiento																							
F	<p><b>Tratamiento básico:</b> Tal y como fue fabricada.  <b>Aplicada</b> a productos trabajados o colados en la que no hay un especial control sobre las condiciones térmicas o procesos de endurecimiento por deformación.</p>																							
O	<p><b>Tratamiento básico:</b> Recocido.  <b>Aplicada</b> a productos trabajados que han sido calentados para efectos de recristalización, produciendo una baja resistencia. Los productos colados que son recocidos mejoran su ductilidad y estabilidad dimensional.</p>																							
H	<p><b>Tratamiento básico:</b> Endurecida por deformación.  <b>Aplicada</b> solo a productos trabajados, para aumentar su resistencia mediante el endurecimiento por deformación a través de trabajo en frío. El endurecimiento por deformación puede ser seguido de un tratamiento térmico para producir una reducción en la resistencia del material.</p>																							
	<p style="text-align: center;"><b>Subdivisión</b></p> <p>Primer dígito indica una operación básica. Segundo dígito indica grado de endurecimiento por deformación, X es cualquier primer dígito.</p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 15%;">H1</td> <td style="width: 40%;">Solo endurecimiento por deformación.</td> <td style="width: 15%;">HX1,HX3,</td> <td style="width: 30%;">Dureza intermedia entre la subdivisión HX2, HX4, HX8.</td> </tr> <tr> <td>H2</td> <td>Endurecido por deformación y parcialmente recocido.</td> <td>HX5,HX7</td> <td>Cuarto de dureza</td> </tr> <tr> <td>H3</td> <td>Endurecido por deformación y estabilizado (gradualmente envejecida)</td> <td>HX2</td> <td>Dureza media</td> </tr> <tr> <td>H4</td> <td>Endurecido por deformación, pintados.</td> <td>HX4</td> <td>Alta dureza</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>HX8</td> <td>Extra dureza</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>HX9</td> <td></td> </tr> </table> <p>Tercer dígito indica la variación del endurecimiento por deformación del segundo dígito, pueden ser vistos en tablas estandarizadas publicadas en libros especializados en Al y sus aleaciones.</p>	H1	Solo endurecimiento por deformación.	HX1,HX3,	Dureza intermedia entre la subdivisión HX2, HX4, HX8.	H2	Endurecido por deformación y parcialmente recocido.	HX5,HX7	Cuarto de dureza	H3	Endurecido por deformación y estabilizado (gradualmente envejecida)	HX2	Dureza media	H4	Endurecido por deformación, pintados.	HX4	Alta dureza			HX8	Extra dureza			HX9
H1	Solo endurecimiento por deformación.	HX1,HX3,	Dureza intermedia entre la subdivisión HX2, HX4, HX8.																					
H2	Endurecido por deformación y parcialmente recocido.	HX5,HX7	Cuarto de dureza																					
H3	Endurecido por deformación y estabilizado (gradualmente envejecida)	HX2	Dureza media																					
H4	Endurecido por deformación, pintados.	HX4	Alta dureza																					
		HX8	Extra dureza																					
		HX9																						
W	<p><b>Tratamiento básico:</b> Tratado térmicamente por solución.  <b>Aplicada</b> productos trabajados que después de recibir un tratamiento térmico quedan con una estructura inestable y sufren envejecimiento natural.</p>																							
T	<p><b>Tratamiento básico:</b> Materiales tratados térmicamente.  <b>Aplicada</b> a productos trabajados y colados que son tratados térmicamente, algunas veces con un suplementario endurecimiento por deformación, para producir un estable tratamiento.</p>																							
	<p style="text-align: center;"><b>Subdivisión</b></p> <p>Primer dígito indica el tipo de tratamiento.</p> <p>T1 Naturalmente envejecida después de un enfriamiento a elevada temperatura.  T2 Trabajada en frío después de enfriarla a elevada temperatura y envejecida naturalmente.  T3 Tratamiento térmico de solución, trabajado en frío y envejecido naturalmente.  T4 Tratamiento térmico de solución y envejecido naturalmente.  T5 Artificialmente envejecido después de un enfriamiento a elevada temperatura.  T6 Tratamiento térmico de solución y envejecido artificialmente.  T7 Tratamiento térmico de solución y sobre envejecido.  T8 Tratamiento térmico de solución, trabajado en frío y envejecido artificialmente.  T9 Tratamiento térmico de solución, artificialmente envejecido, y trabajado en frío.  T10 Trabajada en frío después de enfriarla a elevada temperatura y envejecida artificialmente.</p> <p>Segundo dígito indica variación en el tratamiento básico, pudiendo ser vistos en tablas estandarizadas publicadas en libros especializados en aluminio y sus aleaciones.  Tercer dígito indica alivio de tensiones, pudiendo ser vistos en tablas estandarizadas publicadas en libros especializados en aluminio y sus aleaciones.</p>																							

(Fuente: Elaboración propia)

## ANEXO A2. POTENCIALES APLICACIONES DE LOS MCM

Tabla A2.1. Potenciales aplicaciones de los materiales compuestos de matriz metálica en función de sus propiedades requeridas.

<i>Application</i>	<i>Required properties</i>	<i>Material system</i>	<i>Processing technique</i>
Automotive and heavy goods vehicle Bracing systems, piston rods, frames, piston, piston pins, valve spring cap, brake discs, disc brake calliper, brake pads, cardan shaft	High specific strength and stiffness, temperature resistance, low thermal expansion coefficient, wear resistance, thermal conductivity	Al-SiC, Al-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Mg-SiC, Mg-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , discontinuous reinforcements	Fusion infiltration, extrusion, forging, gravity die casting, die casting, squeeze-casting
Accumulator plate	High stiffness, creep resistance	PbC, Pb-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fusion infiltration
Military and civil air travel Axle tubes, reinforcements, blade- and gear box casing, fan and compressor blades	High specific strength and stiffness, temperature resistance, impact strength, fatigue resistance	Al-B, Al-SiC, Al-C, Ti-SiC, Al-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Mg-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Mg-C continuous and discontinuous reinforcements	Fusion infiltration, hot pressing, diffusion welding and soldering, extrusion, squeeze-casting
Turbine blades	High specific strength and stiffness, temperature resistance, impact strength, fatigue resistance	W super alloys, z. B. Ni <sub>3</sub> Al, Ni-Ni <sub>3</sub> Nb	Fusion infiltration, aligned solidification near net-shaped components
Aerospace industry Frames, reinforcements, aerials, joining elements	High specific strength and stiffness, temperature resistance, low thermal expansion coefficient, thermal conductivity	Al-SiC, Al-B, Mg-C, Al-C, Al-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , continuous and discontinuous reinforcements	Fusion infiltration, extrusion, diffusion welding and joining (spacial structures)
Energy techniques (electrical components and conducting materials) Carbon brushes	High electrical and thermal conductivity, wear resistance	Cu-C	Fusion infiltration, powder metallurgy
Electrical contacts	High electrical conductivity, temperature and corrosion resistance, burn-up resistance	Cu-C, Ag-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Ag-C, Ag-SnO <sub>2</sub> , Ag-Ni	Fusion infiltration, powder metallurgy, extrusion, pressing
Super conductor	Superconducting, mechanical strength, ductility	Cu-Nb, Cu-Nb <sub>3</sub> Sn, Cu-YBaCO	Extrusion, powder metallurgy, coating technologies
Other applications Spot welding electrodes	Burn-up resistance	Cu-W	Powder metallurgy, infiltration
Bearings	Load carrying capacity, wear resistance	Pb-C, Brass-Teflon	Powder metallurgy, infiltration

(Fuente: Kainer, 2006, p.51 [38])

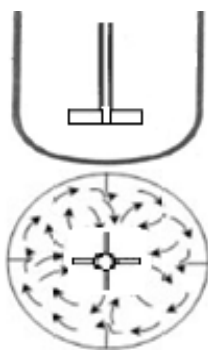
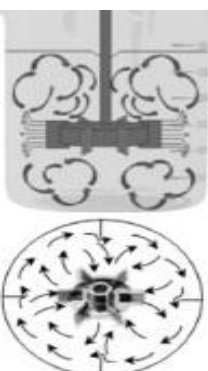
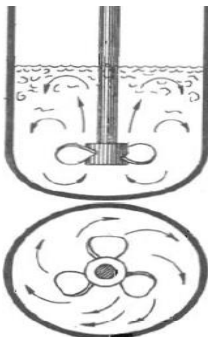
Tabla A2.2. Parámetros para la selección del material matriz.

FIBRA	MATRIZ	APLICACIONES POTENCIALES
Grafito	Aluminio Magnesio Plomo Cobre	Estructuras de satélites, misiles y helicópteros. Estructuras espaciales y de satélites. Placas de almacenaje de baterías. Contactos eléctricos y rodamientos.
Boro	Aluminio Magnesio Titanio	Álabes del compresor y soportes estructurales. Estructuras de antenas. Aspas de ventiladores para motores de reacción.
Borsic (B + SiC)	Aluminio Titanio	Aspas de ventiladores para motores de reacción. Estructuras y aspas de ventilador sometidas a altas temperaturas.
Alúmina	Aluminio Plomo Magnesio	Restricciones de superconductor en reactores de potencia de fisión. Placas de almacenaje de baterías. Estructuras de transmisión para helicópteros.
Carburo de silicio	Aluminio Titanio Superaleación	Estructuras de alta temperatura. Estructuras de alta temperatura. Componentes de motor sometidos a alta temperatura.
Molibdeno	Superaleación	Componentes de motor de alta temperatura.
Tungsteno	Superaleación	Componentes de motor de alta temperatura.

(Fuente: Fishman and Dhingra, 1988, p. 3, [40])

## ANEXO A3. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LOS AGITADORES SEGÚN EL TIPO DE RODETE

Tabla A3.1. Características principales de los agitadores según el tipo de su rodete.

TIPOS DE AGITADORES SEGÚN EL TIPO DE SU RODETE	
<p>Agitador tipo paletas</p> 	<p>Consta de una pala plana que gira sobre un eje vertical, estos agitadores pueden tener dos tres o más paletas</p> <p>Producen flujo radial-tangencial, pero puede ser axial si se inclinan las palas</p> <p>Giran a velocidades comprendidas entre 20 y 600 rpm</p> <p>La longitud de un brazo de paletas (de punta a punta) suele oscilar entre 1/2 y 1/3 del diámetro del recipiente, el espesor de la paleta (su altura) varía entre 1/4 y 1/8 de dicha longitud</p> <p>Existe agitadores de pala plana, de reja, de ancla, palas planas inclinadas, doble paleta una superior y otra inferior</p> <p>Se emplean muy frecuentemente porque son adaptables a casos muy extremos, y por la facilidad con que se pueden modificar (longitud y número de paletas), pudiéndose construir con materiales muy distintos y de tamaños diversos</p> <p>Los de paletas cortas se suelen utilizar para disoluciones y dispersiones, y para mantener en buen estado de dispersión las suspensiones de sólidos (incluso fibrosos)</p> <p>Los de paletas largas y varias series de brazos se emplean para agitar masas viscosas y papillas densas hasta unos 700000 cps</p> <p>En ningún momento se emplean para provocar mezclas rápidas e íntimas; en tal caso hay que acudir a los aparatos muy revolucionados</p>
<p>Agitador tipo turbina</p> 	<p>El rodete puede ser abierto, semicerrado o cerrado, y las placas pueden ser rectas o curvas, inclinadas o verticales</p> <p>El diámetro del rodete es menor que el de las palas, variando entre el 30 y el 50 por 100 del diámetro del tanque</p> <p>Las turbinas son eficaces para un amplio intervalo de viscosidades, trabajando a velocidades elevadas o medias</p> <p>En líquidos de baja viscosidad las turbinas generan fuertes corrientes que persisten en todo el tanque, destruyendo bolsas de fluido estancado</p> <p>Crean flujo radial (el líquido se desplaza perpendicularmente al eje del rodete) como tangencial, pero puede ser axial si se inclinan las palas</p> <p>Los componentes tangenciales inducen la formación de vórtices y remolinos, que deben ser destruidos por placas deflectoras o por un anillo difusor para que la agitación sea más eficaz</p> <p>Existe turbinas abiertas de palas rectas, turbina de disco con palas, turbina abierta de palas curvas</p> <p>En ocasiones se montan dos o más rodetes sobre un mismo árbol, cuando la altura de líquido es grande. En estos casos, se puede emplear cierta combinación de rodetes: una hélice, con flujo axial descendente, en la parte superior del árbol, y una turbina en la parte inferior, que toma la corriente procedente de aquella y la distribuye radialmente</p>
<p>Agitador tipo hélice</p> 	<p>Una hélice es un rodete que produce un flujo de carácter axial (desplazamiento del líquido en el sentido del eje del rodete) pero junto a las paredes del depósito se hace tangencial</p> <p>Su campo de aplicación principal es para líquidos bastante fluidos y para agitar dispersiones de sólidos en líquidos poco viscosos y cuando el contenido en materia sólida es pequeño</p> <p>Las hélices pequeñas giran con la misma velocidad que el motor entre 1150 y 1750 rpm y las grandes giran entre 400 y 800 rpm, por lo que crean una gran turbulencia en la zona próxima al rodete</p> <p>Las corrientes de flujo que salen del rodete continúan a través del líquido en una dirección determinada hasta que chocan con el fondo o las paredes del tanque</p> <p>Las placas de un rodete cortan o cizallan vigorosamente el líquido</p> <p>Los agitadores de hélice son eficaces en tanques muy grandes</p> <p>En tanques profundos pueden instalarse dos o más hélices sobre el mismo eje, generalmente dirigiendo el líquido en la misma dirección, a veces dos hélices operan en direcciones opuestas, para crear una zona de turbulencia elevada</p>

(Fuente: Elaboración propia basada en [59], [60])

## ANEXO A4. PARTES AUTOMOTRICES ADQUIRIDAS PARA EL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

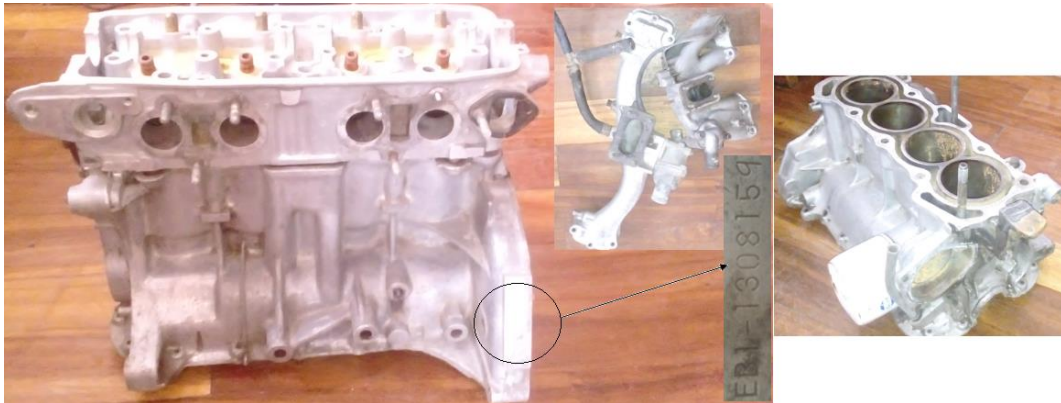


Figura A4.1. Block con su cabezote y múltiples de admisión y escape de un automóvil Honda civic del año 1973.

(Fuente: Elaboración propia)

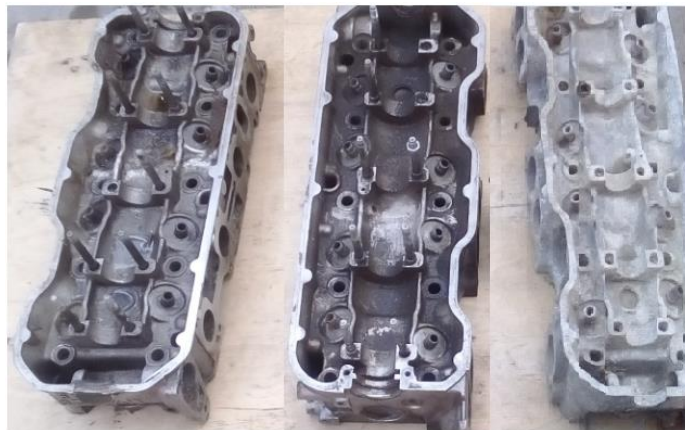


Figura A4.2. Tres cabezotes 4DZ1 de un automóvil Isuzu.

(Fuente: Elaboración propia)

# ANEXO A5. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE ELEMENTOS QUÍMICOS DEL BLOCK DE UN AUTOMÓVIL HONDA CIVIC Y DEL CABEZOTE 4ZD1 DE UN AUTOMÓVIL ISUZU



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA



Resultados de análisis por Espectrometría de Chispa

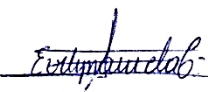
**Solicitante** : Ing. Gustavo Barona  
**No. Referencia** : RM-8588  
**Fecha** : 27-06-2016  
**Muestras recibidas** : Dos muestras de aluminio

La cuantificación de los metales presentes en la muestra se realizó empleando el Espectrómetro de Chispa marca BRUKER modelo Q4TASMAN. A continuación los resultados obtenidos:

Metales	Muestra cabezote Isuzu 4ZD1 (%)	Muestra Block Honda CIVIC 1973 (%)
Silicio (Si)	6,27	10,32
Hierro (Fe)	0,34	0,23
Magnesio (Mg)	0,15	0,29
Zinc (Zn)	0,16	0,02
Titanio (Ti)	0,03	0,03
Plomo (Pb)	0,02	0,01
Estaño (Sn)	0,01	----
Galio (Ga)	0,02	0,02
Vanadio (V)	0,01	0,01
Cobre (Cu)	2,30	0,01
Manganeso (Mn)	0,26	0,35
Cromo (Cr)	0,02	0,01
Níquel (Ni)	0,04	----
Aluminio (Al)	90,32	88,66

  
 Ing. Alicia Guevara C. PhD.  
**Jefe de Departamento**



  
 MSc. Evelyn Criollo T.  
**Jefe de Laboratorio**



## ANEXO A6. RESULTADO DEL ANÁLISIS DE ELEMENTOS QUÍMICOS DEL CABEZOTE DE UN AUTOMÓVIL HONDA CIVIC



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA

Resultados de análisis por Espectrometría de Chispa



**Solicitante** : Ing. Gustavo Barona  
**No. Referencia** : ST - 7011  
**Fecha** : 27-07-2016  
**Muestras recibidas** : Una muestra de cabezote de Honda Civic 1973

La cuantificación de los metales presentes en la muestra se realizó empleando el Espectrómetro de Chispa marca BRUKER modelo Q4TASMAN. A continuación los resultados obtenidos:

Metales	Cabezote de Honda Civic 1973 (%)
Silicio (Si)	6,50
Hierro (Fe)	0,45
Cobre (Cu)	2,70
Manganeso (Mn)	0,12
Magnesio (Mg)	0,21
Cromo (Cr)	0,03
Níquel (Ni)	0,04
Zinc (Zn)	0,37
Titanio (Ti)	0,03
Galio (Ga)	0,02
Plomo (Pb)	0,04
Estaño (Sn)	0,02
Aluminio (Al)	89,45

Ing. Diana Endara D. PhD.  
Jefe de Departamento (e)

## ANEXO A7. HOJA DE COMPRA DEL POLVO DE SiC MALLA #400 Y FICHA DE PRESENTACIÓN DE PROPIEDADES PRINCIPALES

 <p><b>FERRETERIA V. M. ABSALÓN GUEVARA</b> FERVIMAG CIA. LTDA.</p> <p>Los Rios # 812 entre Nuevo de Octubre y Hurtado, Edif. VMAGG Teléfs: 2 193871 / 2193523 / 2369182 * Casilla: 09-01-3627 Cel: 099 9488129 * e-mail: lguevara@absalonguevara.com.ec Guayaquil - Ecuador</p> <p>R.U.C.: 0991272798001 AUTORIZACIÓN S.R.L. No. 1117700119</p>	 <p><b>Gates</b> BANDAS INDUSTRIALES AMERICANAS</p>	 <p><b>RIDGID</b> HERRAMIENTAS MANUALES AMERICANAS</p>	 <p><b>FLEXCO</b> Alligator GRAPAS PARA BANDAS TRANSPORTADORA</p>	 <p><b>SCHULZ</b> PRENSAS HIDRAULICAS COMPRESORES - CIZALLAS</p>  <p><b>SAINT-GOBAIN</b> PIEDRAS Y POLVO DE EMERIL</p>	
<p><b>Importamos Calidad</b></p> <p style="font-size: 1.2em;"><b>FACTURA</b> SERIE <b>001-001</b> Nº <b>0026021</b></p>					
CLIENTE : 02000 JUAN CARLOS GUILCERMEZ FRIJILLA R.U.C. : 050285164-4 DIRECCIÓN: CARCELEN GUÍA DE REMISIÓN: 09428		TELEFONO : 0995906753 FECHA : 14/Sep/2016 FECHA DE VENC.: 14/Sep/2016 ORDEN DE COMPRA :		CIUDAD : QUITO VENDEDOR : 02 CONDICIONES: CONTADO	
CODIGO	DESCRIPCION	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	DCTO.	VALOR DE VENTA
CARB-SIL-400	CARBURO DE SILICIO EN POLVO # 400	5,00 LB	\$ 4,50	0%	\$ 22,50
PREPARADO	REVISADO	RECIBI CONFORME	VALOR NETO US\$ 22,50 12% I.V.A. 3,15 0% I.V.A. 0,00 SUBTOTAL 25,65 OTROS 4,35 TOTAL US\$ 30,00		
* UNA VEZ SALIDA LA MERCADERIA DEL ALMACEN NO SE ACEPTAN DEVOLUCIONES. * SIRVASE CANCELAR CON CHEQUE CRUZADO A LA ORDEN DE FERRETERIA V.M. ABSALON GUEVARA CIA. LTDA. * LA MERCADERIA VIAJA POR CUENTA Y RIESGO DEL CLIENTE.					

### CARBURO DE SILICIO SAINT-GOBAIN EXCELENCIA EN CALIDAD

El Carburo de Silicio es un grano extremadamente duro y resistente al calor, producido por la aglutinación entre la sílice y to coque de petróleo en proceso industrial que utiliza altas temperaturas, senda utilizado como materia prima en la siderurgia, en los abrasivos y en los refractarios. El Carburo de Silicio Saint-Gobain Materiales Cerámicos presenta mayor grado de pureza en su composición y homogeneidad de ros granos, además de la alta resistencia a la oxidación, al calor y a la humedad, lo tornando un producto muy superior a los compuestos similares. La Saint-Gobain Materiales Cerámicos produce diferentes tipos de granos para cada necesidad de aplicación:

- **Abrasivos:** material para desbaste y pulimento de superficies, pisos antideslizante, instrumentos de cortar, entre otros.
- **Refractarios:** piezas cerámicas de alta densidad, revestimientos refractarios moldados, masas, crisol filtros, entre otros.
- **Metalúrgicos:** utilizado como agente desoxidante y liga para la producción de hierro y acero, en sustitución a la combinación carbono / hierro-silicio.

### PRINCIPALES PROPIEDADES

Aplicaciones Abrasivas:

Dureza: 9,5 - 9,75 (Mohs) - Densidad: 3,21 g/cm - Colores: negro, verde

Aplicaciones Refractarias: Calor Específico: C = 0,14 kcal/kg a 0 °C - C = 0,31 kcal/kg a 1.000 °C - C = 0,35 kcal/kg a 1.550 °C

Conductividad Térmica: 16,7 kcal/h. m. K a 500 °C-13,6 kcal/h. m .K a 900 °C-9,9 kcal/h .m. K a 1300 °C

Expansión Termal: 4,7 x 10<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup>- Resistencia Eléctrica: 10-10<sup>6</sup> Ω.cm

### Propiedades Químicas y Físicas

Material no es atacado por los ácidos HCl, HF, HNO<sub>3</sub>, Y H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; presenta excelentes propiedades antioxidantes en fundición de hierro; es oxidado por el aire y oxigeno cuando es expuesto a temperaturas alrededor 1000°C; se disuelven en fusiones alcalinas comunes y oxidadas; composición química depende del tipo, tamaño y otras variables del grano cesado que puede presentar pequeñas diferencias; es el tercer más duro material existente, se asemeja al diamante; presenta elevado punto de fusión, 2500 °C, cuando se descompone en grafito y silicio.

# ANEXO A8. ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA DEL SiC MALLA #400 MEDIANTE DISPERSIÓN DINÁMICA DE LUZ

Análisis de la distribución del tamaño de partícula mediante dispersión dinámica de luz, utilizando como medio agua. Para determinar el diámetro promedio de las partículas de SiC malla #400

Laboratorio: LANUM Facultad de Ingeniería Mecánica EPN.  
 Tipo de muestra: polvo de SiC malla #400.  
 \*\*\*\* Brookhaven Instruments Corp. \*\*\*\*  
 ZetaPlus Particle Sizing Software Version 4.20  
 Sample Identification:Carburo de silicio-1 (Combined)  
 Operator Identification: OC  
 Measurement Date: Nov 25, 2016  
 Measurement Time: 08:43:14  
 Batch: 0

### \*\*\*\* Measurement Parameters \*\*\*\*

Temperature = 20.0  
 Suspension = Water  
 Viscosity = 1.002 cp  
 Ref.Index Fluid = 1.331  
 Angle = 90.00  
 Wavelength = 659.0 nm  
 Dust Cutoff = 60.00  
 Runs Completed = 5  
 Run Duration = 00:00:10  
 Total Elapsed Time = 00:00:50  
 Average Count Rate = 370.9 kcps  
 Ref.Index Real = 2.550  
 Ref.Index Imag = 0.000

### \*\*\*\* Measurement Results \*\*\*\*

Carburo de silicio-1 (Combined)  
**Effective Diameter: 24045.8**  
 Polydispersity: 0.692  
 Baseline Index: 0.0/100.00%  
 Elapsed Time = 00:00:50

Run	Eff. Diam. (nm)	Half Width (nm)	Polydispersity	Baseline Index
1	12673.9	10324.5	0.664	0.0/100.00%
2	64231.6	4541.9	0.005	0.0/100.00%
3	839.2	553.9	0.436	0.0/100.00%
4	41187.5	27280.8	0.439	0.0/100.00%
5	35868.1	23742.9	0.438	0.0/100.00%
Mean	30960.1	13288.8	0.396	0.0/100.00%
Std.Error	11129.5	5256.1	0.107	0.0/ 0.00
Combined	24045.8	20005.2	0.692	0.0/100.00%

Análisis de la distribución del tamaño de partícula mediante dispersión dinámica de luz, utilizando como medio etanol. Para determinar el diámetro promedio de las partículas de SiC malla #400

Laboratorio: LANUM Facultad de Ingeniería Mecánica EPN.  
 Tipo de muestra: polvo de SiC malla #400.

\*\*\*\* Brookhaven Instruments Corp.\*\*\*\*

ZetaPlus Particle Sizing Software Version 4.20  
 Sample Identification:Carburo de silicio-4 (etanol) (Combined)  
 Operator Identification: OC  
 Measurement Date: Nov 25, 2016  
 Measurement Time: 09:33:12  
 Batch: 0

\*\*\*\* Measurement Parameters \*\*\*\*

Temperature = 20.0  
 Suspension = Ethanol  
 Viscosity = 1.195 cp  
 Ref.Index Fluid = 1.359  
 Angle = 90.00  
 Wavelength = 659.0 nm  
 Dust Cutoff = 60.00  
 Runs Completed = 5  
 Run Duration = 00:00:10  
 Total Elapsed Time = 00:00:50  
 Average Count Rate = 8.0 kcps  
 Ref.Index Real = 2.550  
 Ref.Index Imag = 0.000

\*\*\*\* Measurement Results \*\*\*\*

Carburo de silicio-4 (etanol) (Combined)  
**Effective Diameter: 22733.4**  
 Polydispersity: 0.659  
 Baseline Index: 0.0/100.00%  
 Elapsed Time = 00:00:50

Run	Eff. Diam. (nm)	Half Width (nm)	Polydispersity	Baseline Index
1	15485.4	11827.5	0.583	0.0/100.00%
2	38690.4	29888.4	0.597	0.0/100.00%
3	6883.3	5588.9	0.659	0.0/100.00%
4	11985.2	10873.6	0.823	0.0/100.00%
5	33888.2	26078.4	0.592	5.5/100.00%
Mean	21386.5	16851.4	0.651	1.1/100.00%
Std.Error	6282.0	4705.9	0.045	1.1/ 0.00
Combined	22733.4	18457.0	0.659	0.0/100.00%

# ANEXO A9. FICHA TÉCNICA DEL FUNDENTE ESCORIFICANTE ALU FUNDEX EXTRA

## INDUSTRIAL JUVAL/LTDA.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	<b>CÓDIGO</b> FT 1235	<b>FECHA VIGENCIA</b> 31/01/2012
	<b>VERSIÓN</b> 2	Página 1 de 1

Nombre : **ALU FUNDEX EXTRA**  
 Código : 1235  
 Descripción general : Fundente escorificante para todas las aleaciones de Aluminio.  
 Excelente para la recuperación de escorias y virutas.

### PROPIEDADES

### ESPECIFICACIÓN

Presentación : Polvo  
 Peso específico : 1.28-1.42  
 Color : Rosado  
 Olor : Penetrante  
 Empaque : Saco de polipropileno, con bolsa interior de polietileno x 25 o 50 kilos.  
 Almacenamiento : Lugar seco bajo techo. Reparar bolsas y sacos rotos inmediatamente. Colocar máximo 10 sacos o 3 pallets en vertical  
 Precauciones de uso : Usar guantes PVC, gafas protectoras y máscara para polvos.

N/A: No Aplica  
 N/C: No Conocido

ELABORÓ	REVISÓ	APROBÓ
(Firma)	(Firma)	(Firma)
NOMBRE: Álvaro Romero Osario CARGO : Ing. División Fundición. FECHA : 27/01/2012	NOMBRE: María T. Gómez R. CARGO : Jefe de Producción FECHA : 27/01/2012	NOMBRE : Hernando Bueno Azuero CARGO : Gerente FECHA : 27/01/2012

## **INDUSTRIAL JUVAL/LTDA.**

e-mail: juvCNol@juval.com

http://www.juval.com

### **ALU FUNDEX E**

ALU FUNDEX son una serie de fundentes que protegen, cubren y limpian las aleaciones de aluminio durante la fusión. Estos productos forman una capa protectora sobre el metal fundido, la cual reduce la oxidación y minimiza la absorción de hidrógeno.

#### **VENTAJAS QUE SE OBTIENEN CON EL USO DE ALU FUNDEX:**

- ✓ Reducción de la oxidación y las pérdidas de aluminio con un consiguiente incremento de la fluidez.
  - ✓ Absorción de materias no metálicas o inclusiones es otro de los problemas que resuelve el ALU FUNDEX, con la consiguiente mejora en las propiedades mecánicas.
  - ✓ Formación de una capa protectora que conlleva a una menor facilidad de absorción de gases.
  - ✓ Reducción del contenido metálico en las escorias, por lo tanto mayor rendimiento de fusión.
  - ✓ Seguridad. Actuación siempre idéntica. Suministro del fundente libre de humedad.
- **ALU FUNDEX E:**  
Fundente escorificante de alta eficiencia, aplicado en la fundición de aluminio en crisol u horno de reverbero. Aplicación del 0.3-0.5% en peso con respecto a la carga dependiendo del tipo de material a fundir. Tiene excelente recuperación de metal en hornos tipo reverbero.

#### **MÉTODO DE APLICACIÓN DEL ALU FUNDEX E**

1. Calentar el crisol vacío. Luego el lingote y/o chatarra y añadir 250 gramos de ALU- FUNDEX E, por cada 50 kg de carga.  
El ALU FUNDEX E, protege la carga durante la fusión, reduce la oxidación y la absorción de gases. Debido a la disminución de óxidos, el aluminio tiene mayor colabilidad.
2. Cuando la temperatura alcance los 700°C, apagar el fuego o sacar el crisol del horno. El calor residual elevará la temperatura de la carga hasta a nos 750°C.
3. Espolvorear sobre la superficie 250gr de ALU FUNDEX E, por cada 50kg de carga y dejar reposar un minuto.  
El ALU FUNDEX E, produce una reacción exotérmica con la escoria, con lo cual se logra que el metal retenido por la escoria se desprenda y regrese al baño.
4. Poner en íntimo contacto el fundente con la escoria mediante agitación apropiada
5. Con una cuchara perforada retirar la escoria ya libre de metal y proceder a la colada. Las temperaturas adecuadas de colada son:

750°C	Para piezas livianas de espesor inferior a 10mm.
710°C	Para piezas de espesor entre 10 y 35mm.
690°C	Para piezas de espesor superior a 35mm.

Debe evitarse la excesiva temperatura, de lo contrario aumentar la absorción de gas y las pérdidas por oxidación.

#### **MÉTODO DE APLICACIÓN DEL ALU FUNDEX E EN HORNO REVERBERO:**

1. Una vez terminada la colada y alcanzada la temperatura de vaciado, adicionar sobre la superficie de metal ALU FUNDEX E en bolsas pequeñas procurando distribuir el material homogéneamente sobre el baño. Si se dispone de una pistola de inyección de fundente, este producto puede ser introducido por este medio.
2. Agitar enérgicamente el baño para llevar las inclusiones a la superficie y poner el ALU FUNDEX E en íntimo contacto con la escoria y metal.
3. Retirar la escoria con la rastra y observar la consistencia de la escoria. Si presenta todavía mucho aluminio metálico atrapado, deberá ajustarse la cantidad hasta encontrar el punto ideal de aplicación. La adición de ALU FUNDEX E se puede situar entre 0,3 a 0,5% en peso.  
En hornos de gran tamaño la adición es menor situándose en 0.1-0.3%.

CARRERA 53F No.5C-16 - PBX: 4203188 FAX: 2907337 APARTADO AEREO (P.O.BOX) 1716  
BOGOTÁ D.C.- COLOMBIA

# ANEXO A10. FICHA TÉCNICA DEL FUNDENTE DESGASIFICANTE APARTAGAS H7-50

## INDUSTRIAL JUVAL/LTDA.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	<b>CÓDIGO</b> FT 1260	<b>FECHA VIGENCIA</b> 31/01/2012
	<b>VERSIÓN</b> 2	Página 1 de 1

Nombre : **APARTAGAS H7-50**  
 Código : 1260  
 Descripción general : Desgasificante para Aluminio y Magnesio, en hornos de crisol pequeños.

### PROPIEDADES

### ESPECIFICACIÓN

Presentación : Pastilla.  
 Peso específico : 50gr.  
 Color : Azul.  
 Olor : Penetrante.  
 Empaque : Caja de cartón x 36Kg  
 Almacenamiento : Lugar seco bajo techo. Máximo tres cajas en vertical. Máximo dos pallets en vertical  
 Precauciones de uso : Usar guantes PVC, gafas protectoras y máscara para polvos.

N/A: No Aplica  
 N/C: No Conocido

ELABORÓ	REVISÓ	APROBÓ
(Firma)	(Firma)	(Firma)
NOMBRE: Álvaro Romero Osario CARGO : Ing. División Fundición. FECHA : 27/01/2012	NOMBRE: María T. Gómez R. CARGO : Jefe de Producción FECHA : 27/01/2012	NOMBRE : Hernando Bueno Azuero CARGO : Gerente FECHA : 27 /01/2012

## **INDUSTRIAL JUVAL/LTDA.**

e-mail: juvCNol@juval.com

http://www.juval.com

## **APARTAGAS**

APARTAGAS es un rápido y efectivo desgasificante para aluminio y sus aleaciones, evitando así la porosidad en la pieza fundida.

### **CAUSA Y EFECTO DE LA POROSIDAD GASEOSA**

La porosidad que se presenta en las piezas coladas y conocida con el nombre de "picado de aguja", es siempre debida a hidrógeno disuelto en el metal fundido, cuyo gas es expulsado en pequeñas burbujas a través de la pieza mientras esta se solidifica. La presencia de hidrógeno se debe en primer lugar a condiciones defectuosas del horno, herramientas húmedas, chatarra oxidada y prolongado mantenimiento del metal a excesiva temperatura. Piezas de aluminio porosas, significan piezas rechazables, con baja resistencia mecánica, ausencia de compacidad y mal acabado superficial.

### **DESGASIFICACIÓN:**

Con el objeto de eliminar la porosidad, se ha desarrollado el APARTAGAS que proporciona una rápida y cómoda desgasificación, del baño, a la vez que es más efectiva que cualquier otro tipo de desgasificación, por las siguientes razones:

- Se sumerge en el baño.
- No requiere destreza en su manejo.
- No necesita equipo complicado ni costoso.
- No es tóxico.
- Es extraordinariamente eficaz, dada la descomposición de sus moléculas, ya que se producen elementos en estado activo que reaccionan químicamente con el hidrógeno.
- Refina el grano.
- No ofrece peligro ni para el operario ni para el metal.

### **TIPOS DE APARTAGAS**

#### **• APARTAGAS H7:**

Enérgico desgasificante con reacción rápida, para hornos de crisol y de reverbero pequeños.

Empaque:

Caja x 760 unid. (Pastilla x 50 grs).

Caja x 36 kls (Pastilla x 1 kl).

#### **• APARTAGAS H4:**

Desgasificante de acción controlada especialmente diseñado para hornos de reverbero grandes. Su acción toma aproximadamente 10 minutos.

Empaque:

Caja de cartón x 36 kls



### **PRESENTACIÓN DEL PRODUCTO:**

APARTAGAS se presenta en dos formas -Pastillas y Polvo-, ambos tienen la misma finalidad y efecto. Las pastillas vienen en un tamaño de 50, 200, 500 y 1000 gramos.

### **CANTIDADES RECOMENDADAS:**

Para coladas a base de lingotes se recomienda el 0.15 % de APARTAGAS con respecto al metal. Si las coladas son hechas a base de desperdicios o chatarras, se deberá utilizar un 0.25%.

### **MODO DE EMPLEO**

#### **APLICACIÓN EN HORNO DE CRISOL:**

Cuando la temperatura alcance 700°C, apagar el quemador o sacar el crisol del horno. El calor residual eleva la temperatura de la carga hasta unos 750°C. Debe evitarse la excesiva temperatura, de lo contrario aumenta la absorción de gas y las pérdidas por oxidación.

Cuando la temperatura comienza a descender, se sumergen por medio de una campana perforada, las tabletas o el polvo necesario para desgasificar el metal fundido. Manténgase la campana en el fondo del crisol hasta que cese el desprendimiento de burbujas. La eficacia del APARTAGAS radica en su suave y prolongado desprendimiento de pequeñas burbujas sin verter el metal fuera del crisol.

Se hace énfasis en que la desgasificación debe hacerse con una temperatura descendente. Si la temperatura aún está subiendo, la desgasificación no va a ser igual de efectiva.

#### **APLICACIÓN EN HORNO REVERBERO:**

De acuerdo al tamaño del horno, calcular la cantidad a adicionar y hacer dos aplicaciones, cada una con la mitad del total de APARTAGAS a emplear. Las pastillas se deben sumergir al fondo mediante una bandeja invertida perforada, para que permita la salida de gases en la medida en que se van generando. Una vez sumergida la bandeja, ésta debe ser movida por todas las zonas del horno.

#### **APLICACIÓN EN HORNO DE INDUCCIÓN:**

La aplicación es igual a la del horno de crisol.

NOTA: Pinte todas las herramientas con la pintura de protección INJEMAQ AL 397

# ANEXO A11. FICHA TÉCNICA DE LA PINTURA REFRACTARIA INJEMAQ AL 397

## INDUSTRIAL JUVAL/LTDA.

<b>FICHA TÉCNICA</b>	<b>CÓDIGO</b> FT 1520	<b>FECHA VIGENCIA</b> 31/01/2012
	<b>VERSIÓN</b> 2	Página 1 de 1

Nombre : **INJEMAQ AL 39**  
 Código : 1520  
 Descripción general : Recubrimiento desmoldante para coquillas en fundición,  
 todas las aleaciones livianas.  
 Presenta acabado muy fino.

### PROPIEDADES

### ESPECIFICACIÓN

Presentación : Pasta  
 Peso específico : 1.78-1.92  
 Color : Blanco  
 Olor : Sin olor específico  
 Empaque : Caneca plástica por 35Kg  
 Almacenamiento : Lugar seco bajo techo, en caso de rompimiento del  
 empaque debe trasvasarse a uno de iguales  
 características. Máximo 2 o 3 pallets en vertical  
 Precauciones de uso : Usar guantes PVC, gafas protectoras y máscara para  
 polvos.

N/A: No Aplica  
 N/C: No Conocido

ELABORÓ	REVISÓ	APROBÓ
(Firma)	(Firma)	(Firma)
NOMBRE: Álvaro Romero Osario CARGO : Ing. División Fundición. FECHA : 27/01/2012	NOMBRE: María T. Gómez R. CARGO : Jefe de Producción FECHA : 27/01/2012	NOMBRE : Hernando Bueno Azuero CARGO : Gerente FECHA : 27 /01/2012

CRA 53 F N° 5 C - 16 PBX: 4203188 FAX: 2907337  
 E-mail: [juvalcol@juval.com](mailto:juvalcol@juval.com) <http://www.juval.com>  
 Bogotá D.C.- Colombia

INJEMAQ AL 397 es una pintura para coquillas y herramientas en fundición de todas las aleaciones livianas, especialmente aluminio.

El objeto de utilizar INJEMAQ AL 397 en coquillas, fuera de obtener un buen agente desmoldeante que evita la inclusión del metal en la coquilla, es el de aumentar la vida del molde.

INJEMAQ AL 397 crea una interface entre la coquilla y el metal, la cual protege a esta, y además, da un fino acabado superficial a la pieza fundida.

Utilizado como recubrimiento de herramientas, evita el desgaste de estas, como también la contaminación del bao de hierro.

### **MODO DE EMPLEO**

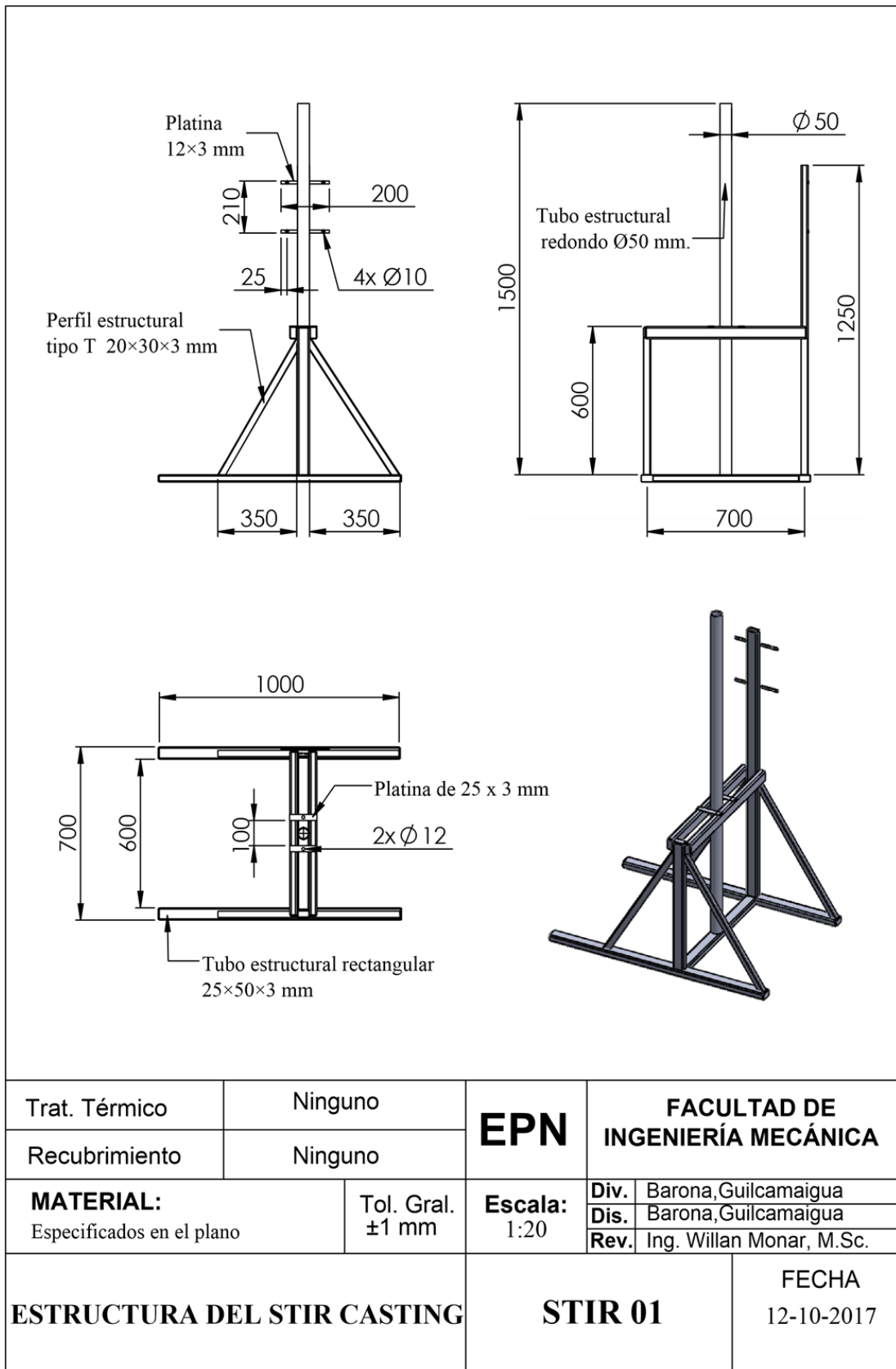
INJEMAQ AL 397 se presenta en forma de pasta para ser disuelta en agua, en proporción de 1 kilo de pasta por 3 o 5 litros de agua, debiendo ser aplicado con pistola o pulverizador.

El recubrimiento debe hacerse con la coquilla o la herramienta precalentada, con el objetivo de que el agua que sirve de disolvente se evapore y la pintura quede firmemente adherida a la superficie.

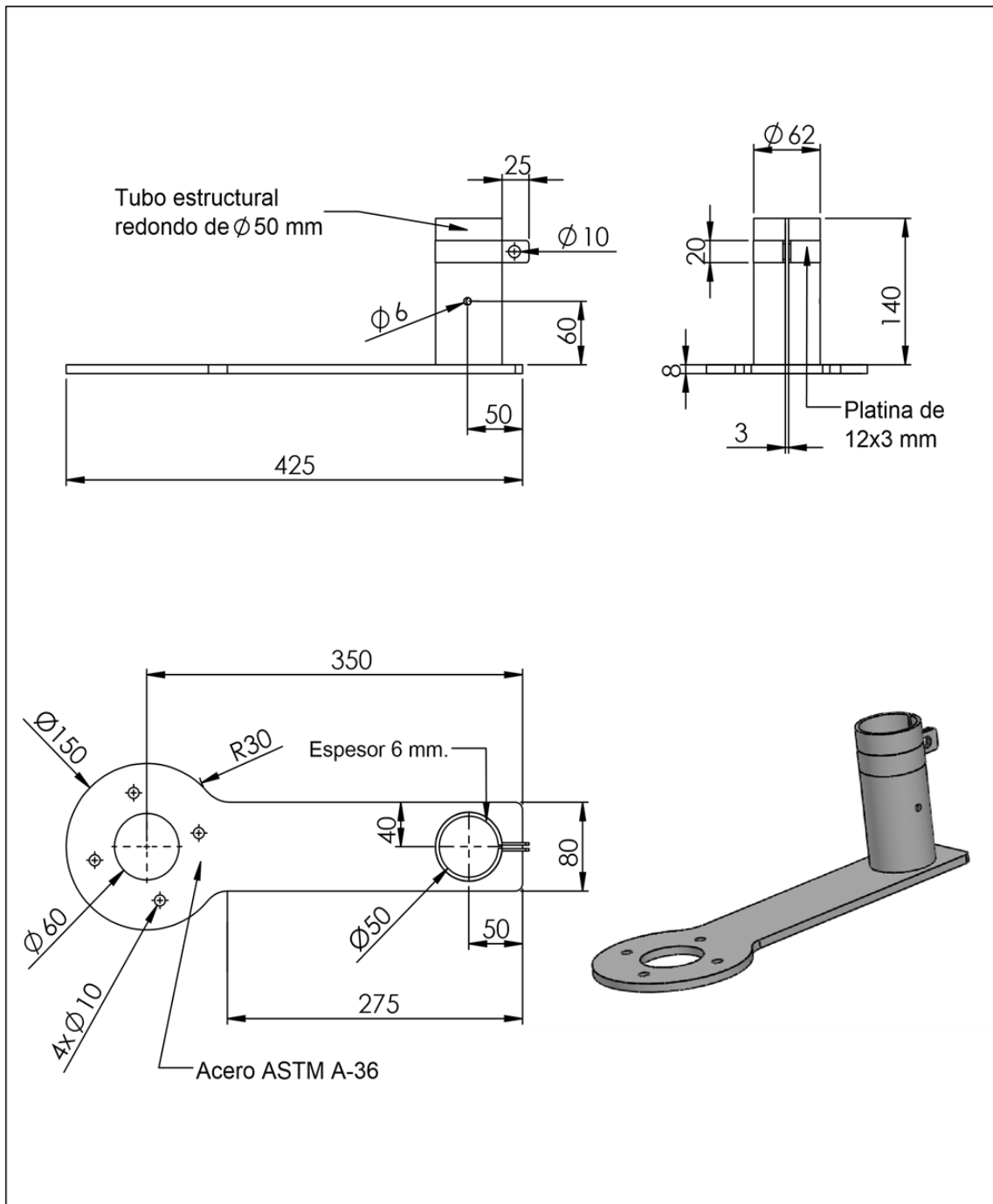
Empaque: Caneca hojalatada x 35 kilos

## ANEXO A12. PLANOS DEL EQUIPO STIR CASTING

Plano A12.1. Plano de fabricación estructura del stir casting.

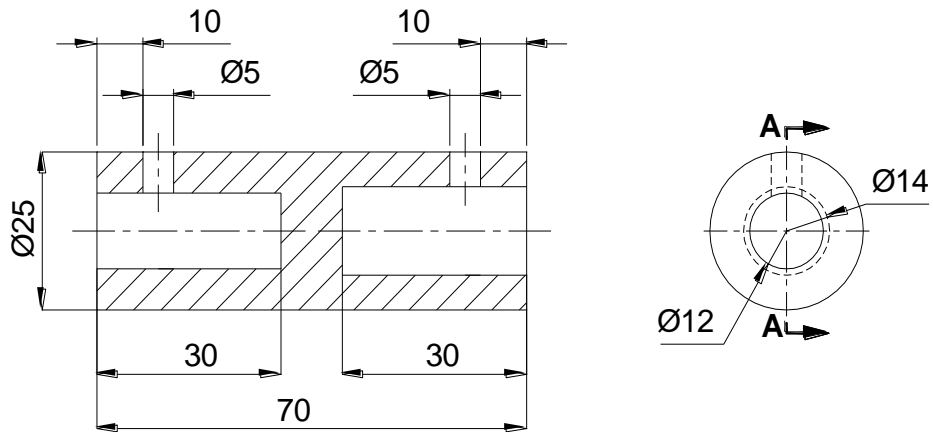


Plano A12.2. Plano de fabricación estructura solidaria del motor eléctrico.



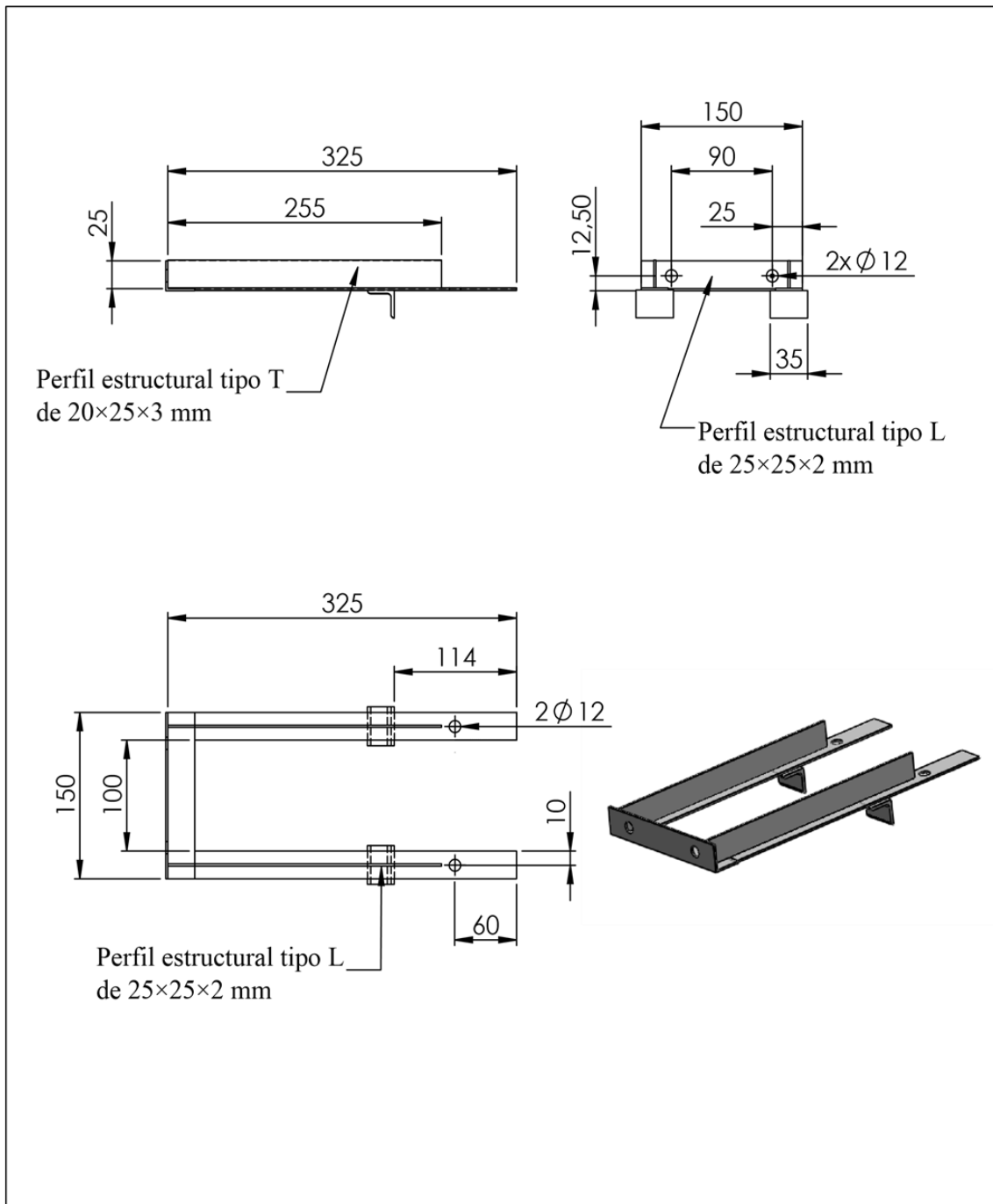
Trat. Térmico	Ninguno	<b>EPN</b>	<b>FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA</b>	
Recubrimiento	Ninguno			
<b>MATERIAL:</b> Especificados en el plano	Tol. Gral. ±1 mm	<b>Escala:</b> 1:5	<b>Div.</b>	Barona, Guilcamaigua
			<b>Dis.</b>	Barona, Guilcamaigua
			<b>Rev.</b>	Ing. Willan Monar, M.Sc.
<b>ESTRUCTURA SOLIDARIA DEL MOTOR ELÉCTRICO</b>		<b>STIR 02</b>	FECHA 12-10-2017	

Plano A12.3. Plano de fabricación acople eje motor-eje agitador.



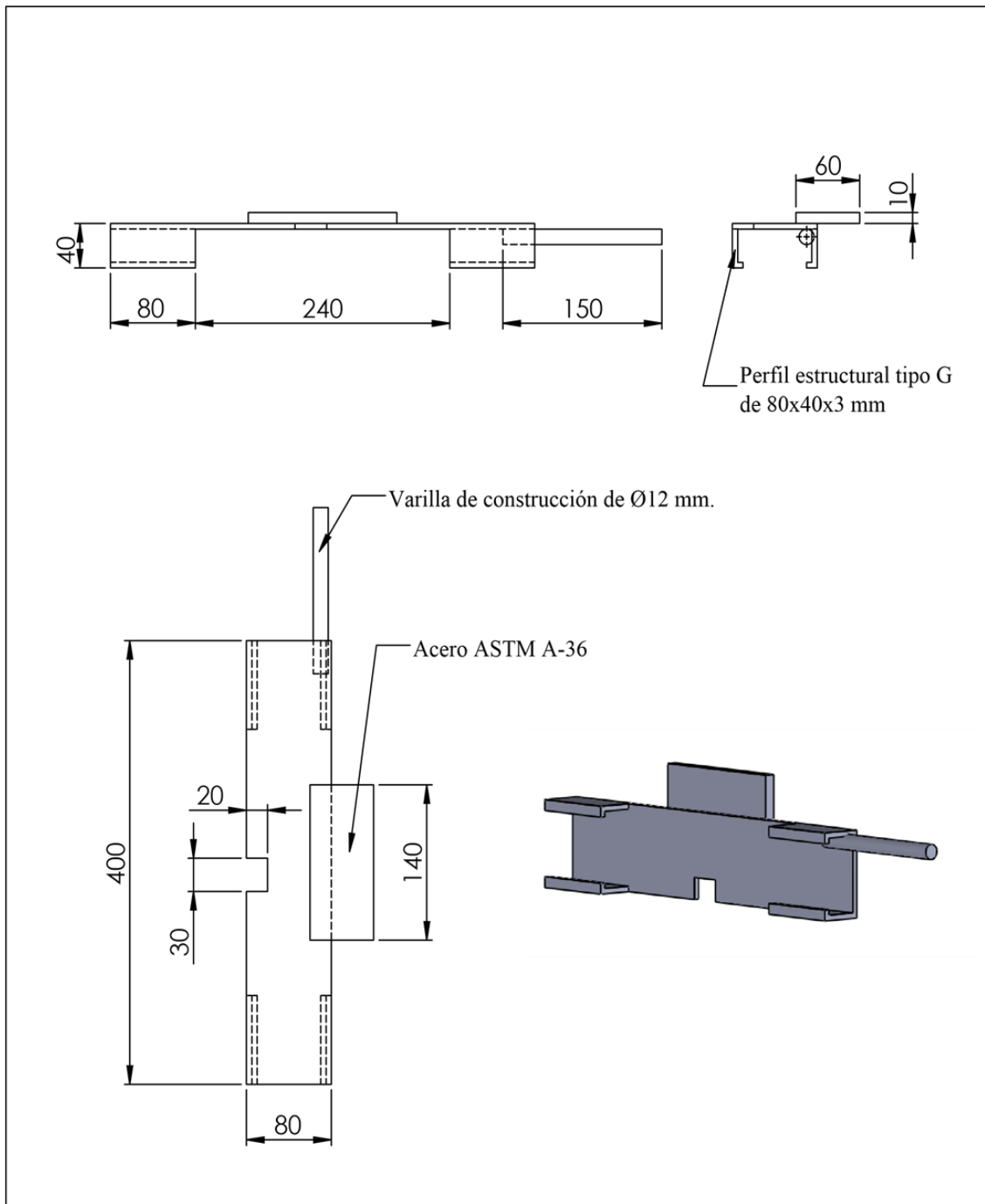
Trat.Térmico	Ninguno	EPN	<b>FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA</b>	
Recubrimiento	Ninguno			
<b>MATERIAL:</b> Acero ASTM 4340		Tol.Gral. ±1 mm	Escala: 1:1	Div. Barona, Guilcamaigua
				Dis. Barona, Guilcamaigua
				Rev. Ing. Willan Monar, M.Sc.
<b>ACOPLE EJE MOTOR-EJE AGITADOR</b>			<b>STIR 03</b>	Fecha 12-10-2017

Plano A12.4. Plano de fabricación soporte para rodamiento de brida.



Trat. Térmico	Ninguno	<b>EPN</b>	<b>FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA</b>	
Recubrimiento	Ninguno			
<b>MATERIAL:</b> Especificados en el plano	Tol. Gral. ±1 mm	<b>Escala:</b> 1:5	Div.	Barona, Guilcamaigua
			Dis.	Barona, Guilcamaigua
			Rev.	Ing. Willan Monar, M.Sc.
<b>SOPORTE PARA RODAMIENTO DE BRIDA</b>		<b>STIR 04</b>	FECHA 12-10-2017	

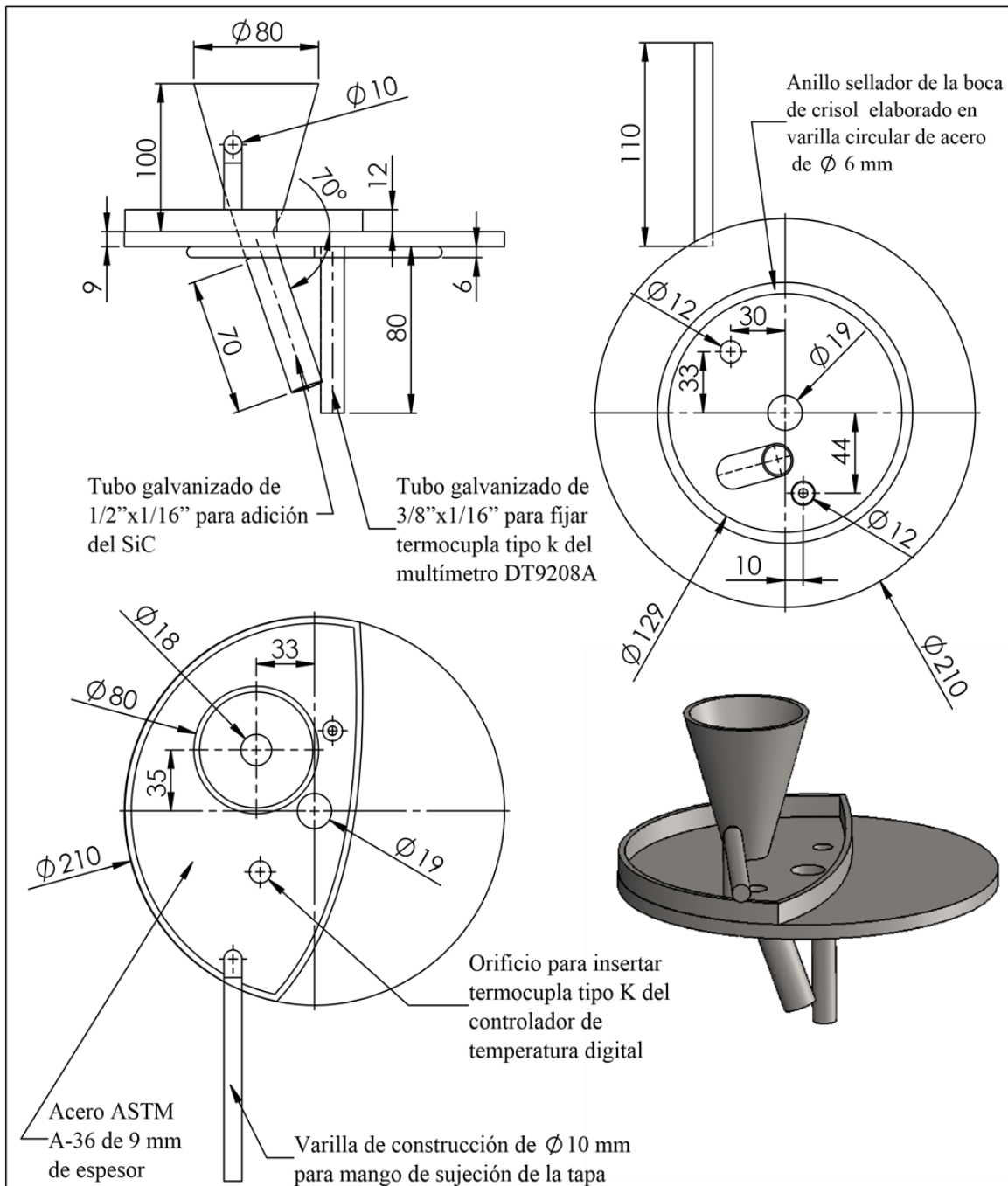
Plano A12.5. Plano de fabricación base apoyo.



Trat. Térmico	Ninguno	<b>EPN</b>	<b>FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA</b>	
Recubrimiento	Ninguno			
<b>MATERIAL:</b> Los especificados en el plano	Tol. Gral. ±1 mm	<b>Escala:</b> 1:5	<b>Div.</b> Barona, Guilcamaigua	
			<b>Dis.</b> Barona, Guilcamaigua	
			<b>Rev.</b> Ing. Willan Monar, M.Sc.	
<b>BASE DE APOYO</b>		<b>STIR 05</b>	<b>FECHA</b> 12-10-2017	

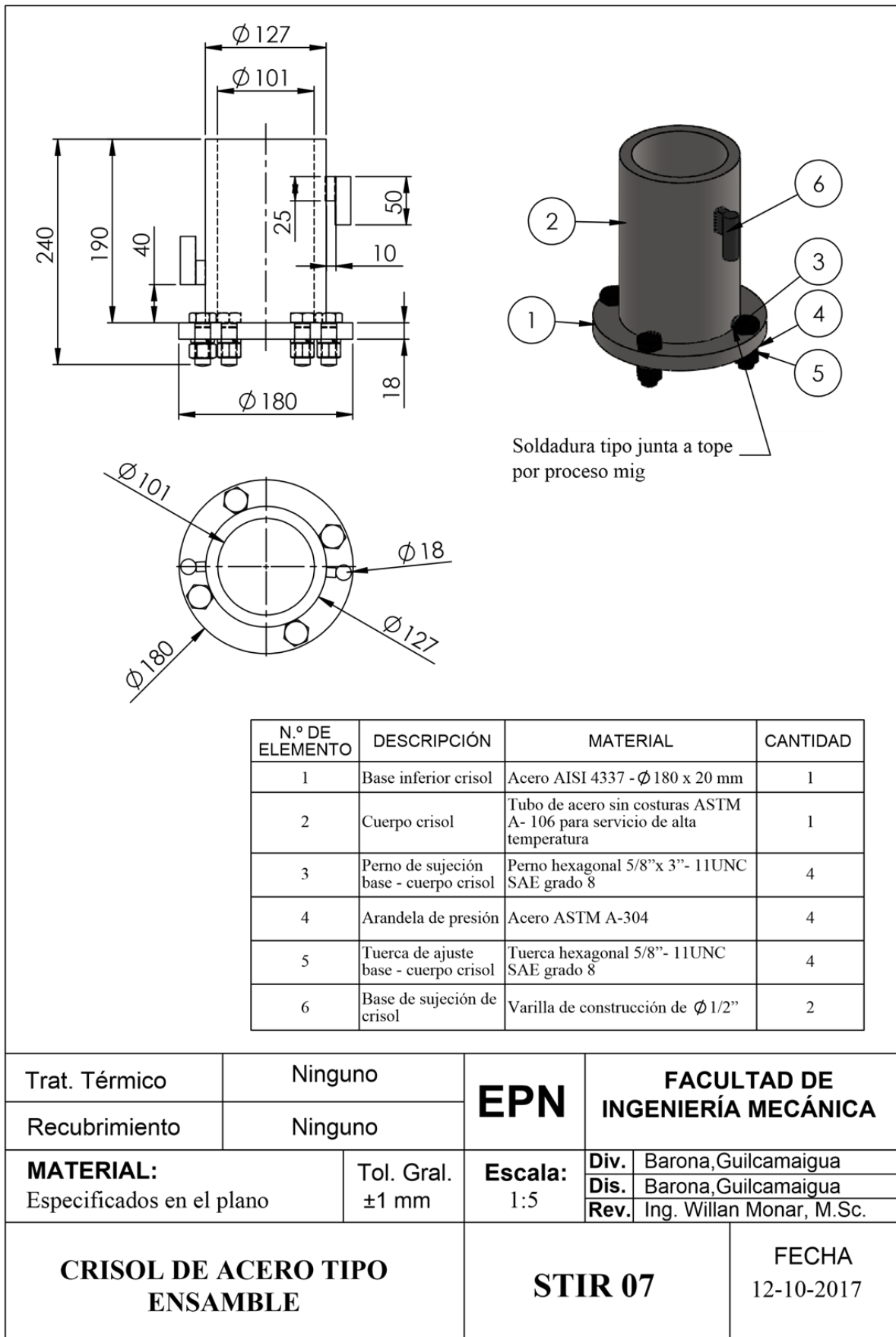


Plano A12.6. Plano de fabricación tapa del crisol.

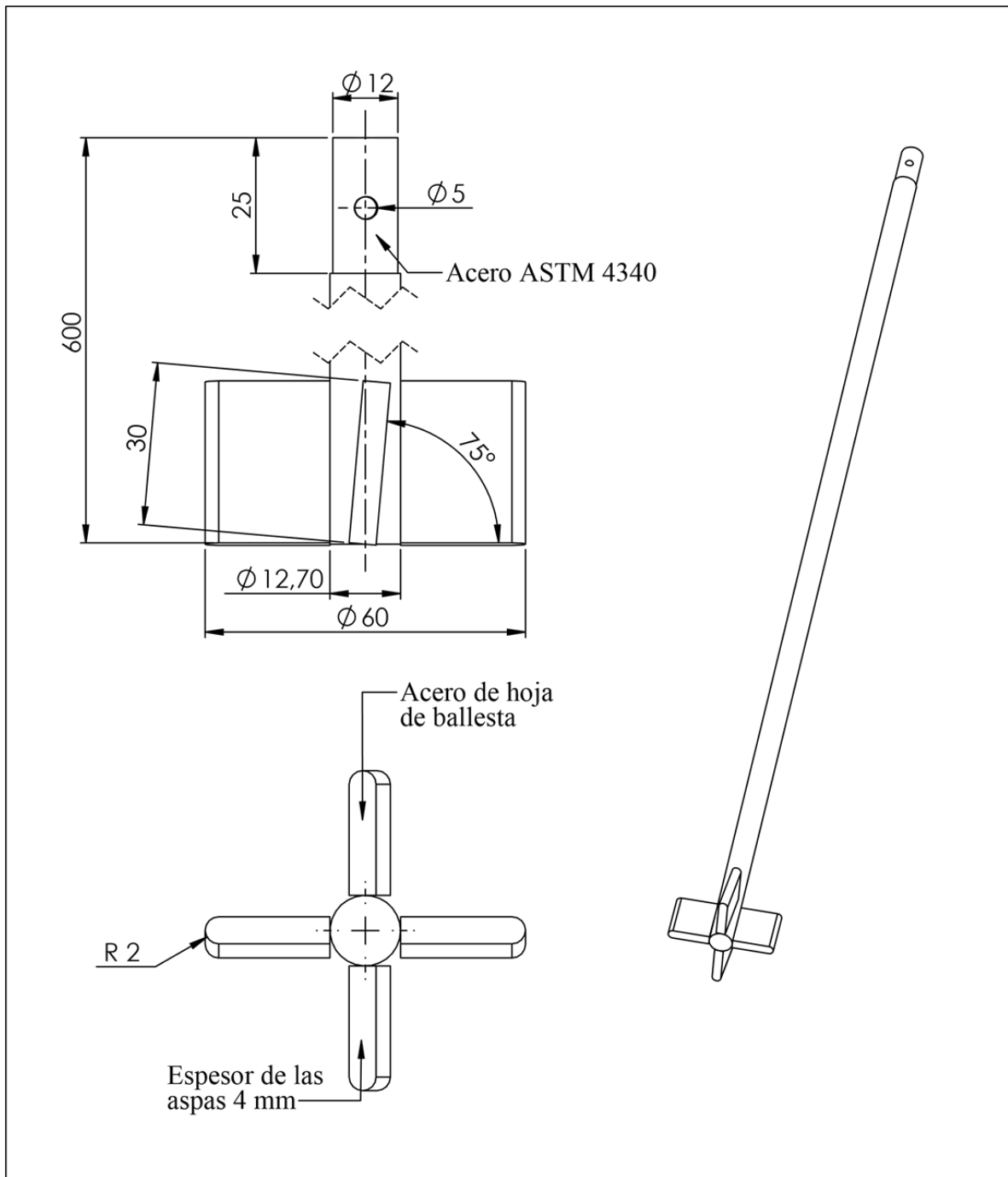


Trat. Térmico	Ninguno	<b>EPN</b>	<b>FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA</b>	
Recubrimiento	Ninguno			
<b>MATERIAL:</b> Especificados en el plano	Tol. Gral. $\pm 1$ mm	<b>Escala:</b> 1:3	Div.	Barona, Guilcamaigua
			Dis.	Barona, Guilcamaigua
			Rev.	Ing. Willan Monar, M.Sc.
<b>TAPA CRISOL</b>		<b>STIR 06</b>	FECHA 12-10-2017	

Plano A12.7. Plano de fabricación crisol tipo ensamble.

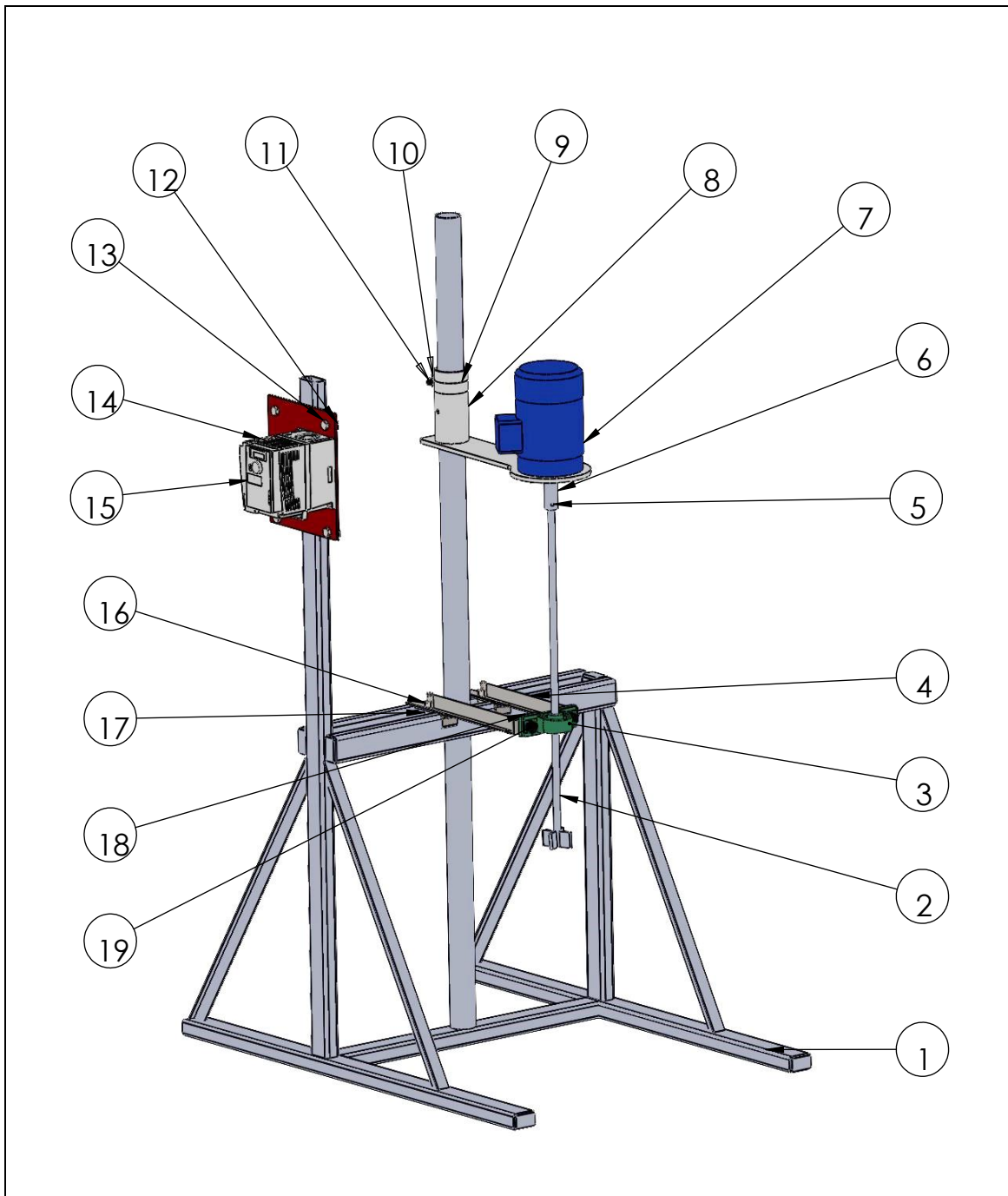


Plano A12.8. Plano de fabricación agitador.



Trat. Térmico	Ninguno	<b>EPN</b>	<b>FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA</b>	
Recubrimiento	Ninguno			
<b>MATERIAL:</b> Especificados en el plano		Tol. Gral. ±1 mm	<b>Escala:</b> 1:1	Div. Barona,Guilcamaigua
				Dis. Barona,Guilcamaigua
				Rev. Ing. Willan Monar, M.Sc.
<b>AGITADOR</b>			<b>STIR 08</b>	FECHA 12-10-2017

Plano A12.9. Plano de conjunto del equipo stir casting.



Trat. Térmico	Ninguno	<b>EPN</b>	<b>FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA</b>	
Recubrimiento	Ninguno			
<b>MATERIAL:</b> ESPECIFICADOS EN LA LISTA DE MATERIALES	Tol. Gral. ±1 mm	<b>Escala:</b> 1:10	Div.	Barona, Guilcamaigua
			Dis.	Barona, Guilcamaigua
			Rev.	Ing. Willan Monar, M.Sc.
<b>PLANO DE CONJUNTO EQUIPO STIR CASTING</b>		<b>STIR 09</b>		FECHA 12-10-2017

Continuación del Plano de conjunto del equipo stir casting.


<b>LISTA DE MATERIALES</b>			
<b>N° DE ELEMENTO</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>MATERIAL</b>	<b>CANTIDAD</b>
1	Estructura del stir casting	Perfil estructural tipo L/T/ tubo rectangular/ tubo redondo	1
2	Agitador	Acero ASTM 4340, acero de hoja de ballesta para amortiguador de vehículo	1
3	Rodamiento de brida NSK UCP201-08	Hierro fundido	1
4	Soporte para rodamiento de brida	Perfil estructural tipo L y T	1
5	Perno prisionero M5 - 1,50	Acero SAE grado 8	2
6	Acople eje motor - eje agitador	Acero ASTM-4341	1
7	Motor eléctrico Siemens 3PH-0,4KW-60Hz	Hierro fundido	1
8	Estructura solidaria del motor eléctrico	Acero ASTM A-36	1
9	Abrazadera de sujeción	Platina de 25 × 3 mm	1
10	Perno hexagonal 3/8"-16UNC × 1½"	Acero al carbono SAE grado 8	1
11	Tuerca hexagonal 3/8"-16UNC	Acero al carbono NC grado 8	1
12	Perno hexagonal 3/8"-16UNC × 1"	Acero al carbono SAE grado 8	4
13	Tuerca hexagonal 3/8"-16UNC	Acero al carbono NC grado 8	4
14	Interruptor trifásico de encendido	No aplica	1
15	Variador de frecuencia Delta 1 PH/3 PH-1,5 kW-50 Hz/60 Hz	No aplica	1
16	Perno hexagonal 3/8-16UNC × 1"	Acero al carbono SAE grado 8	2
17	Tuerca tipo mariposa 3/8"-16UNC	Acero al carbono NC grado 8	2
18	Perno hexagonal 3/8-16UNC × 1"	Acero al carbono SAE grado 8	2
19	Tuerca hexagonal 3/8"-16UNC	Acero al carbono NC grado 8	2

Trat. Térmico	Ninguno	<b>EPN</b>	<b>FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA</b>	
Recubrimiento	Ninguno			
<b>MATERIAL: ESPECIFICADOS EN LA LISTA DE MATERIALES</b>	Tol. Gral. ±1 mm	<b>Escala: 1:10</b>	Div.	Barona, Guilcamaigua
			Dis.	Barona, Guilcamaigua
			Rev.	Ing. Willan Monar, M.Sc.
<b>PLANO DE CONJUNTO EQUIPO STIR CASTING</b>		<b>STIR 09</b>		FECHA 12-10-2017

## ANEXO A13. FICHA TÉCNICA DEL MOLDE DE ARENA AGLOMERADA CON RESINA ORGÁNICA AUTOFRAGUANTE

Tabla A13. Ficha técnica del molde de arena aglomerada con resina orgánica autofraguante.

	
<b>Composición del molde de arena aglomerada</b>	
Tipo de arena	: Arena seca sílice
Tipo de resina aglomerante	: Furan resin SQG300
Tipo de catalizador endurecedor o agente de curado	: Curing agent GS03
<b>Porcentaje de la composición química de los elementos del molde de arena aglomerada</b>	
Arena seca sílice	: 100%
Furan resin SQG300	: 1-2%
Curing agent GS03	: 0,5%
<b>Otras características</b>	
Dimensiones del molde de arena	: 240 × 340 × 100 mm
Peso del molde de arena	: 9,74 kg

## ANEXO A14. FICHA TÉCNICA DEL POLVO DE MAGNESIO



ISO 9001-2008 REGISTERED

### CERTIFICATE OF ANALYSIS

Product Name : - MAGNESIUM (METAL) POWDER  
Formula : - Mg  
At. Weight : - 24.31  
Article no. : - 04461  
Lot no. : - S336112 02  
Mfg date : - FEB-2012  
Exp date : - OCT-2017

Analyzed on: - 27/02/12

<u>Sr.</u> <u>no.</u>	Tests	Specifications	Results
1	Description	Silvery white metal powder	Silvery white metal powder
2	Assay (Min.)	99.0%	100.04%
3	Substances insoluble in HCl	Max. 0.05%	0.02%
4	Iron (Fe)	Max. 0.05%	0.013%

*This above product complies as per the specifications of LOBA CHEMIE*

## ANEXO A15. RESULTADOS DEL ANÁLISIS QUÍMICO SEMI-CUANTITATIVO DEL ARO DE RUEDA PARA AUTOMÓVIL



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA



Resultados Análisis Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)

**Solicitante** : Ing. Gustavo Barona  
**No. Referencia** : RM-8866  
**Fecha** : 02-03-2017  
**Muestras recibidas** : Una muestra sólida de un aro de rueda

La determinación de los elementos presentes en la muestra se realizó empleando el Microscopio Electrónico de Barrido TESCAN-VEGA y microanalizador de rayos x BRUKER (programa ESPRIT 1.8). A continuación se detallan los resultados obtenidos del análisis semi-cuantitativo:

Elemento	Muestra 1 Contenido (%)
Magnesio	93
Aluminio	7

Nota: El análisis químico semi-cuantitativo, presenta un límite de detección en la determinación de 1-3%.

  
Dra. Diana Endara  
Responsable



## ANEXO A16. RESULTADOS DE LA DIFRACCIÓN DE RAYOS X AL RESIDUO SÓLIDO DE MC 365.0/SiC/5p



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA



### Resultados de análisis de Difracción de Rayos X

**Solicitante** : Ing. Gustavo Barona  
**No. Referencia** : RM - 8871  
**Fecha** : 03-04-2017  
**Muestras recibidas** : Una muestra sólida denominada:  
**Muestra 1** : Residuo sólido 365.0/SiC/5p (*Código cliente*)

La determinación de los compuestos con cristalización definida presentes en la muestra se realizó empleando el Difractómetro D8 ADVANCE y el programa Diffrac plus (EVA) para cualificación. A continuación se detallan los resultados obtenidos del análisis.

Mineral	Fórmula
Aluminum	Al
Silicon	Si
Magnesium Silicate	Mg <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>
Moissanite-4H, Hexagonal	SiC
Moissanite 3C, Cubic	SiC
Silicon Carbide, Hexagonal	SiC
Silicon Oxide, Hexagonal	SiO <sub>2</sub>
Corundum	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Muscovite	KA <sub>12</sub> (AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> )(OH) <sub>2</sub>
Sodium Manganese Oxide	NaMn <sub>7</sub> O <sub>12</sub>

**NOTA:** El límite de detección del equipo empleado es del 1% para compuestos con cristalización definida.

Los resultados se presentan según el orden de abundancia (cualitativo) que se puede observar en el difractograma obtenido.

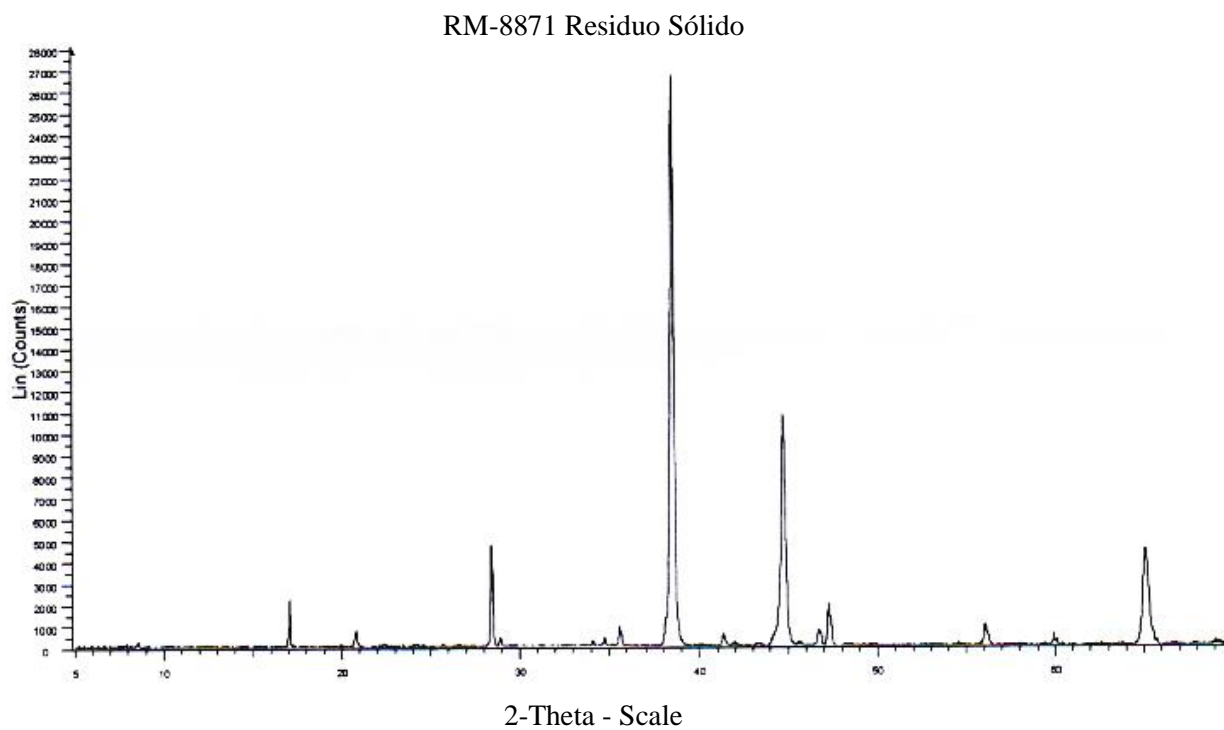
  
 Ing. Alicia Guevara PhD.  
 Jefe de Departamento

  
  
 MSc. Evelyn Criollo  
 Jefe de Laboratorio

  
 Ing. Kléber Collantes  
 Responsable



Anexo: Difractograma de la muestra residuo sólido 365.0/SiC/5p (Código cliente)

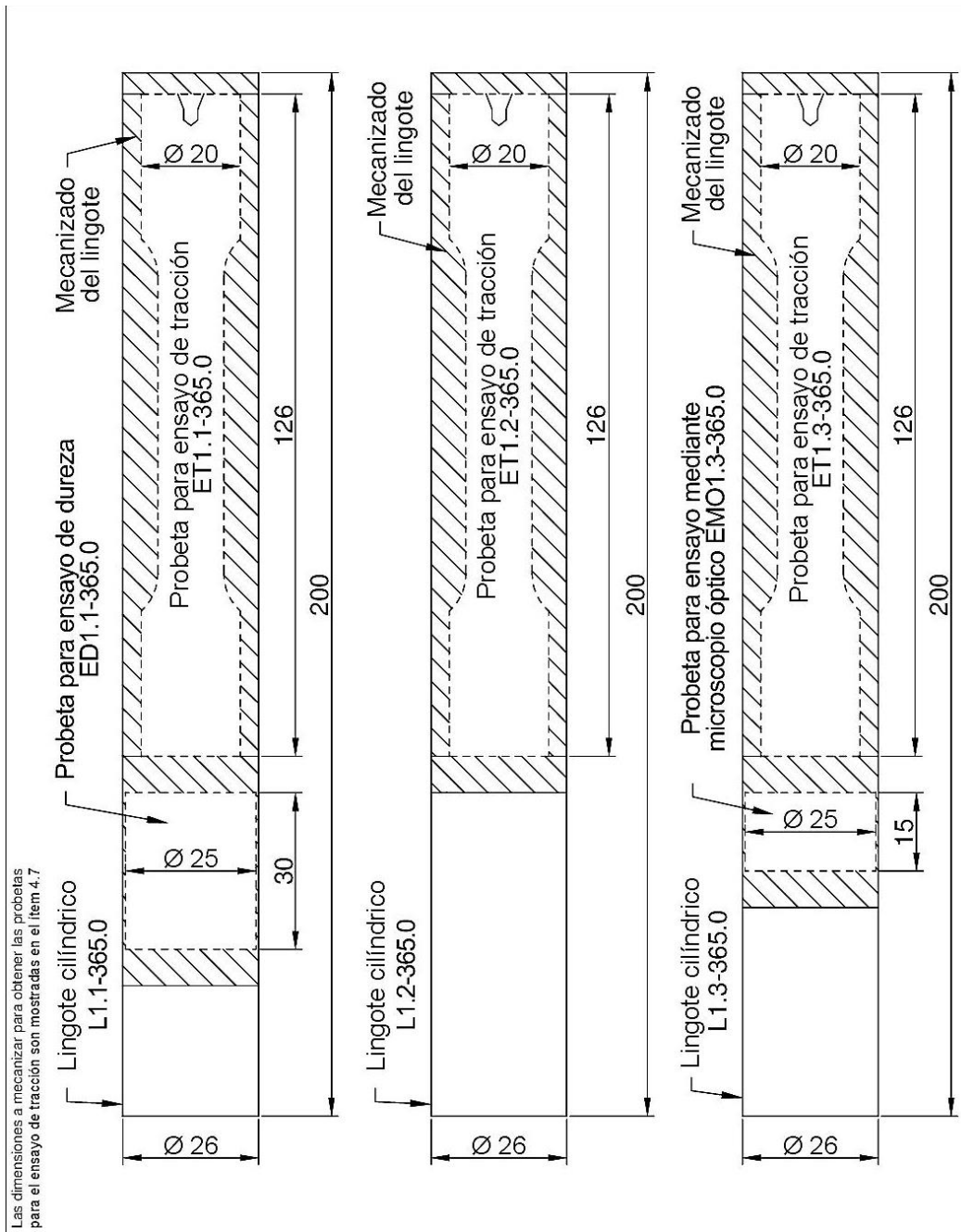


RM-8871 Residuo Sólido raw - Type: Locked Coupled - Start 4.876° - End: 69.896° - Step time: 160. S - Temp: 25°C (Room) - Time Started: 0 s - 2-Theta: 4.876° - Theta: 2.500  
Operations: Displacement 0.271 | Background 12.023.1.000 | Import



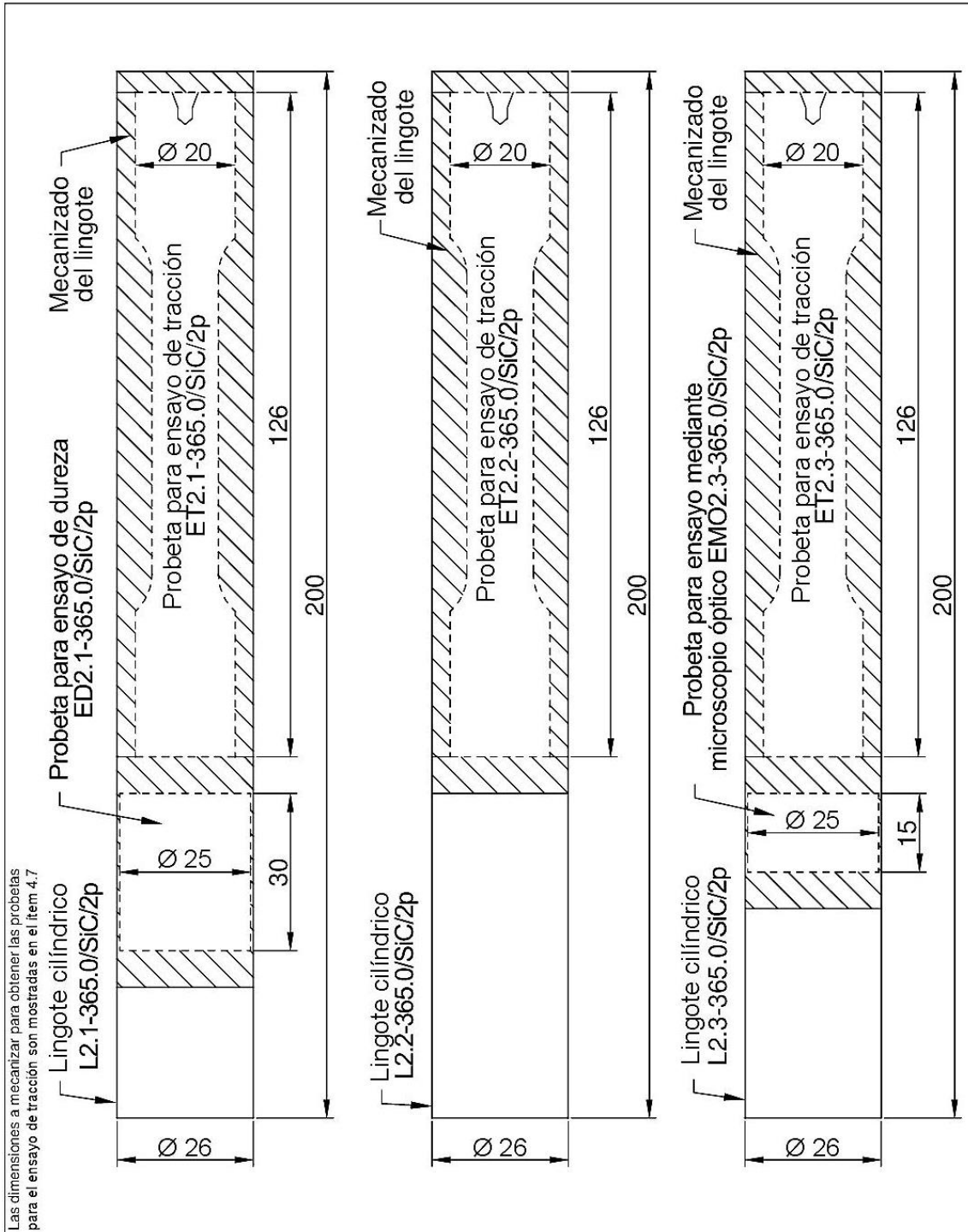
# ANEXO A17. PLANOS DE MAQUINADO DE LOS LINGOTES CILÍNDRICOS PARA LA OBTENCIÓN DE PROBETAS

Plano A17.1. Plano de maquinado de lingotes 365.0 para obtención de probetas.



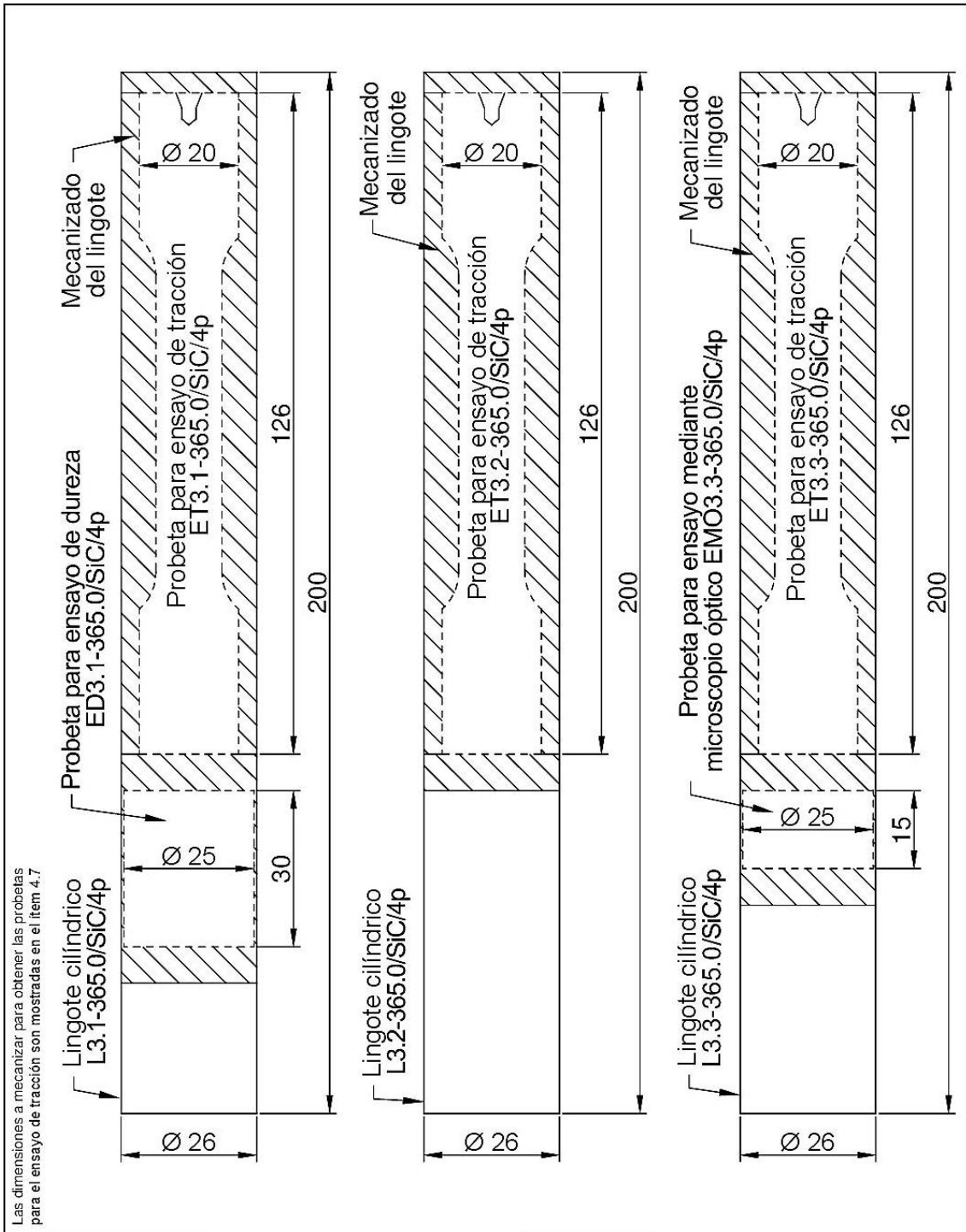
Trat.Térmico	Ninguno	EPN	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	
Recubrimiento	Ninguno		Div.	Barona, Guilcamaigua
MATERIAL:	Tol.Grad.	Escala:	Dis.	Barona, Guilcamaigua
365.0	±0.1mm	1:1	Rev.	Ing. Willan Monar, M.Sc.
PRIMERA FUNDICIÓN 365.0		3 LINGOTES		Fecha 10-08-2017

Plano A17.2. Plano de maquinado de lingotes 365.0/SiC/2p para obtención de probetas.



Trat.Térmico	Ninguno	EPN	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	
Recubrimiento	Ninguno		Div.	Barona, Guilcamaigua
MATERIAL: 365.0/SiC/2p		Tol.Gral. ±0.1mm	Escala: 1:1	Dis. Barona, Guilcamaigua
SEGUNDA FUNDICIÓN 365.0/SiC/2p		3 LINGOTES		Rev. Ing. Willan Monar, M.Sc.
				Fecha 10-08-2017

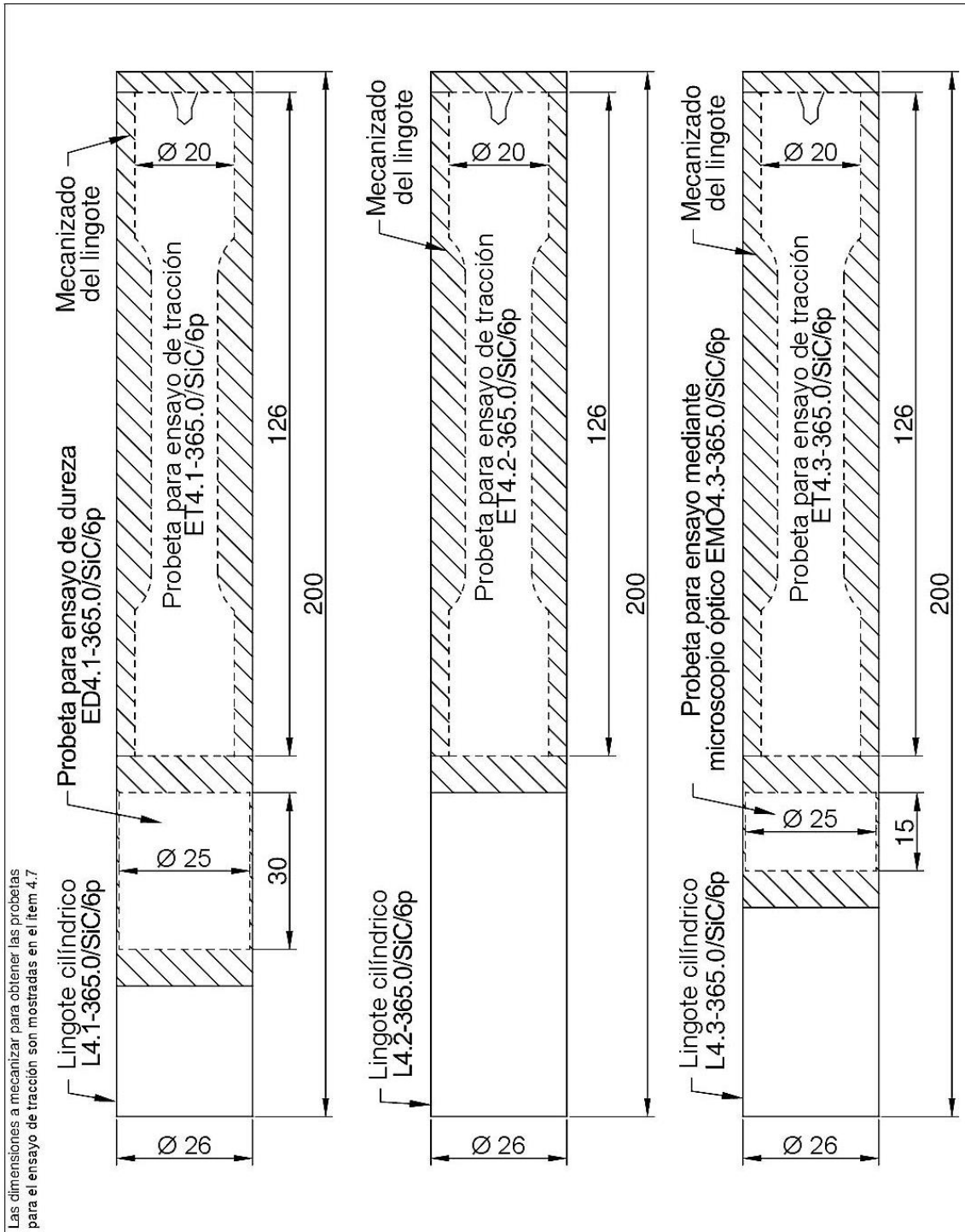
Plano A17.3. Plano de maquinado de lingotes 365.0/SiC/4p para obtención de probetas.



Las dimensiones a mecanizar para obtener las probetas para el ensayo de tracción son mostradas en el ítem 4.7.

Trat.Térmico	Ninguno		EPN	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	
Recubrimiento	Ninguno				
MATERIAL:	365.0/SiC/4p	Tol.Gral.	Escala:	Div.	Barona, Guilcamaigua
		±0.1mm	1:1	Dis.	Barona, Guilcamaigua
TERCERA FUNDICIÓN 365.0/SiC/4p			3 LINGOTES	Rev.	Ing. Willan Monar, M.Sc.
				Fecha	10-08-2017

Plano A17.4. Plano de maquinado de lingotes 365.0/SiC/6p para obtención de probetas.



Las dimensiones a mecanizar para obtener las probetas para el ensayo de tracción son mostradas en el ítem 4.7.

Trat.Térmico	Ninguno	EPN	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	
Recubrimiento	Ninguno		Div.	Barona, Guilcamaigua
MATERIAL: 365.0/SiC/6p		Tol.Gral. ±0.1mm	Escala: 1:1	Dis. Barona, Guilcamaigua
CUARTA FUNDICIÓN 365.0/SiC/6p		3 LINGOTES		Rev. Ing. Willan Monar, M.Sc.
				Fecha 10-08-2017

## ANEXO A18. DIAGRAMAS ESFUERZO DEFORMACIÓN DE LAS PROBETAS REALIZADAS EL ENSAYO DE TRACCIÓN

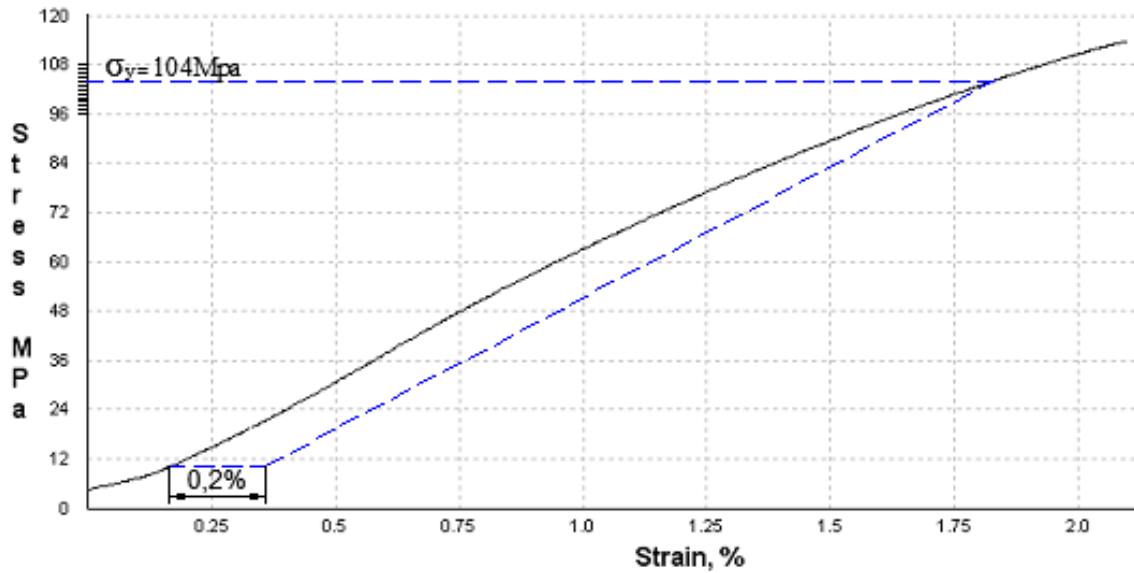


Diagrama esfuerzo deformación probeta ET1.1-365.0.

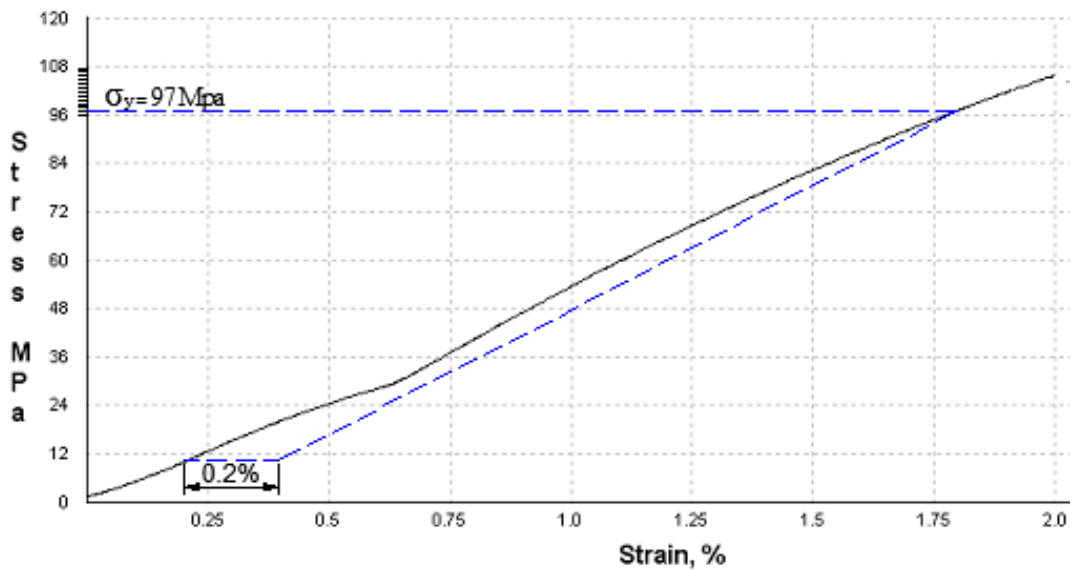


Diagrama esfuerzo deformación probeta ET1.2-365.0.

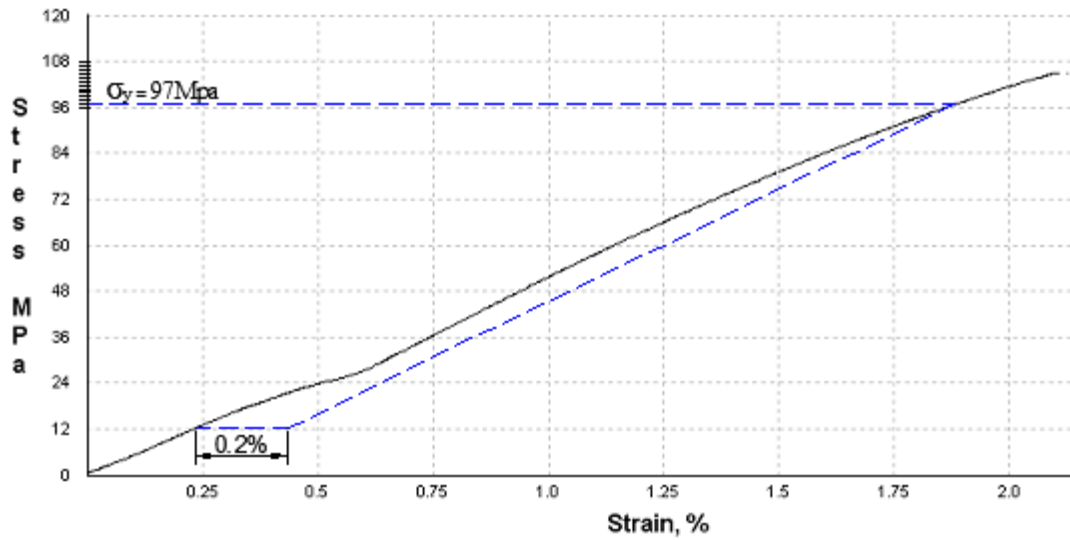


Diagrama esfuerzo deformación probeta ET1.3-365.0.

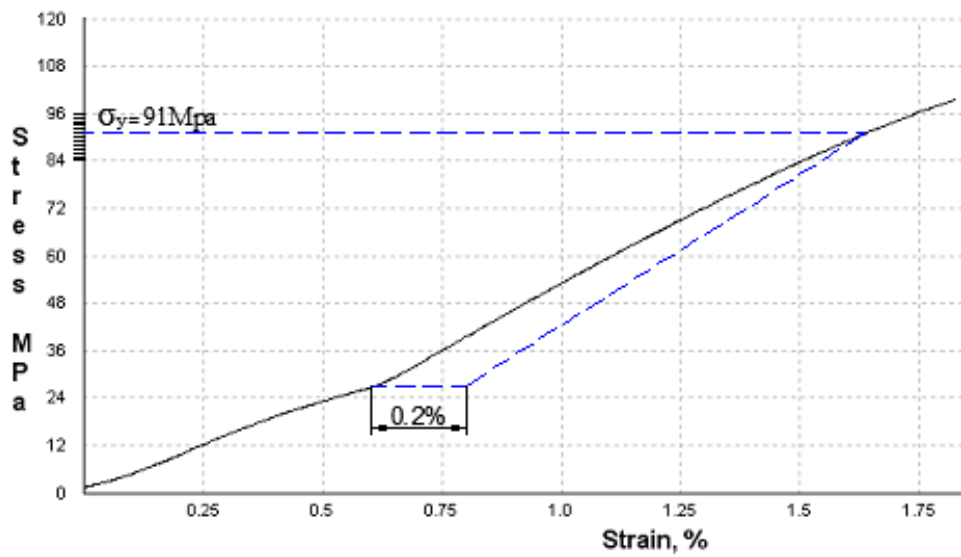


Diagrama esfuerzo deformación probeta ET2.1-365.0/SiC/2p.

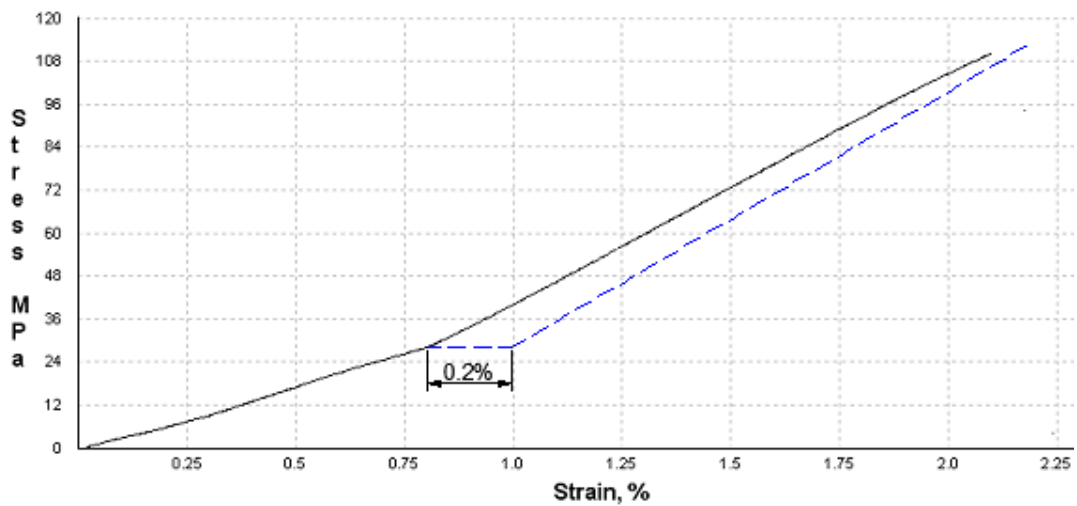


Diagrama esfuerzo deformación probeta ET2.2-365.0/SiC/2p.



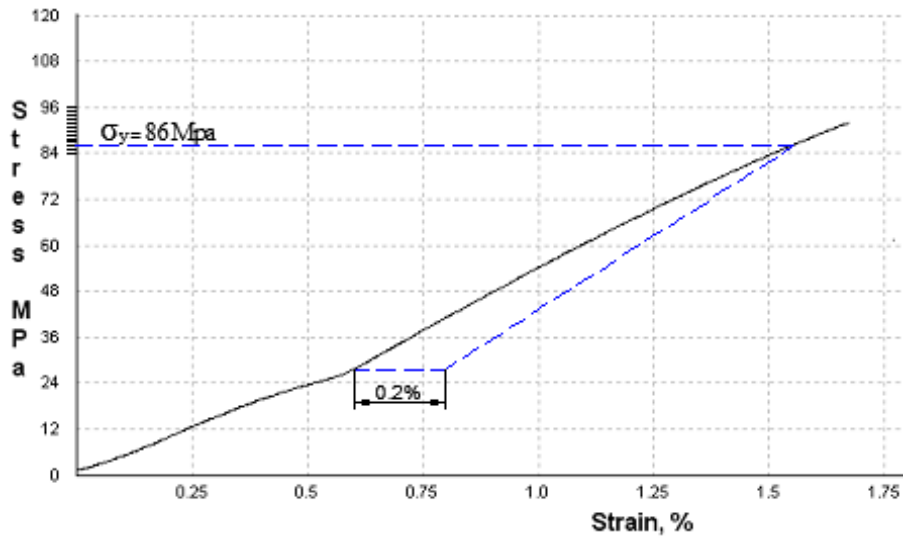


Diagrama esfuerzo deformación probeta ET2.3-365.0/SiC/2p.

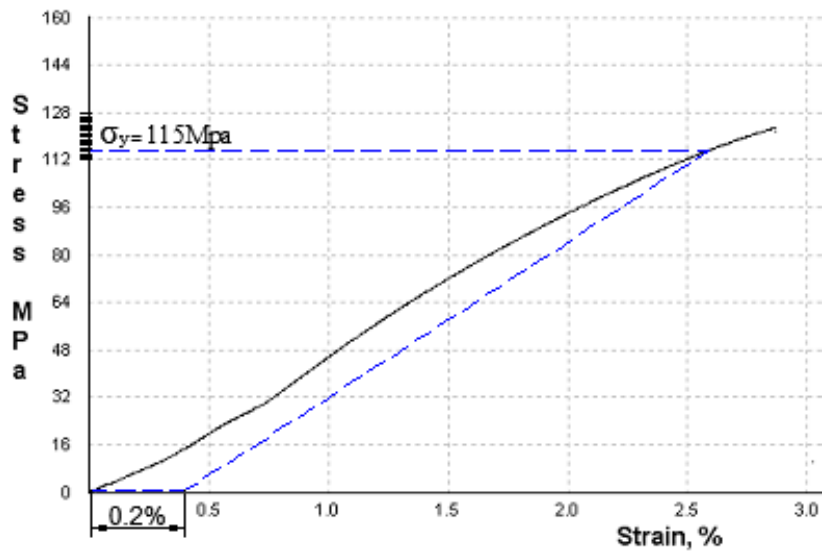


Diagrama esfuerzo deformación probeta ET3.1-365.0/SiC/4p.

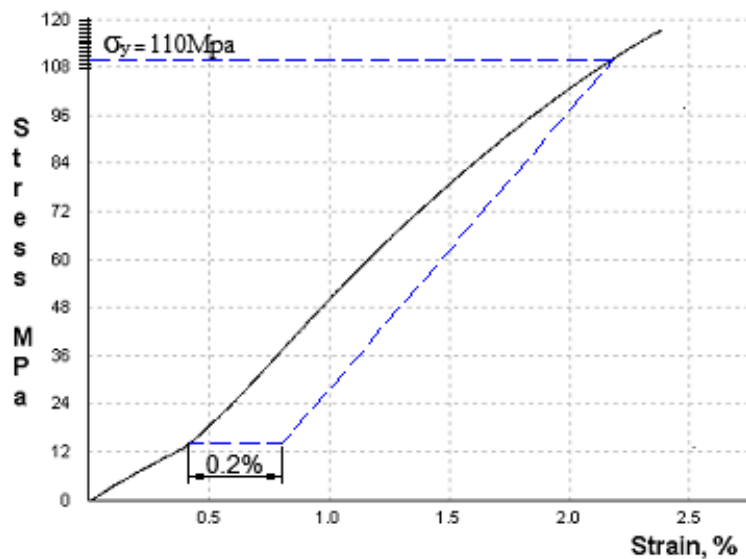


Diagrama esfuerzo deformación probeta ET3.2-365.0/SiC/4p.

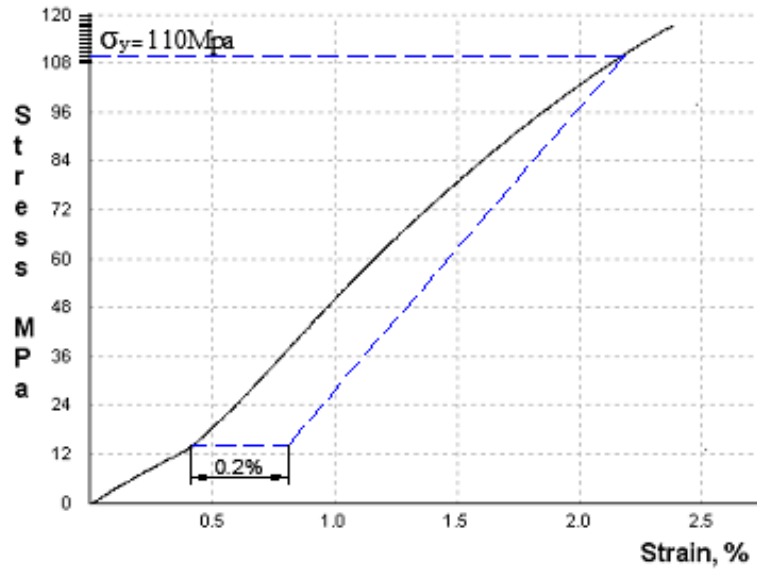


Diagrama esfuerzo deformación probeta ET3.3-365.0/SiC/4p.

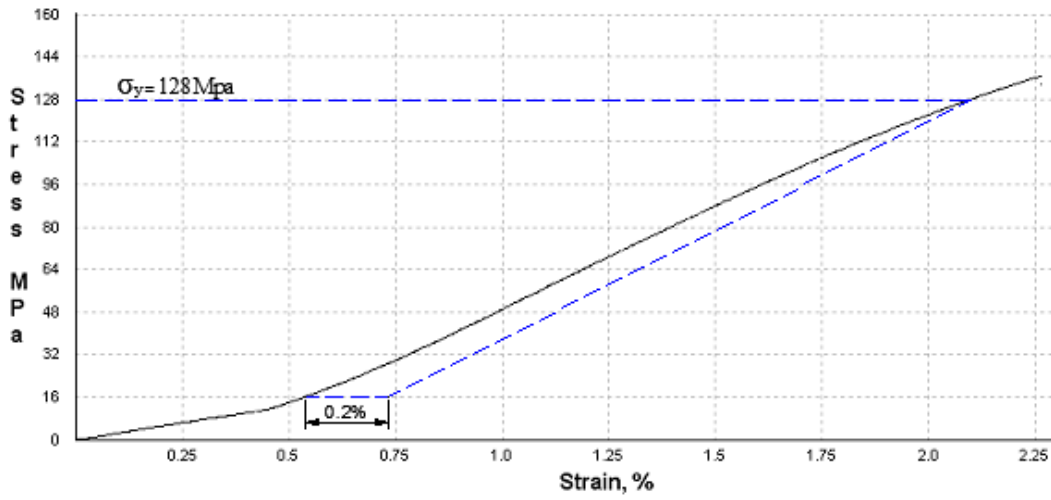


Diagrama esfuerzo deformación probeta ET4.1-365.0/SiC/6p.

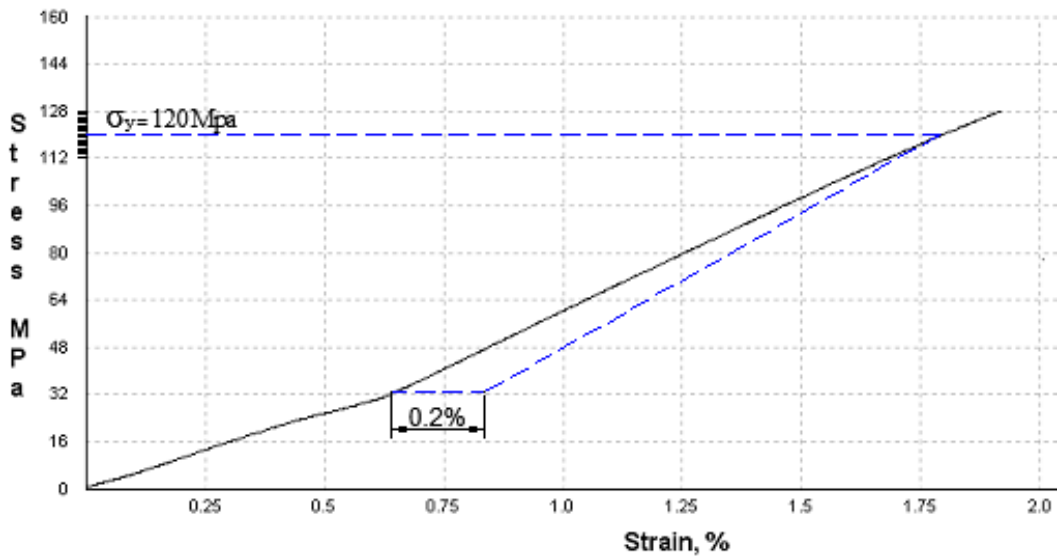


Diagrama esfuerzo deformación probeta ET4.2-365.0/SiC/6p.

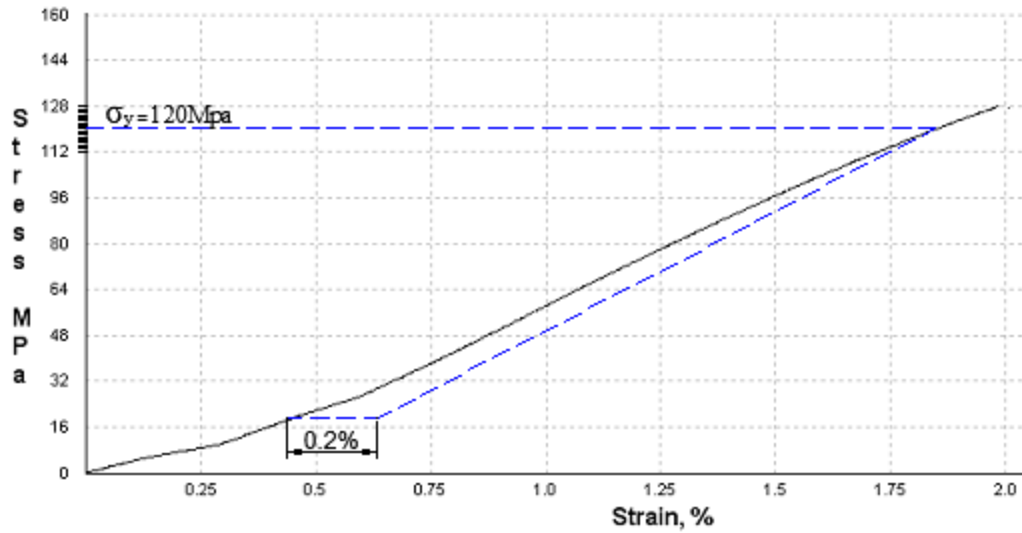


Diagrama esfuerzo deformación probeta ET4.3-365.0/SiC/6p.

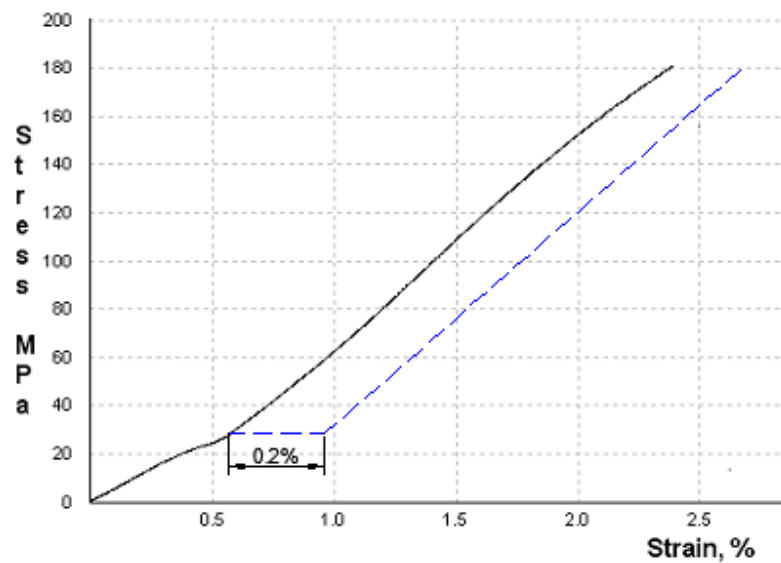


Diagrama esfuerzo deformación probeta ET29A C-365.0/SiC/6p.

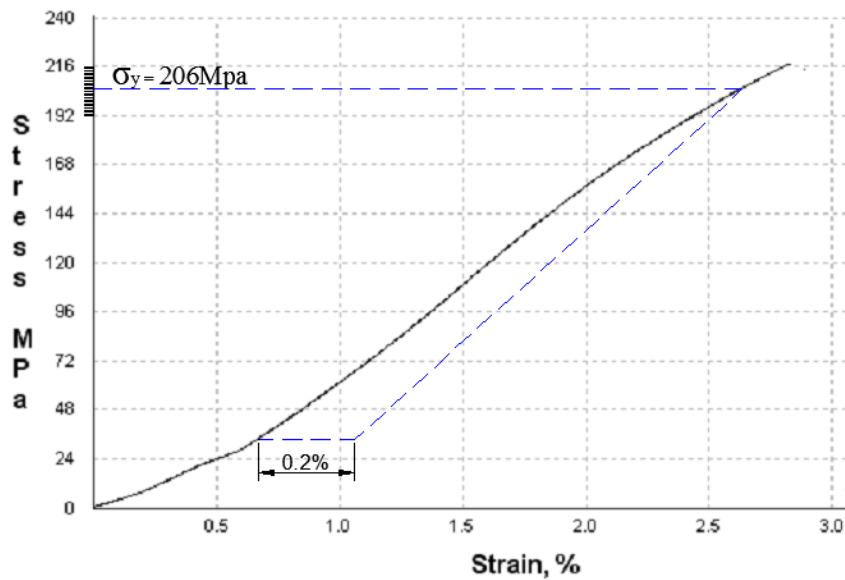


Diagrama esfuerzo deformación probeta ET29B C-365.0/SiC/6p.

# ANEXO A19. INFORME TÉCNICO DE ENSAYOS DE TRACCIÓN



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA  
MECÁNICA



LABORATORIO DE ANÁLISIS  
DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES

## INFORME TÉCNICO

LAEV – AGO.17.29.0

Quito, 24 de agosto de 2017

**TRABAJO SOLICITADO POR:** ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
M.Sc. Willan Monar

Los resultados contenidos en el presente informe corresponden a ensayos realizados en muestras metálicas pertenecientes a los Sres. Gustavo Barona y Juan Guilcamaigua para el proyecto de titulación "CARACTERIZACIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO DE MATRIZ ALEACIÓN DE ALUMINIO-SILICIO REFORZADA CON PARTÍCULAS DE CARBURO DE SILICIO". Las probetas fueron entregadas en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la Escuela Politécnica Nacional.

### RESULTADOS

- 1. MUESTRAS:** Catorce (14) probetas de sección circular para ensayo de tracción.
- 2. ENSAYO DE TRACCIÓN**

En la tabla 1 se presenta los resultados del ensayo de tracción realizado a las probetas.


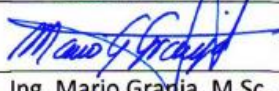
Tabla 1. Resultados del ensayo de tracción.

ID	Diámetro promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción		% elongación en 50 mm
	mm	N	lbf	MPa	ksi	
ET1.1-365.0	12,53	14.000	3.147	113,5	16,5	4
ET1.2-365.0	12,43	12.820	2.882	105,6	15,3	2,8
ET1.3-365.0	12,52	12.940	2.909	105,1	15,2	3,6
ET2.1-365.0/SiC/2p	12,94	13.070	2.938	99,4	14,4	2,3
ET2.2-365.0/SiC/2p	12,79	14.140	3.179	110,1	16,0	3,4
ET2.3-365.0/SiC/2p	12,93	12.060	2.711	91,9	13,3	3,8

Tabla 1. Resultados del ensayo de tracción.

ET3.1-365.0/SiC/4p	12,40	14.830	3.334	122,8	17,8	-
ET3.2-365.0/SiC/4p	12,38	14.100	3.170	117,2	17,0	-
ET3.3-365.0/SiC/4p	12,38	14.080	3.165	117,1	17,0	2,4
ET4.1-365.0/SiC/6p	12,82	17.650	3.968	136,7	19,8	-
ET4.2-365.0/SiC/6p	12,50	15.720	3.534	128,1	18,6	-
ET4.3-365.0/SiC/6p	12,67	16.140	3.628	128,0	18,6	3,2
(ET29A) C-365.0/SiC/6p	12,98	23.900	5.373	180,6	26,2	-
(ET29B) C-365.0/SiC/6p	12,60	27.100	6.092	217,3	31,5	3,7

- El porcentaje de elongación no se puede determinar debido a que las probetas fallan fuera de las marcas establecidas en 50 mm.

	REVISADO POR:	APROBADO POR:
<b>Firma:</b>		
<b>Nombre:</b>	Ing. Jonathan Castro, M.Sc.	Ing. Mario Granja, M.Sc.
<b>Cargo:</b>	PROFESOR OCASIONAL II	JEFE
<b>LABORATORIO DE ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES</b>		



# ANEXO A20. INFORME TÉCNICO DE ENSAYOS DE DUREZA



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA  
LABORATORIO DE ANÁLISIS  
DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES



## INFORME TÉCNICO

LAEV – AGO.17.33.0

Quito, 30 de agosto de 2017

**TRABAJO SOLICITADO POR:** ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
M.Sc. Willan Monar

Los resultados contenidos en el presente informe corresponden a ensayos realizados en probetas cilíndricas pertenecientes a los Ing. Gustavo Barona e Ing. Juan Guilcamaigua para el proyecto de titulación "CARACTERIZACIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO DE MATRIZ ALEACIÓN DE ALUMINIO-SILICIO REFORZADA CON PARTÍCULAS DE CARBURO DE SILICIO". Las probetas fueron entregadas en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la Escuela Politécnica Nacional.

### RESULTADOS

- MUESTRAS:** Cinco (5) probetas cilíndricas para ensayo de barrido de dureza Brinell.
- ENSAYO DE TRACCIÓN**

En la tabla 1 se presentan los resultados de los barridos de dureza realizados.

Tabla 1. Barrido de dureza Brinell realizado en las muestras.

Muestra	Dureza Brinell					Promedio
	1	2	3	4	5	
ED1.1-365.0	45	45	45	48	48	46
ED2.1-365.0/SiC/2p	53	53	53	53	48	52
ED3.1-365.0/SiC/4p	57	53	57	57	57	56
ED4.1-365.0/SiC/6p	61	57	57	57	57	58
(ED29B) C-365.0/SiC/6p	74	80	74	80	80	78

	REVISADO POR:	APROBADO POR:
Firma:		
Nombre:	Ing. Jonathan Castro, M.Sc.	Ing. Mario Granja, M.Sc.
Cargo:	PROFESOR OCASIONAL II	Jefe

## ANEXO A21. MC C-365.0/SiC/6p COLADO EN COQUILLA DE ACERO

### Lingotes cilíndricos de MCM C-365.0/SiC/6p.

En la Tabla A21.1 se muestran los materiales en porcentaje y masa. Además de los parámetros establecidos para la fabricación de lingotes cilíndricos C-365.0/SiC/6p.

Tabla A21.1. Materiales y parámetros para la fabricación de lingotes C-365.0/SiC/6p.

Cantidades en porcentaje y masa de los constituyentes principales y materiales secundarios						
Masa de la moldura de fundición 100%	Matriz Al-Si 365.0 al 93%	Tensioactivo aro de rueda de Mg al 1% + 2 g pérdidas	Refuerzo SiC malla #400 al 6% + 3 g pérdidas	Escorificante alu fundex extra al 0,5% 1ra y 2da carga	Desgasificante apartagas H7-50 al 0,25% + 7%	Afinador de grano Al5TiB al 0,2% + 0,5 g oxidación
1700 g	1581 g	19 g	105 gr	7,905 g	4,229 g	3,662 g
Temperaturas referenciales para el proceso de fundición de la matriz Al-Si 365.0 y MC C-365.0/SiC/6p						
Temperatura de fusión teórica 365.0	590 °C	Temperatura de colado recomendadas	700-750 °C	Temperatura de colado AlSi10-SiC recomendadas	700-760 °C	
Parámetros en el proceso de fabricación de lingotes cilíndricos vía stir casting						
tiempo de calentamiento horno-crisol-matriz			10 min	Temperatura ambiente		18 °C
tiempo de fundición de la matriz			35 min	Temperatura de fusión de la matriz		710 °C
tiempo de adición de Mg después de fundir la matriz			7 min	Temperatura de adición Mg		710 °C
tiempo de adición Al5TiB después de adicionar Mg			7 min	Temperatura de adición Al5TiB		710 °C
SiC se mantiene calentado hasta después de escorificar y desgasificar la matriz.				Temperatura de calentamiento SiC		300 °C
tiempo de adición SiC con una rotación de las aspas sobre la matriz fundida de 500 rpm			3 min	Temperatura de la matriz al adicionar SiC		720 °C
tiempo de agitación de la masa fundida matriz-SiC con una rotación de las aspas de 600 rpm			3 min	Temperatura de agitación de la masa fundida matriz-SiC		720 °C
tiempo de desgasificado con campana de argón			35 seg	Temperatura de la masa fundida al iniciar la desgasificación con argón		720 °C
Se utilizó un crisol de acero de Ø101 × 190 × 13 mm. Molde de coquilla de acero. Agitador de 4 paletas planas de Ø60 × 30 × 5 mm con inclinación de 70°				Temperatura de colado composite		700 °C

(Fuente: Elaboración propia)

La Figura A21.1 muestra el molde de coquilla de acero, perteneciente al Laboratorio de Fundición de la Facultad de Ingeniería Mecánica, utilizada para el colado del composite C-365.0/SiC/6p.



Figura A21.1. Coquilla de acero.

(Fuente: Elaboración propia)

La Figura A21.2 muestra los dos lingotes obtenidos de MC C-365.0/SiC/6p colado en un molde de coquilla de acero. A partir de estos lingotes se realizó ensayos de tracción y dureza.



Figura A21.2. Lingotes obtenidos de MC C-365.0/SiC/6p colado en coquilla de acero.  
(Fuente: Elaboración propia)

Los diagramas esfuerzo deformación de las probetas 29A (C-365.0/SiC/6p) y 29B (C-365.0/SiC/6p), a las cuales se realizó el ensayo de tracción, son mostrados en el Anexo A18, mientras que los resultados del ensayo a las 2 probetas son mostrados en el informe técnico del Anexo A19. En cambio el resultado del ensayo de dureza a la probeta 29B (C-365.0/SiC/6p) es mostrado en el informe técnico del Anexo A20.