

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**



**T E S I S**

**“DESARROLLO DE UNA FUNDICIÓN PARA UNA APLICACIÓN  
EN AGUAS RESIDUALES”**

**PRESENTA**

**NELY GRISEL FLORES LICA**

**EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA  
MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

**JUNIO 2016**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA  
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**T E S I S**

**“DESARROLLO DE UNA FUNDICIÓN PARA UNA APLICACIÓN  
EN AGUAS RESIDUALES”**

**PRESENTA**

**ING. NELY GRISEL FLORES LICA**

**EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA  
MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

**SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN,**

**JUNIO 2016**

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON**  
**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA**  
**SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

Los miembros del comité de tesis, recomendamos que la tesis "DESARROLLO DE UNA FUNDICIÓN PARA UNA APLICACIÓN EN AGUAS RESIDUALES" realizada por el ING. Nely Grisel Flores Lica, con el número de matrícula 1649876, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestría en Ingeniería Mecánica con Especialidad en Materiales.

El Comité de Tesis

---

Dr. Arturo Juárez Hernández

Asesor

---

Dr. Marco Antonio L. Hernández Rodríguez

Revisor

---

Dr. Juan Genesca Llongueras

Revisor

---

Dr. Simón Martínez Martínez

Subdirector de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, Junio del 2016.

# **DEDICATORIA**

**A mi familia y amigos que me han  
apoyado y de quienes he aprendido  
mucho.**

# AGRADECIMIENTOS

- A mis padres Roberto y Lucy por todo el apoyo brindado a lo largo de mi vida, por todo su amor y cariño, por ayudarme e impulsarme y abrirme las puertas a mis estudios profesionales y por sus grandes ejemplos para crecer como persona.
- A mis hermanos Marco y Oswaldo por estar conmigo siempre, por ayudarme y apoyarme en todo lo que hago, por sus buenos consejos y la confianza que durante cada día de mi vida me han brindado.
- Al CONACYT por el apoyo económico brindado durante la realización de este proyecto y de la maestría.
- A la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, y a la Universidad Autónoma de Nuevo León.
- A mi asesor el Dr. Arturo Juárez Hernández por orientarme y guiarme en todo el trabajo realizado, por sus consejos, su paciencia, por facilitarme las herramientas necesarias para lograr los objetivos, por su gran confianza y por su valiosa amistad.
- Al Dr. Marco A. L. Hernández Rodríguez por su gran apoyo en la realización de este proyecto, por sus consejos, y por brindarme su confianza y amistad.
- Al Doctor Ismael y su grupo de trabajo del Cinvestav Unidad Saltillo, que me permitió ser parte de la realización de este proyecto.
- A mis compañeros y amigos de generación de la maestría: Ana, Norma, Ángel, Romo, Kike, Angie y Eleazar, con quienes compartí conocimientos, pláticas y grandes momentos dentro y fuera de las aulas.

- A mis compañeros del grupo de trabajo Juárez-Hernández: Roberto, Norberto, Israel, Wilfrano, Karina, y a todos los que de alguna u otra forma me ayudaron, enseñaron y aconsejaron para realizar este proyecto.
- A mis amigos que me han apoyado incondicionalmente a lo largo de las diferentes etapas de mi vida, por esos momentos gratos que hemos vivido y por la confianza y amistad que me han brindado.

# ÍNDICE

DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTOS .....	ii
ÍNDICE .....	iv
LISTA DE TABLAS.....	vii
RESUMEN .....	viii
Capítulo 1.....	ix
Introducción.....	1
1.1. Objetivos .....	3
1.2. Hipótesis .....	3
Capítulo 2.....	4
Antecedentes .....	4
2.1. Aleaciones de Aluminio.....	4
2.2. Clasificación de las aleaciones de aluminio.....	4
2.3. Aleaciones de aluminio-silicio.....	5
2.4. Aleaciones hipoeutécticas.....	6
2.5. Aleaciones eutécticas.....	8
2.6. Aleaciones hipereutécticas.....	9
2.7. Efecto de los elementos aleantes.....	9
2.8. Espaciamiento dendrítico secundario .....	16
2.9. Nivel de modificación .....	20
2.10. Porosidad.....	22
2.11. Tamaño de grano.....	23
2.12. Propiedades mecánicas de las aleaciones aluminio-silicio.....	23

2.13. Aplicaciones de las aleaciones de aluminio.....	26
2.14. Importancia de la arena en la fundición y su definición.....	26
2.15. Tipos de arena.....	27
2.16. Arena sílica.....	27
2.17. Características fisicoquímicas de la arena.....	28
2.18. Forma del grano.....	28
2.19. Valor de la demanda ácida.....	28
2.20. Granulometría.....	29
2.21. Temperatura de la arena.....	30
2.22. Humedad en la arena.....	30
2.23. Densidad.....	30
2.24. PH de la Arena.....	30
2.25. Pérdidas por ignición de la arena.....	31
2.26. Sistemas de aglutinación química.....	31
2.27. Clasificación de los sistemas de aglutinación en orgánicos e inorgánicos. .....	32
2.28. Clasificación de los sistemas de aglutinación en base al pH catalizador. .....	32
2.29. Clasificación de los sistemas de aglutinación en base a la temperatura del curado.....	32
2.30. Sistema de aglutinación fenólico uretánico amina (CB).....	33
2.31. Diseño de coladas.....	36
2.32. Corrosión en aguas residuales.....	39
2.33. Aguas residuales domesticas.....	41
2.34. Aguas residuales en México.....	43
2.35. Corrosión del aluminio.....	44

2.36. Inhibidores de la corrosión.....	47
2.37. Desgaste en aleaciones de Aluminio .....	50
Capítulo 3.....	56
Experimentación.....	56
3.1. Cálculo del sistema de llenado y alimentación. ....	57
3.2. Simulación. ....	57
3.3. Moldeo .....	58
3.4. Fusión y vaciado de la pieza.....	64
3.5. Caracterización microestructural .....	67
3.5.1. Preparación de las muestras .....	67
3.6. Corrosión .....	69
3.6.1. Técnicas para evaluar la corrosión .....	69
3.6.2. Preparación de probetas para la prueba de Corrosión por pérdida de masa.....	71
3.6.3. Preparación del agua residual sintética. ....	79
3.6.4. Limpieza de las muestras sometidas a la prueba de corrosión. ....	86
Capítulo 4.....	87
Resultados y Discusión .....	87
4.1. Diseño del sistema de alimentación.....	87
4.2 Simulación .....	91
4.3 Fundición de la pieza .....	101
4.4 Análisis metalográfico .....	105
4.5. Corrosión por pérdida de peso. ....	109
Conclusiones.....	122
Referencias .....	123

# LISTA DE TABLAS.

Tabla No. 2.1. Sistema de designación de las aleaciones de aluminio <sup>[1]</sup> .....	4
Tabla No. 2.2. Clasificación de las aleaciones de aluminio-silicio, según el contenido de silicio. ....	6
Tabla No. 2.3. Clasificación de los sistemas de aglutinamiento en base al pH del catalizador <sup>[25]</sup> .....	32
Tabla No. 2.4. Clasificación de los sistemas de aglutinamiento en base al mecanismo del curado <sup>[25]</sup> .....	33
Tabla No. 2.5. Compuestos orgánicos presentes en aguas residuales domésticas en valores porcentuales <sup>[33]</sup> .....	40
Tabla No. 2.6. Composición del sustrato sintético propuesto por Torres et al. (1996) para preparar agua residual sintética. ....	41
Tabla No. 2.7. Composición del sustrato sintético propuesto por la U. de Valencia (2000) para preparar agua residual sintética <sup>[34]</sup> .....	42
Tabla No. 2.8. Composición de agua residual en México <sup>[34]</sup> .....	44
Tabla 3.1. Condiciones necesarias requeridas para el proceso de llenado en ProCast .....	58
Tabla No 3.2. Composición química de los lingotes de Aleación 356. ....	65
Tabla No. 3.5. Composición del sustrato sintético propuesto por la Norma alemana DIN 38412 para preparar agua residual sintética <sup>[35]</sup> .....	69
Tabla No. 3.7. Composición química muestra No. 2 .....	72
Tabla No. 3.8. Dimensiones y pesos de las probetas. ....	73
Tabla No. 3.9. Pesos de las probetas recubiertas con pintura epóxica .....	75
Tabla No. 3.10 de pesos de las probetas montadas en resina en frío .....	77
Tabla No. 3. 12. Pesos de las probetas pulidas .....	78

Tabla No. 3. 13 Reactivos utilizados para la síntesis de agua residual.....	84
Tabla No. 4.1. Valores de entrada del sistema de colada. ....	87
Tabla No. 4.3. Valores triángulo rectángulo número uno. ....	112
Tabla No. 4.4. Valores triángulo rectángulo número dos. ....	112
Tabla No. 4.5.Áreas de las probetas en cm <sup>2</sup> . ....	113
Tabla No.4.6. Pesos de las muestras después de retiradas del ambiente corrosivo y de ser limpiadas, para la obtención de la masa total perdida durante el experimento.....	116
Tabla No.4.7. Velocidades de corrosión para las muestras sometidas en agua residual de Aluminio 356. ....	116

# RESUMEN

Con el fin de minimizar el riesgo en la salud de las tuberías de alcantarillado, la compañía GB comenzó a desarrollar un proyecto de investigación y desarrollo de un robot móvil que permita inspeccionar, reparar, y remover cualquier objeto dentro de la tubería.

Para desarrollar este objetivo, fue necesario contar con una aleación adecuada, que presente buena resistencia a la corrosión y al desgaste, después de hacer una revisión de la literatura una aleación de Aluminio (356) fue elegida para esta aplicación.

Un diseño de alimentación se realizó para ser simulado utilizando el Software comercial Procast obteniéndose buenos resultados, posteriormente se realizó el moldeo, fundición y mecanizado hasta obtener un prototipo y el robot final con éxito.

Se realizó caracterización microestructural y pruebas de corrosión de la aleación con el fin de proporcionar un análisis de los resultados.

Las pruebas de corrosión se hicieron en una síntesis de aguas residuales para medir la operación del robot bajo las condiciones reales de trabajo.

# Capítulo 1.

## Introducción

El aluminio (Al) es el elemento químico que ocupa el tercer lugar de abundancia sobre la tierra con 7.5 a 8% en peso. En los años recientes, la industria del aluminio ha tenido un fuerte desarrollo debido a la creciente demanda en el mercado de piezas manufacturadas de este metal. El éxito de este material y su gran uso en la actualidad se debe a la combinación de propiedades que éste presenta y que lo hacen muy versátil, por mencionar algunas están: una buena apariencia agradable a la vista, no es magnético y es un buen conductor de calor y la electricidad, tiene características de resistencia a la corrosión, es liviano, no tóxico, puede tomar cualquier color y textura.

Entre las piezas obtenidas por fundición existen varios sistemas de aleaciones, siendo uno de los más importantes el aluminio-silicio. El silicio mejora la colabilidad de las aleaciones en general, entre otras características. Estas aleaciones presentan además buena resistencia al desgaste, pero baja resistencia a la fatiga y poca ductilidad conforme aumenta el contenido de silicio. Esto se debe a la morfología presentada por el silicio, la cual es acicular o laminar. Por esta razón se han realizado estudios en donde se busca la modificación de dicha morfología; esto se ha logrado añadiendo ciertos elementos (Sr, Na, Sb, etc.), los cuales son denominados agentes modificadores que generan una morfología normalmente fibrosa y/o globular.

El sistema aluminio-silicio, presenta un punto eutéctico simple en su diagrama de fases, permitiendo clasificar sus aleaciones en hipoeutécticas, eutécticas e hipereutécticas. Las modificaciones antes mencionadas se han realizado en todos los tipos de aleaciones de este sistema.

Son de especial interés para esta investigación las aleaciones hipoeutécticas, de manera específica la denominada A356. Esta aleación es de naturaleza dendrítica (estructura arbórea de cristalización de los metales) presentando de 6,5-7.5 % de silicio, su morfología es laminar, la cual genera fragilidad y poca maquinabilidad, con bajas propiedades mecánicas en las piezas de esta composición.

Como se mencionó anteriormente las aleaciones de aluminio son empleadas en diversas aplicaciones, por lo que en este trabajo se busca que la aleación A356 sea utilizada para la elaboración de la carcasa de un robot. Dicho robot se encargará de la inspección de las tuberías, verificando la integridad de las mismas, permitiendo con esto una evaluación previa antes de la introducción del “liner” para su reparación. Así mismo, este mecanismo llevará a cabo tareas como corte/destrucción/remoción de obstáculos que se encuentren durante la operación de limpieza de los ductos.

Con esta investigación se pretende desarrollar la carcasa del robot móvil para tales propósitos, de tal forma de sustituir importaciones en las cuales la empresa Grupo Bargo de México S.A. de C.V. ha incurrido. Esto conlleva a que sea una necesidad de una empresa pero más que eso, es una necesidad de la comunidad, para que se haga de una manera automatizada la remoción de los desechos sólidos, la inspección de las tuberías y la reparación de las mismas.

Por lo anterior es necesario que el desempeño de la aleación propuesta tenga buena resistencia a la corrosión y al desgaste, logrando con esto el buen funcionamiento en las condiciones de trabajo.

## **1.1. Objetivos**

El objetivo principal de este estudio consiste en seleccionar un proceso y una aleación adecuada que presente resistencia a la corrosión y al desgaste en aguas residuales. Los objetivos específicos son:

- Seleccionar una aleación para un robot móvil de inspección, corte y remoción de obstáculos en una tubería de aguas residuales.
- Desarrollar un proceso de fundición adecuado para la manufactura de la carcasa (diseño de llenado y alimentación, desgasificación, solidificación y microestructura).
- Construcción de modelos en CAD para simular el llenado y solidificación en el software comercial ProCast.
- Realizar el proceso de fundición y manufactura del robot.
- Caracterización de la aleación mediante análisis químico y análisis metalográfico.
- Estudio de la resistencia a la corrosión y al desgaste de la aleación, en pruebas de laboratorio y pruebas de campo, con el fin de ofrecer un análisis de los resultados.

## **1.2. Hipótesis**

Es posible llevar a cabo la fundición de una aleación en una sola pieza, en el que la aleación presente una buena resistencia a la corrosión y al desgaste, permitiendo su uso en una aplicación de aguas residuales. Reduciendo costos de mecanizado e infiltraciones de agua.

# Capítulo 2.

## Antecedentes

### 2.1. Aleaciones de Aluminio.

Las fundiciones de aluminio son una de las más versátiles y esto ha dado resultado una creciente demanda en el mercado de piezas manufacturadas de este metal. Presentan características tales como; estabilidad química, relativo bajo punto de fusión, buena fluidez, alta transferencia de calor del baño de aluminio hacia el molde, resistencia a la corrosión, buena conductividad eléctrica, buen acabado superficial de las piezas fundidas y muchas de estas piezas están relativamente libres de grietas en caliente y de la tendencia al agrietamiento, entre otras.

### 2.2. Clasificación de las aleaciones de aluminio

De acuerdo a la Asociación de Aluminio de los Estados Unidos, Aluminum Association of the United States se tiene el sistema de designación como se muestra en la siguiente tabla, en base a los principales elementos aleantes del aluminio.

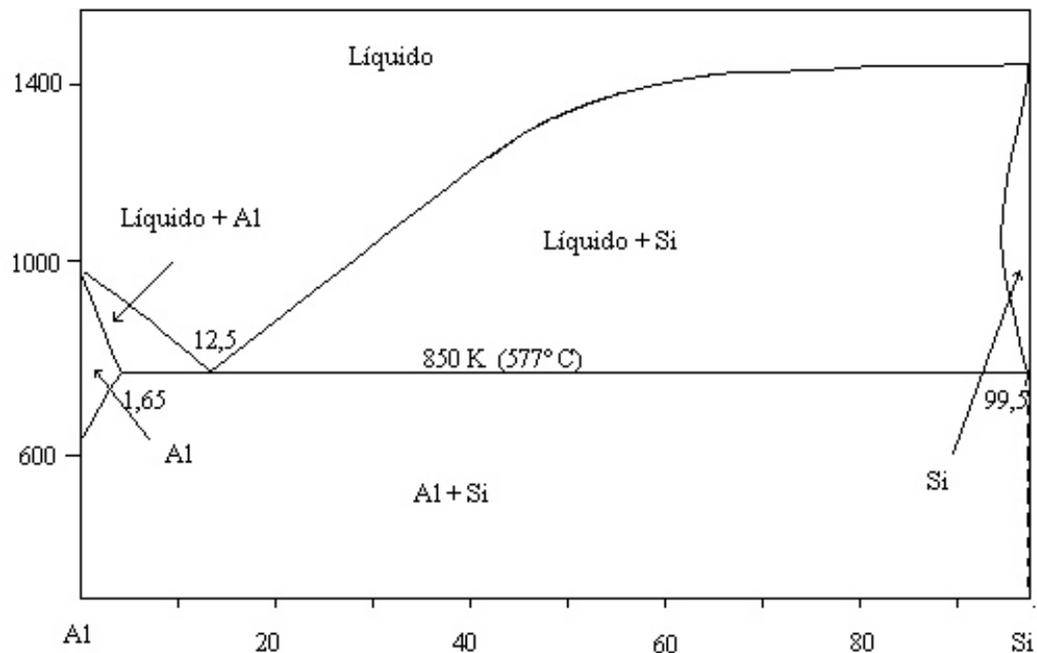
**Tabla No. 2.1. Sistema de designación de las aleaciones de aluminio<sup>[1]</sup>**

Aleaciones Conformadas		Aleaciones de Fundición	
Al (>99.0%)	1xxx	Al (>99.0%)	1xx.x
Cu	2xxx	Cu	2xx.x
Mn	3xxx	Si con Cu o Mg	3xx.x
Si	4xxx	Si	4xx.x
Mg	5xxx	Mg	5xx.x
Mg y Si	6xxx	Zn	7xx.x
Zn	7xxx	Sn	8xx.x
Otros elementos	8xxx	Otros elementos	9xx.x
		Serie sin uso	6xx.x

### 2.3. Aleaciones de aluminio-silicio.

El silicio es considerado una impureza muy importante en la bauxita dada su tendencia a formar silicatos. Sin embargo, cuando forma aleaciones con el aluminio se obtienen propiedades de interés, por esto se convierte en el aleante de mayor uso. Por tal razón las aleaciones de aluminio-silicio forman el grupo más importante de las aleaciones de fundición [2].

El diagrama de fase de este sistema presenta un eutéctico simple, tal como se observa en la figura No. 1.



**Figura No. 1. Diagrama de fases del sistema aluminio-silicio [2].**

El silicio presenta una máxima solubilidad a la temperatura eutéctica (577°C) de 1,65% la cual es considerada relativamente baja [3]. Estas aleaciones son clasificadas según su contenido de silicio, en hipoeutécticas, eutécticas e hipereutécticas, como se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla No.2.2. Clasificación de las aleaciones de aluminio-silicio, según el contenido de silicio.**

<b>Clasificación</b>	<b>%Si</b>
Hipoeutéctica	Menor a 10
Eutéctica	10 a 13
Hipereutéctica	Mayor a 13

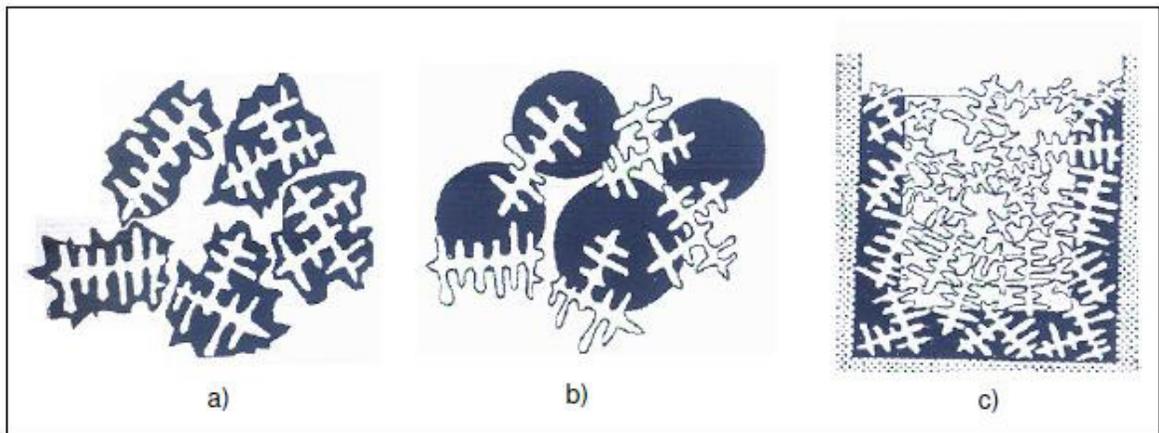
#### **2.4. Aleaciones hipoeutécticas.**

Las aleaciones de Al-Si hipoeutécticas, conforman una solución sólida sustitucional, denominada fase  $\alpha$ , donde la red cristalina no cambia su esquema geométrico fundamental. La morfología de estas aleaciones tiende a ser más parecida a la del aluminio puro (dendrítica), debido a la baja concentración de silicio.

Si se emplea bajas velocidades de enfriamiento se promueve el crecimiento del microconstituyente eutéctico. Este tiende a formar una estructura acicular o laminar de grandes dimensiones. En cambio, si las velocidades de enfriamiento son altas, se afina la estructura y se adopta una morfología irregular de filamentos ramificados (estructura pseudo-modificada). No se recomienda una alta temperatura de sobrecalentamiento, porque disminuye la temperatura de solidificación [4].

El autor Dahle ha estado investigando la formación del eutéctico en las aleaciones hipoeutécticas del aluminio, resume los posibles mecanismos de solidificación eutéctica. En el primer mecanismo, el eutéctico Al-Si nuclea directamente de las dendritas primarias del aluminio (ver figura 2a); en el segundo mecanismo el eutéctico nuclea en substratos existentes en el líquido interdendrítico (ver figura 2b); y en el tercer mecanismo, el eutéctico Al-Si puede nuclear en regiones sobreenfriadas cerca de las paredes del molde y crecer

opuestamente al gradiente térmico, (ver figura 2c). Las regiones negras de la figura 2 muestran el eutéctico Al-Si durante la solidificación [16].



**Figura 2. Posibles mecanismos de nucleación y crecimiento del eutéctico Al-Si. a) Adyacente a las dendritas primarias de Al (modo I), b) En partículas heterogéneas del líquido interdendrítico (modo II), c) Opuesto al gradiente (modo III) <sup>16</sup>.**

Si el eutéctico nuclea en las dendritas de aluminio primarias, el aluminio eutéctico tiene la misma orientación cristalográfica que la fase primaria porque se da un crecimiento igual hacia todas las direcciones (equiaxial). En contraste, con la adición del estroncio, el eutéctico nuclea de manera independiente en núcleos dentro del líquido interdendrítico, el aluminio que forma el grano eutéctico, no tiene ninguna semejanza de orientación con la fase primaria de aluminio y tiene diferentes orientaciones cristalográficas que permiten obtener una microestructura dual. El estroncio influye directamente sobre las impurezas presentes en el líquido, a medida que va solidificándose la fase primaria de aluminio, se van segregando partículas a la interfase, entre ellas las de estroncio que en el líquido remanente activará a las impurezas facilitando la nucleación del eutéctico Al-Si dentro del líquido interdendrítico.

## 2.5. Aleaciones eutécticas.

Estas aleaciones están constituidas exclusivamente por el microconstituyente eutéctico. La estructura es una mezcla de fase  $\alpha$  y  $\beta$ , la cual presenta un crecimiento cooperativo durante el proceso de solidificación. La composición está dada en la Tabla No. 2.

Dicho microconstituyente se caracteriza por una estructura laminar o acicular, donde el silicio presenta forma de agujas filosas y gruesas. Con esta morfología se obtiene una aleación poco dúctil, sobre todo cuando se emplean moldes de arena. Por otra parte, las propiedades mecánicas de estas aleaciones dependen exclusivamente de las características presentadas por este microconstituyente eutéctico [5].

El crecimiento eutéctico del aluminio-silicio (ver figura 3) se caracteriza por pequeñas partículas de silicio que crecen en planos en forma de placas con una sola dirección y con un ángulo de  $141^\circ$  de la interfase sólido-líquido.

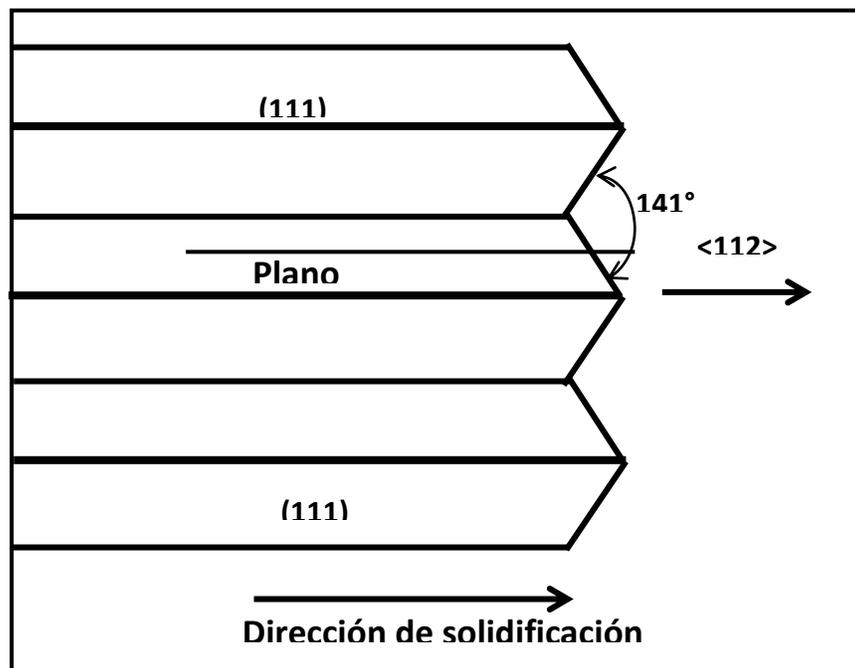


Figura No.3. Crecimiento eutéctico del Al-Si.

La estructura de la fase eutéctica se caracteriza por el crecimiento simultáneo de dos o más fases y tiene una amplia variedad de microestructuras que se clasifican en base a dos criterios: microestructuras eutécticas con morfologías laminares o fibrosas y microestructuras regulares e irregulares dependiendo del crecimiento de las fases. Durante el proceso de solidificación, las condiciones del metal determinan la morfología de las fases presentes. Las condiciones del metal incluyen las condiciones térmicas y químicas. Las condiciones térmicas son: el gradiente de temperatura (G) y la velocidad de crecimiento en la interfase (R).

## **2.6. Aleaciones hipereutécticas.**

En estas aleaciones el primer sólido a formarse son los cristales de silicio, estos crecen a expensas del líquido hasta lograr la solidificación total. Las propiedades se ven afectadas conforme aumenta el contenido de silicio, por lo que sugiere el empleo de grandes velocidades de enfriamiento. Esto último, con la finalidad de obtener las mejores características permitidas según la morfología del silicio <sup>[6]</sup>.

## **2.7. Efecto de los elementos aleantes.**

Propiedades como la resistencia mecánica, resistencia al impacto, dureza, punto de fusión, fluidez, conductividad térmica, ductilidad, maquinabilidad y peso específico se ven modificadas por la adición de elementos añadidos a las aleaciones de aluminio.

### **Antimonio.**

Para niveles de concentración iguales o mayores a 0.05% el antimonio refina la fase eutéctica laminar de las aleaciones de aluminio-silicio de composición Hipoeutéctica. La efectividad de este elemento en la modificación de la estructura eutéctica depende de la ausencia de fósforo y de la adecuada velocidad de enfriamiento durante la solidificación. El antimonio también reacciona con el sodio o el estroncio formando compuestos intermetálicos que

presentan efectos adversos en la estructura del eutéctico y la colabilidad de la aleación.

### **Boro.**

Los boruros forman nucleaciones estables y se emplean con la finalidad de refinar el grano de algunas fases, tales como  $TiAl_3$  en el baño de aluminio <sup>[2]</sup>. Los boruros metálicos reducen la vida de las herramientas utilizadas durante el proceso de mecanizado, y si forma inclusiones influye negativamente sobre la maquinabilidad y la ductilidad. El boro en altas concentraciones contribuye a la aglomeración de partículas en el baño metálico, lo que incrementa el riesgo de inclusiones. Sin embargo, el tratamiento de aluminio con boro, el cual contiene características peritecticas es practicado para proveer a la aleación de pureza y buena conductividad eléctrica dentro de la fundición con rotor. Para altos grados de aleación en un rotor puede especificar que el boro debe exceder a los contenidos de titanio y vanadio entre otros para formar compuestos o precipitados con estos para proporcionar una pieza con características eléctricas.

### **Sodio.**

Es un agente modificador de la estructura eutéctica en las aleaciones aluminio-silicio. En presencia de fósforo, el sodio interactúa con este reduciendo su efectividad como agente modificador y el fósforo se hace menos eficiente para la refinación del silicio primario <sup>[1]</sup>. Existe una teoría que justifica la acción del sodio, y expresa que los átomos de sodio se ubican en zonas de menor energía dentro de los cristales de silicio, esto impide el desarrollo de los mismos generando así otras zonas de crecimiento <sup>[8]</sup>.

### **Magnesio.**

Este elemento se combina con el silicio, lo cual hace a la aleación tratable térmicamente. Con esta condición se mejoran las propiedades mecánicas de la aleación. Entre las características que este elemento aporta,

se encuentran que mejora las propiedades mecánicas, mejora la resistencia a la corrosión, disminuye la colabilidad, presenta una alta oxidación en el baño líquido <sup>[8]</sup>, facilita el mecanizado, etc.

### **Berilio.**

Adiciones de berilio en concentraciones de parte por millón pueden ser efectivas en la reducción de las pérdidas por oxidación y en la asociación de inclusiones de magnesio. En altas concentraciones (>0,04%), el berilio afecta la forma y composición de compuestos intermetálicos de hierro, influyendo marcadamente en la resistencia a la ductilidad. Dentro de los cambios beneficiosos en la morfología de las fases insolubles, el berilio también cambia esta composición, reprimiendo al magnesio en los sistemas aluminio-silicio-hierro y también está permitido su uso para cambio de dureza <sup>[2]</sup>.

### **Hierro.**

El hierro está presente como una impureza dentro de las aleaciones de aluminio. En grandes cantidades tiene un efecto dañino debido a su tendencia a la formación de compuestos frágiles con el aluminio y otros aleantes. Por esto las propiedades mecánicas se ven afectadas por el contenido de hierro.

En el sistema aluminio-silicio, si el hierro está presente en una concentración mayor al 0,6%, éste forma el compuesto  $Al_6Fe_2Si$ , el cual es frágil y cuya forma es acicular, afectando considerablemente la ductilidad de estas aleaciones. Si por otra parte, el silicio se encuentra en altas concentraciones y está presente el manganeso, se produce la estructura de escritura china. Esta morfología es menos dañina que el silicio primario, teniendo el hierro un efecto positivo disminuyendo la tendencia del agrietamiento en caliente de las piezas <sup>[9]</sup>.

### **Cobre.**

El cobre en el aluminio forma una solución sólida que produce un endurecimiento en las estructuras de las piezas fundidas. En efecto se

incrementa cuando la pieza es sometida a un calentamiento posterior, con lo que se promueve la formación de precipitados dispersos ramificados. Con estos precipitados se incrementan las propiedades mecánicas, ya sea en piezas fundidas o en las tratadas térmicamente.

Entre las características obtenidas al añadir este elemento, se encuentran la el mejoramiento de la colabilidad, la reducción de la contracción del metal fundido, se mejora considerablemente la colabilidad y disminuye considerablemente la resistencia a la corrosión <sup>[7]</sup>.

### **Silicio.**

Este elemento mejora considerablemente las características de colabilidad en las aleaciones de aluminio. Las características aportadas por este elemento a la aleación es que mejoran la fluidez, buena soldabilidad, mayor dureza <sup>[8]</sup>, aumenta la resistencia al desgaste, presenta inconvenientes durante el mecanizado, entre otras.

### **Manganeso.**

La adición de este elemento incrementa la resistividad dentro de la solución sólida o como un precipitado intermetálico. Este no tiene efectos adversos sobre la resistencia a la corrosión. El uso del manganeso es limitado debido a la solubilidad en el aluminio de las impurezas pero esto se soluciona cuando se incrementa la velocidad de solidificación. Este elemento es añadido para incrementar el esfuerzo y controlar la estructura de grano. El manganeso tiene el efecto de incrementar la temperatura de recristalización y promueve la formación de una estructura fibrosa durante el trabajo en caliente. Como un precipitado disperso este es efectivo disminuyendo la recuperación y previniendo el crecimiento de grano, además de incrementar la sensibilidad al temple de las aleaciones tratables térmicamente.

## **Fósforo.**

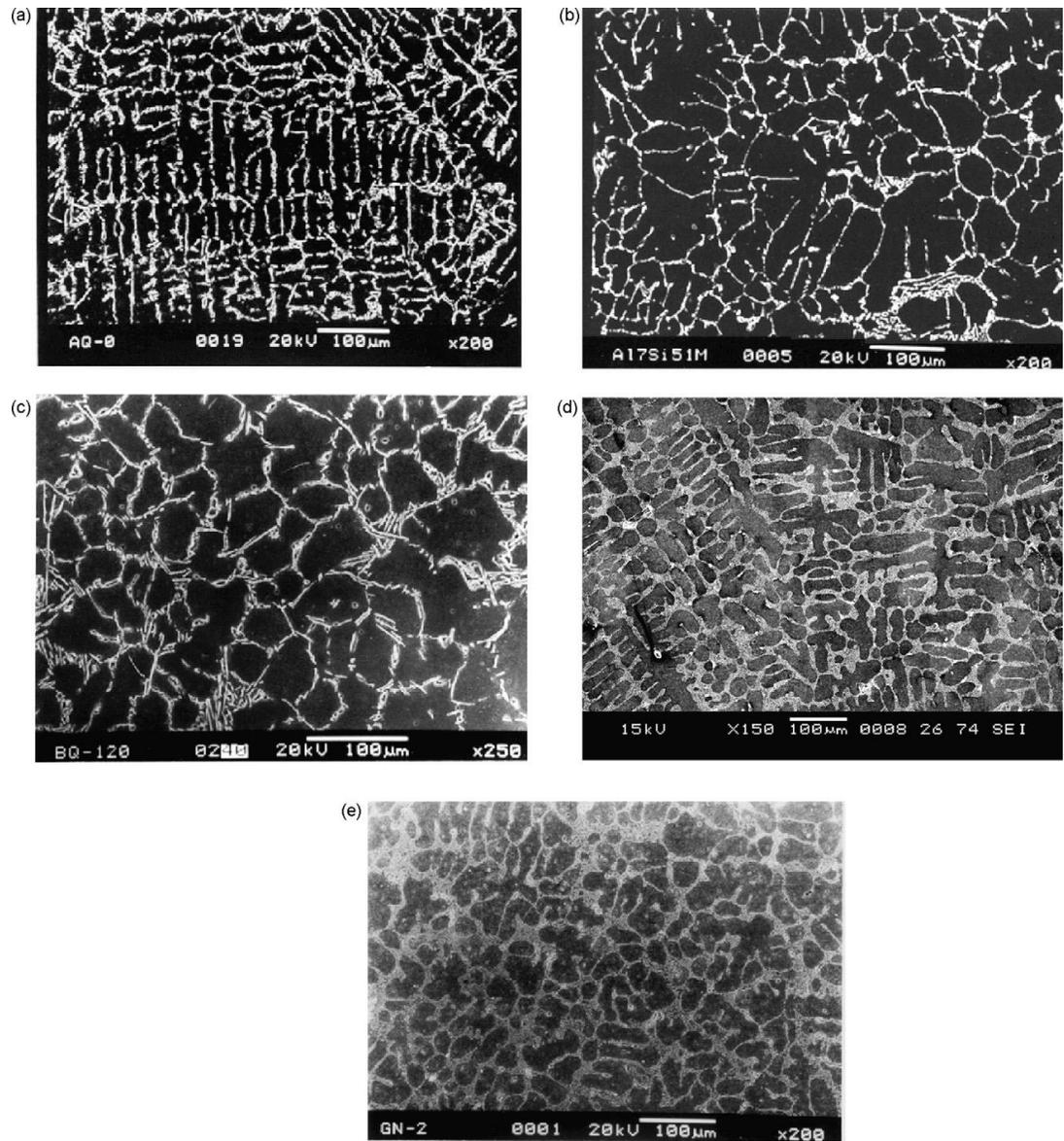
Este elemento forma el compuesto  $AlP_3$ , el cual sirve de nucleante y refinador de la fase silicio primario formada en las aleaciones aluminio-silicio hipereutécticas. En concentraciones de parte por millón, se hace muy gruesa la estructura eutéctica en las aleaciones aluminio-silicio hipereutécticas. El fósforo disminuye la efectividad de los modificadores del eutéctico comúnmente empleados, como lo son el sodio y el estroncio <sup>[2]</sup>.

## **Estroncio.**

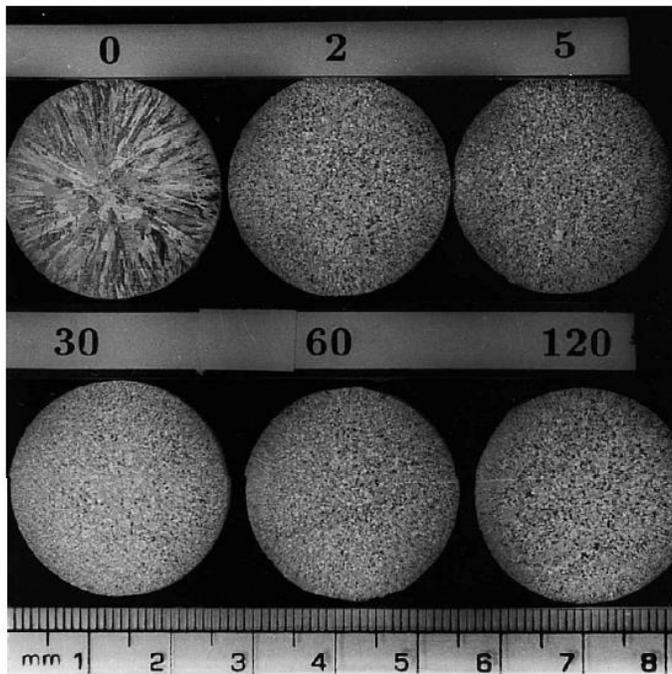
También es usado como agente modificador de la estructura eutéctica en las aleaciones de aluminio-silicio. Puede emplearse como sustituto del sodio, dada la gran volatilidad de este último <sup>[8]</sup>. Su mayor efectividad se encuentra en el empleo de bajas concentraciones de este elemento, si se incrementa su nivel, se puede presentar alta porosidad en la pieza a obtener. Una adecuada desgasificación puede contrarrestar el efecto de los altos niveles de estroncio en el baño metálico.

## **Titanio-Boro.**

Se emplea como refinador de grano de la zona dendrítica rica en aluminio. Con una relación  $Ti/B=5$ , se obtiene la máxima eficiencia de esta mezcla. El boro se añade para incrementar el campo de cristalización del  $TiAl_3$  y para reducir la solubilidad del silicio en el baño <sup>[8]</sup>.



La figura No. 4 Muestra las microfotografías de SEM de la aleación Al-7Si: (a) sin refinador de grano/modificador, (b) con 0,2% en peso M51 refinador de grano, (c) con 1,0% en peso de grano M13 refinador (d) con 0,02% modificador de Sr y (e) con 0,02% modificador de Sr y 1,0% en peso de M13 refinador de grano.<sup>[30]</sup>



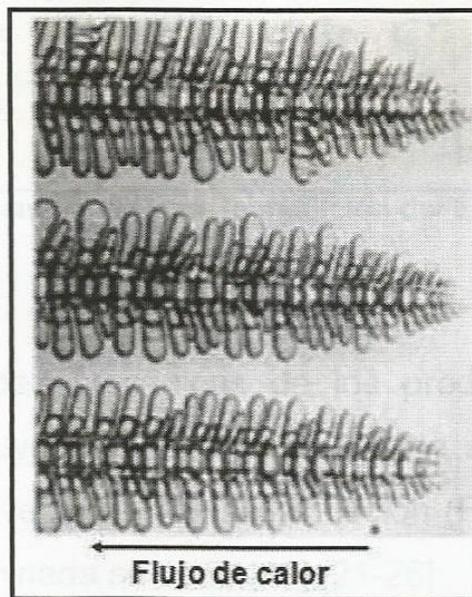
**Figura No. 5. Macrografías del grano de Al refinado mediante la adición de 0,01% de Ti usando Al-5Ti-1B (preparado a 800°C/60 min) Los números encima de las macrografías representan los valores en minutos <sup>[31]</sup>.**

### **Bismuto.**

Mejora la maquinabilidad de las aleaciones para fundición de aluminio en concentraciones mayores que 0,1% <sup>[2]</sup>.

## 2.8. Espaciamiento dendrítico secundario

La solidificación de las aleaciones Al-Si presenta una morfología de crecimiento dendrítico, dando origen a una estructura como la que se muestra en la figura 6<sup>[77]</sup>.



**Figura No. 6. Solidificación dendrítica** <sup>[77]</sup>.

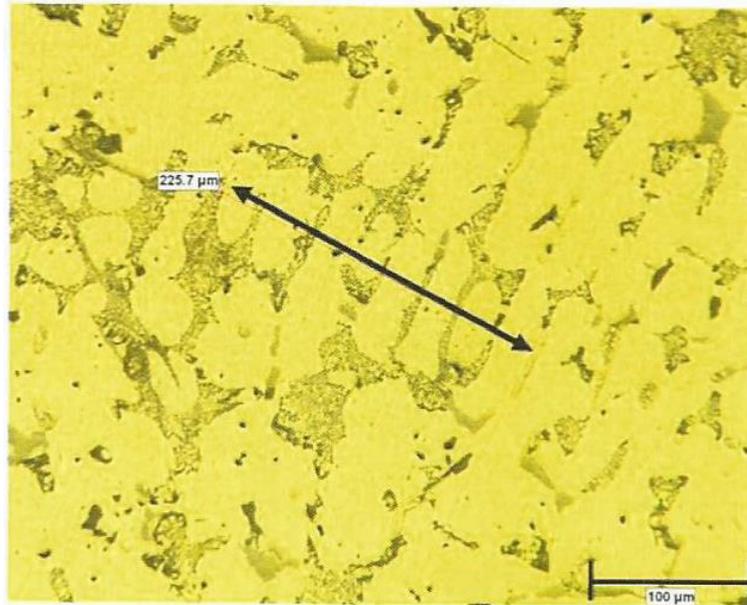
A la porción central de cada una de las dendritas se le conoce como brazo dendrítico primario, crece en sentido contrario a la dirección del flujo del calor.

Las protuberancias que crecen perpendicularmente del brazo dendrítico primario reciben el nombre de brazos dendríticos secundarios, a la distancia de separación entre estos últimos se le conoce como espaciamiento dendrítico secundario (EDS) o SDAS (Secondary Dendritic Arm Spacing) <sup>[77]</sup>.

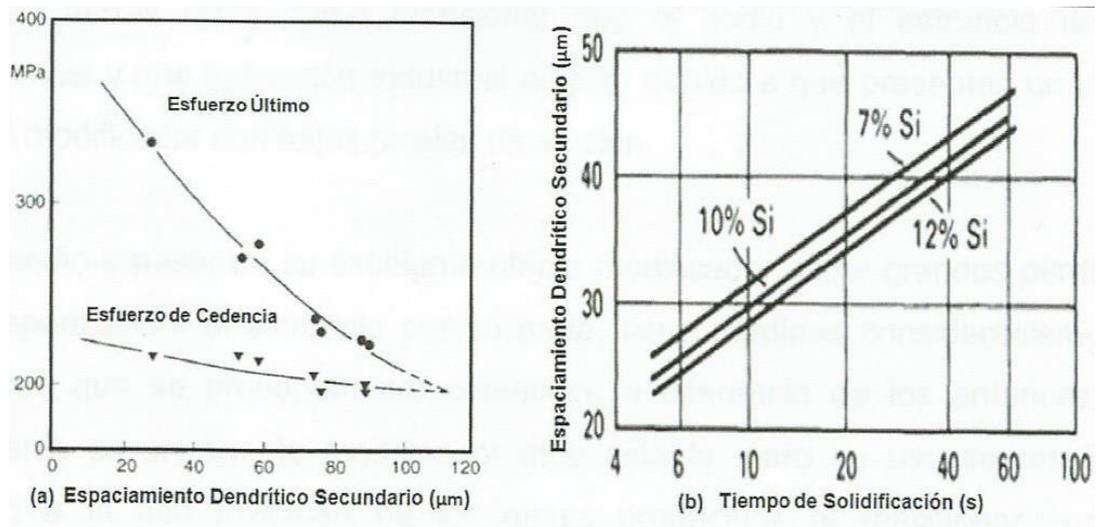
Para determinar el EDS se emplea un método que consiste en contar los brazos interceptados por una línea perpendicular a ellos y se divide la longitud de la línea entre el número de brazos. <sup>[77-79]</sup>.

Como las propiedades de los productos vaciados aumentan cuando el EDS disminuye (figura No. 8a), es de suma importancia el poder controlarlo

mediante la velocidad de solidificación (figura 8b), ya que para una composición determinada se tiene [74, 77-82].



**Figura No. 7. Técnica empleada para la medición del EDS de una aleación Al-Si hipoeutéctica.**



**Figura No 8. Relación entre EDS y a) Propiedades mecánicas<sup>[80]</sup>, b) Tiempo de solidificación<sup>[82]</sup>.**

El tamaño de las dendritas se ve afectado directamente por la velocidad con la cual se extrae el calor de la pieza vaciada (velocidad de enfriamiento). A mayores enfriamientos (tiempos cortos de solidificación) el espaciamiento dendrítico secundario será menor.

La ecuación para la obtención del SDAS es la siguiente:

$$SDAS = \frac{L}{\# \text{ de brazos de denditas}} \times \frac{1}{\text{aumento de microscopio}}$$

Se ha encontrado que el SDAS y el tiempo de solidificación ( $t_s$ ), así como la velocidad de enfriamiento ( $V_s$ ) se encuentran relacionados de la siguiente manera<sup>11</sup>:

$$SDAS = k(t_s)^n \quad SDAS = m(V_s)^o$$

Donde k, m, n y o son constantes que dependen de la composición del metal a la aleación, SDAS =  $\mu\text{m}$ ,  $t_s$  = segundos y  $V_s$  =  $^{\circ}\text{C}/\text{segundo}$ .

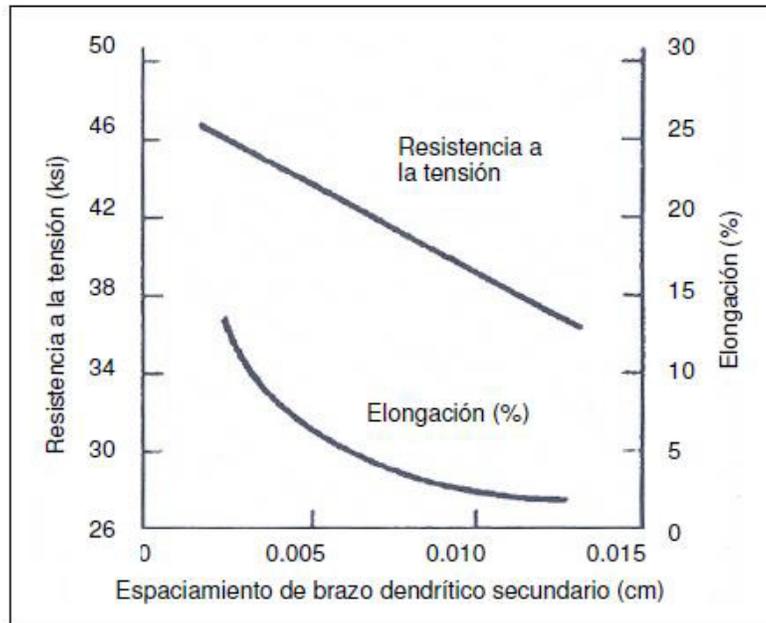
El tiempo requerido para la solidificación de una fundición simple puede ser calculado utilizando la regla de Chvorinov<sup>10</sup>.

$$t_s = B \left( \frac{V}{A} \right)^2$$

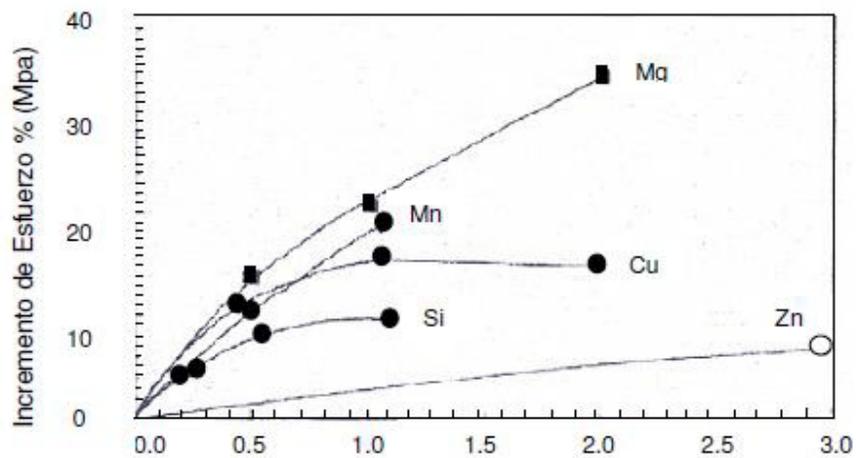
Donde  $t_s$  es el tiempo de solidificación total, V es el volumen de la fundición, A es el área de la pieza fundida en contacto con el molde y B es una constante del molde. En la mayoría de las piezas vaciadas las propiedades mecánicas dependen en gran medida del espaciamiento dendrítico secundario (ver figura No. 9). Se ha encontrado que mientras más pequeños es el SDAS, propiedades como el esfuerzo último de tensión, ductilidad y elongación se incrementan<sup>11</sup>.

Otro aspecto a considerar al tener SDAS pequeños en una pieza, es la buena respuesta de esta a los tratamientos térmicos. La reducción del SDAS

depende principalmente de tiempos de solidificación cortos, altos gradientes de temperaturas, velocidades de enfriamiento altas, entre otros.



**Figura No. 9. Relación entre SDAS y algunas propiedades mecánicas en una aleación de Al Si<sup>11</sup>.**



**Figura No. 10. Gráfico del incremento de esfuerzo de cedencia según el porcentaje de peso del elemento. [2]**

## 2.9. Nivel de modificación

Con el objetivo de incrementar las propiedades mecánicas de las aleaciones aluminio- silicio, se provocan cambios morfológicos en el silicio eutéctico, de un aspecto acicular a uno fibroso, los cuales reciben el nombre de modificación; existen dos tipos de esta: química y por enfriamiento rápido [73,74].

**Modificación química.** Se lleva a cabo cuando un elemento, agente modificador crea en el silicio eutéctico una gran cantidad de maclas, cambiando su morfología acicular a fibrosa. Este fenómeno se produce debido a que la impureza provoca que grupo de átomos de silicio cambien su posición uniformemente a través de un plano específico; forzando a que el crecimiento facetado del silicio se ramifique.

La característica que debe cumplir un elemento para funcionar como agente modificador es que se acerque la relación de 1.646, como el sodio presenta una relación de 1.641 este es el agente modificador más efectivo.

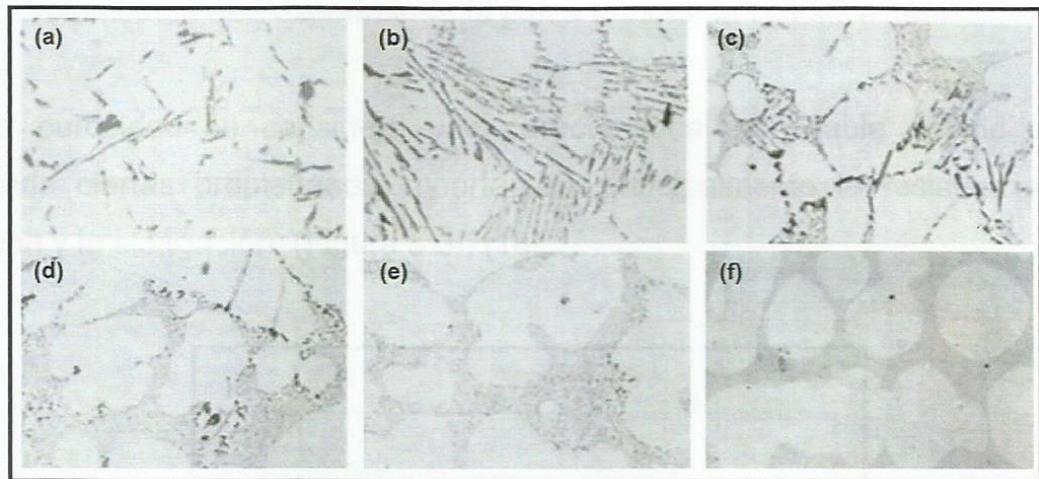
Existen distintos elementos que pueden ser utilizados como agentes modificadores, entre ellos sobresalen los grupos IA y IIA de la tabla periódica y algunas tierras raras; cabe mencionar que el sodio y el estroncio tienen preferencia y una aplicación industrial amplia, debido a que presentan un buen efecto modificador con bajos niveles de adición.

El sodio a pesar de su excelente efecto modificador, tiene grandes pérdidas por vaporización; el estroncio por su parte, tiene pérdidas considerablemente menores que se presentan por oxidación, a diferencia de los anteriores el antimonio es un agente modificador muy estable, pero su uso se restringe debido a la toxicidad de los gases producidos al reaccionar con el hidrogeno disuelto en el aluminio líquido.

Dependiendo de la cantidad de agente modificador, así como de la composición de la propia aleación aluminio- silicio, se pueden contener estructuras de silicio eutéctico intermedias entre la acicular y la fibrosa.

La AFS (American Foundrymen's Society) divide esta gama de estructuras en seis niveles de modificación: el nivel 1 corresponde a una estructura sin modificar; a los niveles 2 al 4, estructuras parcialmente modificadas; el nivel 5 a una estructura completamente modificada y el nivel 6 a una estructura sobremodificada (figura No. 11) <sup>[73]</sup>.

**Modificación por enfriamiento rápido.** Por medio de una solidificación rápida en un rango de crecimiento de 400 a 1000  $\mu\text{m}$  por segundo se puede obtener una estructura fibrosa del eutéctico. Analizando este tipo de modificación bajo microscopia electrónica de barrido, se ha encontrado que las estructuras obtenidas por este método presentan una morfología acicular pero extremadamente fina <sup>[73]</sup>.



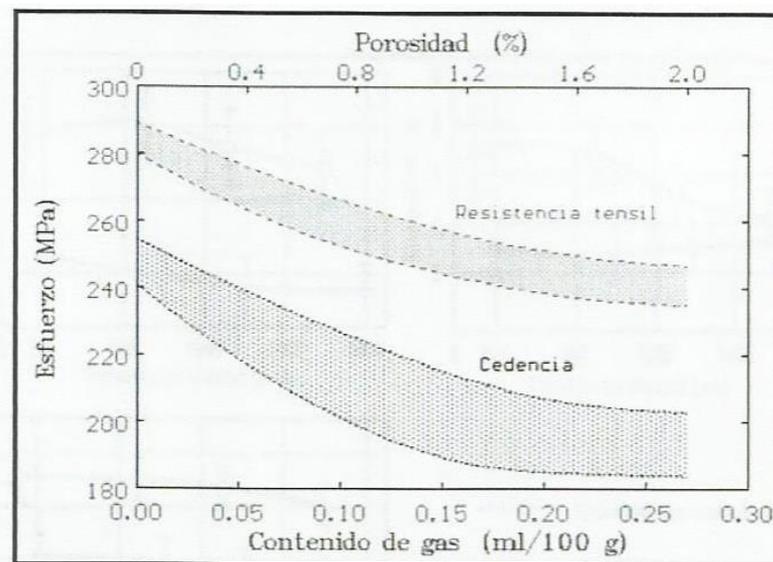
**Figura No. 11. Estructuras del silicio eutéctico modificado químicamente: (a) Nivel 1- sin modificar. (b) Nivel 2- Laminar. (c) Nivel 3- Modificada parcialmente. (d) Nivel 4- Ausente de láminas. (e) Nivel 5- Fibrosa. (f) Nivel 6- Sobremodificada. <sup>[73]</sup>**

## 2.10. Porosidad

La porosidad es el defecto más común encontrado en las aleaciones Al-Si, se clasifica de acuerdo a su origen <sup>[73,74]</sup>:

- Porosidad por Hidrógeno. Se genera cuando el hidrógeno disuelto en el aluminio líquido queda atrapado en forma de burbujas durante la solidificación debido a la disminución en su solubilidad.
- Porosidad por contracción. Es provocada por una alimentación deficiente de metal líquido para poder contrarrestar la contracción volumétrica que experimenta la pieza durante la solidificación.

La porosidad se considera una característica indeseable debido a que degrada ciertas propiedades importantes, principalmente la resistencia a la tensión y elongación, (Figura No. 12) <sup>[74]</sup>.



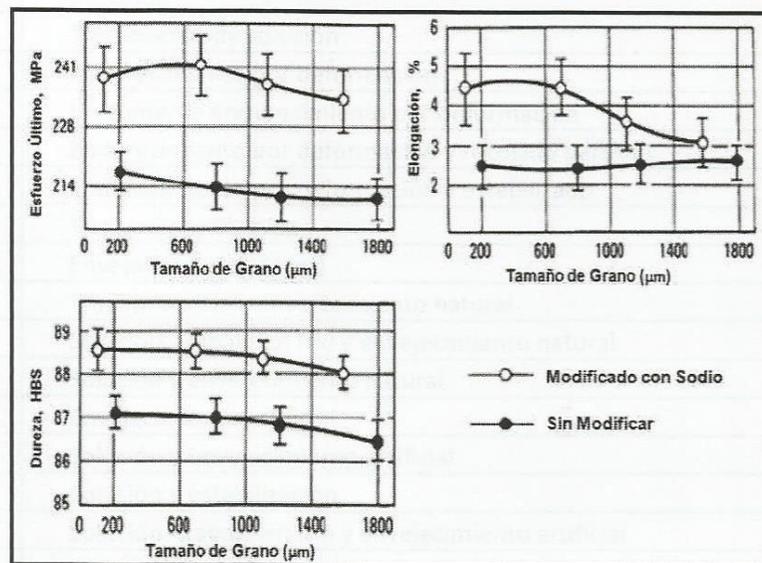
**Figura No. 12. Efecto de la porosidad sobre las propiedades en tensión de una aleación tipo 356.** <sup>[74]</sup>

Utilizando altas velocidades de enfriamiento y métodos de refinamiento de grano se puede lograr que la porosidad disminuya o por lo menos que se distribuya uniformemente en poros de menor volumen <sup>[73]</sup>.

## 2.11. Tamaño de grano

En las aleaciones Al-Si cada grano contiene una familia de dendritas de aluminio y entre sus brazos una mezcla eutéctica; por lo que el control del EDS y la modificación son mucho más importantes que el proceso de refinamiento de grano. Algunas propiedades mecánicas llegan a incrementarse cuando se refina el tamaño de grano debido a que se puede obtener mejor distribución de la porosidad por contracción y reducirse aquella causada por hidrógeno (Figura 13). Existen dos métodos de refinamiento de grano <sup>[73,80, 82]</sup>.

- Por enfriamiento rápido. Los núcleos presentes en el líquido se activan durante la solidificación utilizando una alta velocidad de enfriamiento.
- Por métodos químicos. Consiste en adicionar a la aleación en estado líquido agentes de nucleación (titanio de 0.02 a 0.15% y boro de 0.01% en peso), que sirven como núcleos activos incluso a bajas velocidades de enfriamiento.



**Figura No. 13. Efecto del tamaño de grano en las propiedades mecánicas de una aleación aluminio-silicio hipoeutéctica.** <sup>[82]</sup>

## 2.12. Propiedades mecánicas de las aleaciones aluminio-silicio.

El mecanizado de este tipo de aleaciones se hace más difícil conforme se incrementa el contenido de silicio. Esto se ve modificado mediante la adición de elementos como el magnesio y el cobre. A su vez la morfología que presentan las partículas de silicio tiene una gran influencia en las propiedades mecánicas, ya que a medida que estas son más redondeadas y más pequeñas se mejora la ductilidad junto con una relativa alta resistencia tanto al impacto como a la fatiga <sup>[12]</sup>.

En una aleación de aluminio-silicio que aún no ha sido modificada, se presentan las siguientes propiedades mecánicas:

- La resistencia a la fatiga es baja.
- La elongación alcanza su máximo valor a la temperatura solidus aproximadamente. Luego decrece rápidamente.
- El módulo de elasticidad se incrementa linealmente hasta un 30% de silicio.
- A medida que aumenta la temperatura la resistencia mecánica disminuye rápidamente.
- Se incrementa la colabilidad de la aleación hasta la composición eutéctica, luego decrece.
- A mayor contenido de silicio aumenta la fragilidad de la aleación <sup>[15]</sup>.
- La resistencia a la tensión y la dureza se incrementan con el contenido de silicio.
- A mayor contenido de silicio mayor es la resistencia al desgaste de la aleación.
- El coeficiente de dilatación térmica disminuye conforme crece el contenido de silicio.
- La contracción por solidificación disminuye a medida que aumenta el contenido de silicio.

Todas estas propiedades se ven afectadas por aspectos como lo son:

- La composición química de la aleación
- La estructura de solidificación

- Tratamientos térmicos
- Defectos presentes en las piezas vaciadas
- Variables térmicas:
  - a. Temperatura de colada
  - b. Temperatura del molde
  - c. Velocidad de enfriamiento
- Incorporación de aditivos:
  - a. Afinadores de grano
  - b. Modificadores de la microestructura
  - c. Desoxidantes
  - d. Desgasificadores
- Adición de aleantes

En aleaciones aluminio-silicio es muy poco relevante el efecto endurecedor del silicio. Las partículas que se precipitan de silicio en la matriz de aluminio no varían mucho este efecto, sin embargo, al presentarse estos precipitados se logra un aumento en la resistencia a la tensión y la dureza en disminución de la ductilidad <sup>[4]</sup>.

Relacionado con el mecanismo de fractura se puede mencionar que la fractura ocurre después de la deformación plástica, que al presentarse un tamaño de partícula pequeño el esfuerzo requerido aumenta, a mayor esfuerzo mayor será la cantidad de partículas que se fracturen, las partículas grandes rompen más fácilmente que las esféricas <sup>[11]</sup> y si los esfuerzos tiene centros de rotación, los planos de fractura son perpendiculares al mismo.

En cuanto a la abrasión de estos materiales, las partículas de silicio primario son perjudiciales. Ya que generan un mayor calor durante la fricción sensibilizando la tendencia a la microfractura.

Al modificarse estas aleaciones, se mejora la porosidad por contracción, la distribución de las segundas fases es más homogénea, se reduce la fisuración en caliente y la microporosidad se encuentra a una escala baja. Se

asegura la maquinabilidad en las piezas fundidas <sup>[12]</sup>. Y una vez modificadas estas aleaciones se mejoran propiedades, como: ductilidad, comportamiento dúctil-frágil, dureza, resistencia a la fatiga, y se obtiene una fractura intergranular. <sup>[13]</sup>

### **2.13. Aplicaciones de las aleaciones de aluminio**

Entre las áreas de aplicación del aluminio encontramos construcción, transportación, aplicaciones eléctricas y en recipientes o empaques.

#### **Aplicaciones de la aleación de aluminio A356.**

La aleación A356 es producida tanto en moldes de arena como permanentes. Esta posee excelentes características para el proceso de fundición y resistencia a la corrosión. Con tratamientos térmicos se pueden obtener combinaciones de propiedades mecánicas atractivas para muchas aplicaciones, incluyendo la industria aeroespacial y automotriz. Si además presentan un bajo contenido de hierro, habrá alta resistencia a la tensión<sup>15</sup>. Entre las aplicaciones para este material podemos mencionar: estructura y componentes en máquinas de control de aviones, instalaciones de energía nuclear, y otras aplicaciones donde se requiere alta resistencia o inversión de piezas fundidas <sup>[2]</sup>.

### **2.14. Importancia de la arena en la fundición y su definición.**

En la fabricación de moldes y corazones utilizados en la industria de la fundición la arena ocupa un lugar muy importante, esto debido a que comprende desde el 97% hasta el 99% de la relación resina-arena, y varias de sus características tienen influencia en el acabado y calidad de las piezas.

La arena, es un material de tipo orgánico compuesto de granos de mineral suelto de diferente tamaño, que va desde los 0.05 a 2mm de diámetro. Las diversas arenas que se utilizan en la fundición toman el nombre del mineral que se encuentra en la composición química en mayor concentración, por ejemplo, arena de zirconio, arena sílica, arena de cromita. <sup>[14,15, 16]</sup>

## 2.15. Tipos de arena.

Una de las principales arenas empleadas en la industria de la fundición es la arena sílica, ( $\text{SiO}_2$ ), sin embargo existen otros tipos de arenas como son la cromita ( $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ ), la zirconio ( $\text{ZrSiO}_4$ ), la mulita ( $2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$ ), la olivina ( $(\text{Mg}, \text{Fe})_2 \text{SiO}_4$ ), y a su vez existen algunas de tipo sintético (aluminosilicatos) <sup>[16, 17]</sup>.

Para llevar a cabo la selección de la arena a utilizar se deben considerar algunas cuestiones como lo son la composición química, la forma y el tamaño de la arena, compatibilidad con el sistema de aglutinación, disponibilidad y costo, distribución granulométrica, así como su estabilidad dimensional a temperaturas elevadas. Debido a que en esta investigación se trabajó con arena sílica se dará una breve explicación de sus características principales.

## 2.16. Arena sílica.

Esta arena se forma principalmente por granos de dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), aunque puede contener algunos otros compuestos, estos se consideran contaminantes, la mayoría de dichos contaminantes están contenidos en las mallas finas mayores al número 140 (0.1041 mm). Es uno de los minerales que se encuentran con más abundancia en la naturaleza, ya que constituye el 60% de la corteza terrestre. Se caracteriza por tener una alta pureza y un comportamiento químico neutro, también es altamente resistente al ataque de escorias, a la abrasión y presenta características refractarias.

La arena sílica es la principal arena empleada para la fabricación de moldes y corazones utilizados en las fundiciones principalmente, por las siguientes razones <sup>[25, 16]</sup>

- En la naturaleza es la más abundante
- Bajo costo en comparación con otros tipos de arena.
- Podemos encontrarla en una gran variedad de tamaños y distribuciones.
- De fácil extracción de los depósitos minerales naturales.

- Presenta buena compatibilidad con la mayoría de los aglutinantes orgánicos e inorgánicos.
- Buena resistencia por ataque químico
- Altamente refractaria y resistente al calor.

### **2.17. Características fisicoquímicas de la arena.**

Como se mencionó anteriormente la arena sílica es la principal arena empleada en las fundiciones y es la arena que se utilizó en este trabajo de investigación, por lo cual se profundizará más en las principales características fisicoquímicas que debe cumplir para su utilización en la industria de la fundición, como son: la forma del grano y área superficial, el valor de la demanda ácida (mejor conocido como ADV por sus siglas en inglés), la distribución de mallas y la cantidad de finos, la granulometría, la temperatura y la humedad en la arena, la densidad, el pH, y las pérdidas por ignición <sup>[14, 19, 20]</sup>.

### **2.18. Forma del grano.**

Estos pueden clasificarse por su forma en angulares, subangulares y redondeados, ver Figura No. 14. Para definir la forma de los granos de una manera más precisa, se utiliza lo que se conoce como coeficiente de angularidad, y con este, se tiene la relación entre la superficie real del grano de arena y a la superficie que tendría si este fuese una esfera.

Los granos redondos proveen el mejor arreglo de los poros conectados y también la mínima relación área-volumen. Por lo tanto, un grano redondo proporcionará la mayor permeabilidad y requerirá la menor cantidad de resina para ser recubierto, caso contrario con los otros dos tipos de grano <sup>[16, 18]</sup>.

### **2.19. Valor de la demanda ácida.**

El valor de la demanda ácida (ADV), determina las sustancias alcalinas solubles en ácido. La arena alcalina con un valor de demanda ácida mayor de 5 y un pH mayor a 8 aceleran la reacción entre las resinas [21, 22].

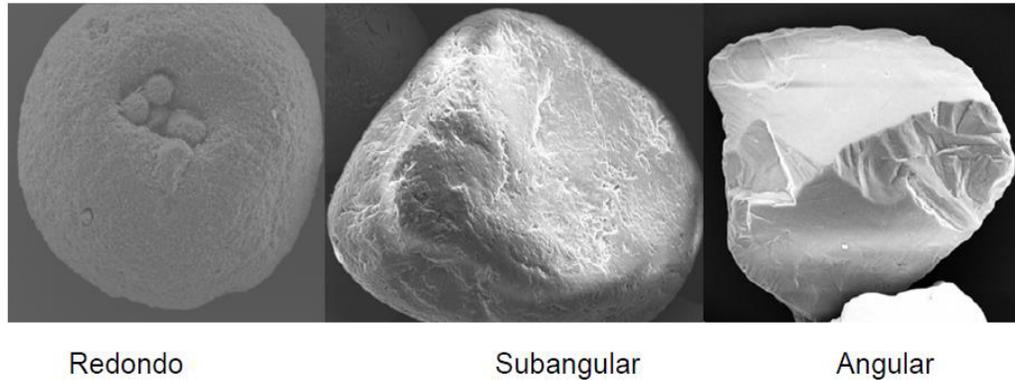


Figura No. 14. Morfología de los grano de arena.

## 2.20. Granulometría.

Esta característica indica la distribución y el tamaño de los granos de la arena, quedando expresado por el No. AFS que es una nomenclatura designada por la sociedad americana de fundidores (AFS por sus siglas en inglés), este se representa por medio de un análisis de distribución de mallas de un determinado diámetro y dicho resultado del análisis indica si la arena es de tipo fina, mediana o gruesa. Las principales características que se relacionan con el tamaño de grano son el acabado superficial y la permeabilidad [16].

La arena gruesa tiene un AFS menor a 45 y un contenido de finos menor a 3%, tiene una menor área de superficie; las principales ventajas de esta arena son: menor cantidad de resina para recubrir el grano, mayor fluidez de la mezcla, mejor permeabilidad del corazón para eliminar los gases durante el vaciado de la pieza, facilita el desarenado de la pieza.

La arena fina tiene un AFS mayor a 55 y un contenido de finos mayor a 7%, tiene una mayor área de superficie lo que le da propiedades contrarias a la de la arena gruesa: conforme más fino sea el grano se aumenta la necesidad

de resina, menor permeabilidad y desarenado, mayor suciedad del molde y emisión de humos, pero da menor rugosidad en las piezas vaciadas <sup>[17]</sup>.

### **2.21. Temperatura de la arena.**

El no tener un buen control en la temperatura de la arena evita la producción de un molde o un corazón de buena calidad, esto debido a que la temperatura afecta la reactividad y la viscosidad de las resinas. El rango de temperatura ideal de la arena es de 18 a 32°C y su efecto en la arena es:

- A temperaturas menores a los 18°C la reacción de las resinas se retarda disminuyendo la eficiencia del mezclado en el molino, debido a que se incrementa la viscosidad de las resinas <sup>[20, 21]</sup>.
- A temperaturas mayores de 32°C se acelera la reacción de las resinas y disminuye la fluidez de la mezcla.

### **2.22. Humedad en la arena.**

La presencia de humedad mayor de 0.2% en la arena no es recomendable debido a que reacciona con la resina parte 2 del sistema, degradando así las propiedades y la resistencia de los moldes. Las principales fuentes de contaminación de humedad son: alta humedad relativa en el ambiente, alta humedad en el aire comprimido, recipientes de almacenamiento mal sellados, condensación en los serpentines del sistema de enfriamiento de la arena, entre otros <sup>[22]</sup>.

### **2.23. Densidad.**

Entre mayor sea el número de granos que se puedan unir en un volumen determinado, mayor será la densidad y más fuerte serán los moldes y corazones de arena. Como se mencionó anteriormente los granos redondos poseen una buena compactación y pueden proveer una densidad en el rango de 8 al 10% mayor que la ofrecida por las arenas angulares <sup>[15, 20]</sup>.

### **2.24. PH de la Arena.**

Es un indicador de las impurezas encontradas en la arena, la cual tiene un pH neutro, las arenas muy alcalinas aceleran la reacción entre la resinas y disminuyen el tiempo de almacenaje de la mezcla.

Los factores que influyen para aumentar el pH en la arena son el alto contenido de finos (malla 270) y la presencia de contaminantes como partículas de carbonato de calcio, hierro y aluminio <sup>[22]</sup>.

### **2.25. Pérdidas por ignición de la arena.**

El valor de las pérdidas por ignición de la arena LOI indica la cantidad de resina o aditivos residuales adheridos a los granos de arena antes y después de la calcinación, si este valor es elevado se producirán problemas de bajas propiedades mecánicas en los moldes y corazones.

### **2.26. Sistemas de aglutinación química.**

Desde la introducción de los sistemas de aglutinación química (resinas para fundición) a finales de la segunda guerra mundial, se han desarrollado nuevos sistemas y nuevos procesos de aglutinación para llevar a cabo la fabricación de moldes y corazones de arena, pero fue hasta el año de 1960 cuando las fundiciones de todo el mundo comenzaron con el uso de polímeros para desarrollar nuevos sistemas de fabricación de moldes y corazones de arena mediante aglutinación química.

En la actualidad existen tres formas de clasificar los diferentes sistemas de aglutinación, los cuales son: en la base de su composición química, al pH del catalizador y al mecanismo físico de curado, que se describe a continuación <sup>[15, 20, 23]</sup>.

## 2.27. Clasificación de los sistemas de aglutinación en orgánicos e inorgánicos.

Los sistemas de aglutinación inorgánicos son los que no contienen en su estructura molecular el carbono. Estos sistemas están basados en la tecnología de los fosfatos, sulfatos, óxidos metálicos y silicatos [31, 20, 24]. Por su parte los otros sistemas que se utilizan, son resinas orgánicas derivadas de petróleo.

## 2.28. Clasificación de los sistemas de aglutinación en base al pH catalizador.

Esta clasificación se basa en el pH del catalizador, la tabla No. 3 muestra los sistemas de aglutinamiento tipo ácido ( $\text{pH} < 7$ ) los cuales son curados mediante la adición de material alcalino y los sistemas de aglutinamiento básico ( $\text{pH} > 7$ ) son curados mediante la adición de material ácido. Además existen otros sistemas de aglutinamiento químico que se curan mediante varios mecanismos que son ajenos al pH.

**Tabla No. 2.3. Clasificación de los sistemas de aglutinamiento en base al pH del catalizador [25].**

Ácido	Básico	Otro
Silicato - $\text{CO}_2$	Fenólico éster no horneado	Silicato no horneado
Epóxico acrílico - $\text{SO}_2$	Fenólico éster caja fría	Shell
Furánico - $\text{SO}_2$ Ácido Fenólico no horneado	Aceite uretánico no horneado Fenólico uretánico amina	Moldeo en aceite
Ácido furánico no horneado	Fosfato alúmina	
Fenólico $\text{CO}_2$		

## 2.29. Clasificación de los sistemas de aglutinación en base a la temperatura del curado.

Se basa en la temperatura en la cual se fabrican los corazones y los moldes, como se muestra en la Tabla No. 4.

**Tabla No. 2.4. Clasificación de los sistemas de aglutinamiento en base al mecanismo del curado <sup>[25]</sup>.**

<b>Caja fría</b>	<b>Caja caliente</b>	<b>No horneado</b>
Acrílico Epóxico SO <sub>2</sub>	Furánico caja caliente	Furánico ácido
Furánico SO <sub>2</sub>	Fenólico caja caliente	Fenólico ácido
Fenólico uretánico amina	Shell	Fenólico éster
Silicato de sodio CO <sub>2</sub>	Aluminosilicato	Fenólico uretánico
Fenólico CO <sub>2</sub>		Fosfato de alúmina
		Silicato éster

En el sistema de caja fría, el curado se lleva a cabo poniendo en contacto la mezcla con un catalizador vaporizado. En el sistema de caja caliente, la mezcla se pone en contacto con una fuente de calor de curado. Y por su parte en el sistema no horneado, se mezclan todos los componentes con un catalizador líquido que hace reacción a temperatura ambiente <sup>[31]</sup>.

Para este trabajo se utilizó lo que es el sistema de aglutinación uretánico amina por lo que se explicará de una manera más precisa a continuación,

### **2.30. Sistema de aglutinación fenólico uretánico amina (CB).**

Este sistema consta de tres componentes, el primero es una resina fenólica, el segundo es un dimetilisocianato y el tercero es una amina terciaria, que es empleada como catalizador. Este sistema se puede utilizar con todas las arenas que se emplean en la industria de la fundición <sup>[19, 26]</sup>.

La cantidad de resina que se utiliza en la mezcla es de 1.3% sobre el peso de la arena. La relación entre la resina parte 1 y parte 2 en la mezcla de arena es de 50/50, aunque en ciertas ocasiones, debido a las variables de la fundición, esta relación puede cambiar de 40/60 ó 45/55 a favor de la resina. Para vaciar hierros y aceros los niveles de resina van desde 1.5 a 2% y para

latones, bronce, aluminio y magnesio van de 1.0 a 1.5 esto con la finalidad de un fácil desarenado.

La trietilamina (TEA), la dimetiletilamina (DMEA), la dimetilpropilamina (DMPA) y la dimetilisopropilamina (DMIPA) son las aminas más comúnmente utilizadas <sup>[21]</sup>. El consumo de amina y la rapidez de curado dependen en gran parte de la geometría del molde o corazón, de la eficiencia del venteo en el herramental y la concentración de la amina en el gas transportador.

### **Química del sistema.**

Como ya se señaló anteriormente este sistema de aglutinación se compone de tres partes, las cuales se describirán a continuación. La resina parte 1 tiene tres componentes, la resina fenol-formaldehído, los solventes y los aditivos.

El fenol formaldehído comprende desde un 45 a un 60% en peso de la resina parte 1, varía según las condiciones de manufactura y las cantidades relativas de fenol y formaldehído utilizados. Cambiando estas condiciones y cantidades de fenol y formaldehído resultarán resinas con propiedades drásticamente diferentes. La principal razón de esto es que el fenol y formaldehído controlan las características de la resistencia a la tensión, tanto a temperatura ambiente como a temperaturas elevadas del sistema fenólico uretánico.

Los solventes conforman un 40 a un 55% en peso de la parte 1, que variará según los tipos y cantidades usadas. Algunos solventes por si mismos son mezclas complejas de hidrocarburos aromáticos de alto punto de ebullición. El propósito primario de los solventes es reducir la viscosidad de la resina.

Los aditivos cuando están presentes, pueden componer de 1 al 5% de la resina parte 1 y son usados para facilitar la extracción de corazón del herramental y ayudan en la resistencia a la humedad del corazón, principalmente <sup>[26]</sup>.

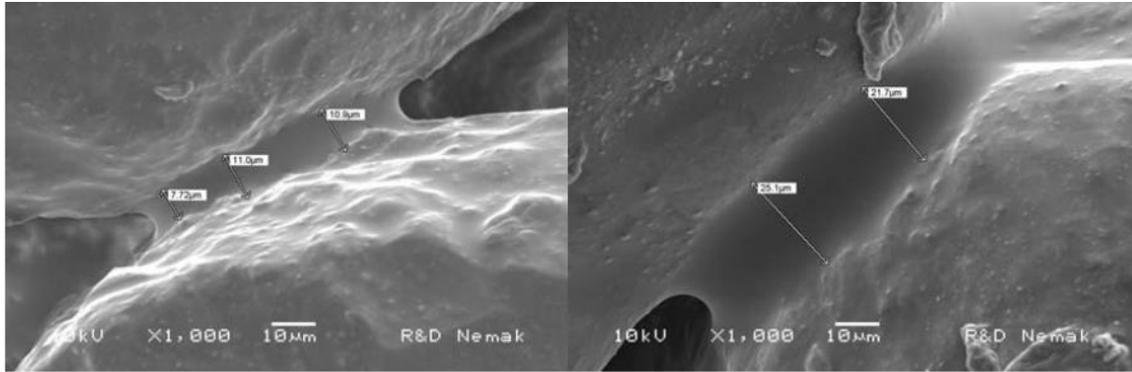
La resina parte 2 también puede dividirse en tres componentes: el isocianato, los solventes y aditivos. En la resina parte 2 los contenidos de isocianato pueden variar entre un 60 y un 80% dependiendo de las propiedades que se deseen. Los solventes en la parte 2 tienen las mismas funciones que en la parte 1, estos pueden comprender entre un 20 y un 40% de la resina parte número dos <sup>[26]</sup>. En el proceso de caja fría los aditivos utilizados en la parte 2 se emplean para mejorar la vida de banco, incrementar la resistencia a la humedad. Los aditivos pueden comprender de 1 al 10% de la parte 2 cuando se usan <sup>[15]</sup>.

El tercer componente de este sistema es una amina utilizada como catalizador. Como se mencionó anteriormente, las aminas más utilizadas en la industria de la fundición son la trietilamina (TEA), la dimetiletilamina (DMEA) la dimetilpropilamina (DMPA) y la dimetilisopropilamina (DMIPA) <sup>[21]</sup>.

En la figura No. 15 se muestra la reacción química entre la resina parte 1 y la resina parte 2 en presencia de la amina catalizadora para formar la resina sólida de poliuretano. Es este poliuretano es el que une a los granos de arena y le da al proceso fenólico uretánico sus características. El tamaño del puente de poliuretano que une los granos de arena dependerá directamente del contenido de resina que se utiliza para fabricar los corazones. Ver Figura No. 16.



**Figura No. 15. Reacción para el proceso fenólico uretánico (CB) <sup>[20]</sup>.**



**Figura No.16. Efecto del contenido de resina sobre la puente de unión entre los granos de arena con 0.8% de resina (izquierda) y 1.3% de resina (derecha) <sup>[27]</sup>.**

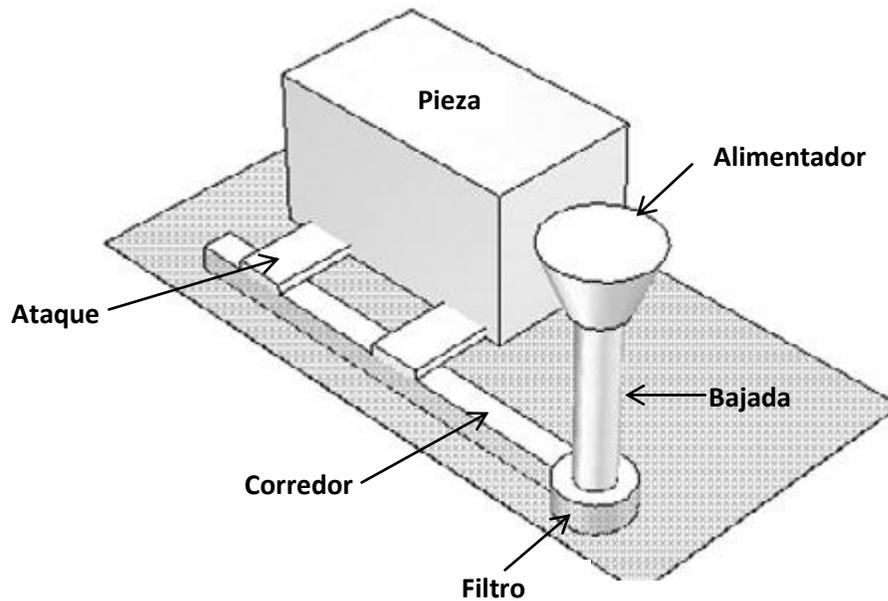
### **2.31. Diseño de coladas**

En el proceso de llenado por gravedad, el diseño del sistema de alimentación o colada se vuelve crucial ya que el conjunto de canales o conductos por donde viaja el metal líquido pueden ser los responsables del daño que puede llegar a tener el producto terminado.

Adicionalmente, si el material a utilizar en la fabricación de las piezas es considerado sensible al daño, entonces el proceso se vuelve más crítico. Esto sucede con el aluminio y sus aleaciones empleadas en el proceso de fundición.

Es por esto que se deben de considerar principalmente todos los fenómenos que intervienen en el proceso, como la transferencia de calor, la gravedad, la solidificación, etc. Todo esto con el objetivo de lograr un buen diseño de colada y como consecuencia, piezas vaciadas con un mínimo de defectos de solidificación.

Un esquema de un sistema de colada se presenta a continuación:



**Figura No.17. Componentes básicos de un sistema de llenado de un molde**

La secuencia de cálculos en el diseño del sistema de llenado implica los siguientes pasos:

- Establecer el tiempo óptimo de llenado
- Calcular el área de estrangulamiento
- Seleccionar el área de llenado

El tiempo de llenado se calcula con las ecuaciones empíricas que se pueden expresar en una forma general como:

$$T_{pour} = k_{size} m_{cast}^n$$

Donde el  $k_{size}$  es un factor que depende de tamaño de la sección o el peso de colada y de la naturaleza del molde,  $m_{cast}$  es la masa de metal que se vierte, y  $n$  es un coeficiente. Los factores y coeficientes de esta ecuación son valores empíricos disponibles en tablas o gráficos. La zona de estrangulamiento es el área que más limita la velocidad de vaciado. Para calcularla es primero necesario expresar el tiempo de llenado del molde como una función de la zona de estrangulamiento. Esto dependerá de la posición de la pieza de fundición

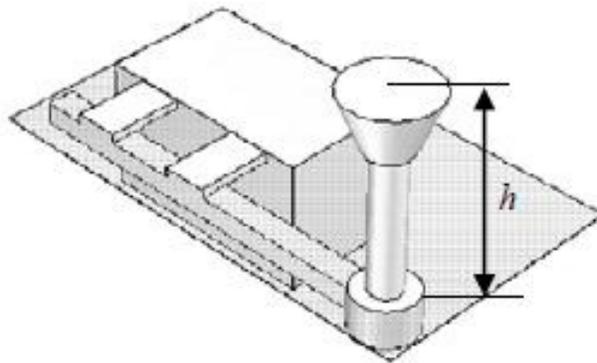
con respecto a la línea de partición (ver Figura 17 y la Figura 18). Si el área de estrangulación está en la base del alimentador y en la caja inferior (figura 18), el tiempo de llenado se puede calcular como:

$$t_{pour} = \frac{V}{Q} = \frac{m_{cast}/\rho}{AV} = \frac{m_{cast}}{A\rho C\sqrt{2gh}}$$

Donde V es el volumen de metal que se vierte, A es el área de la sección transversal de la base del canal de colada (zona de estrangulación), y C es el factor de eficiencia del sistema de llenado.

Cuando se ignora la fricción en el sistema de llenado C=1. Entonces, se calcula el área de estrangulación como:

$$A_{ch} = \frac{m_{cast}}{\rho t_{pour}\sqrt{2gh}}$$



**Figura No.18. Posible posición de llenado del molde.**

El siguiente paso es la selección de la relación de llenado, que es la relación entre el área del canal de colada, del corredor, y de los alimentadores, que es:  $A_{sp}: A_{run}: A_{ing}$ .

Basados en estos valores relativos de estos tres componentes, los sistemas pueden ser clasificados en dos categorías: (i) sistemas presurizados con  $A_{sp} > A_{run} > A_{ing}$ , donde el metal entra en el molde a alta velocidad; y (ii) los

sistemas no- presurizados con  $A_{sp} < A_{run} < A_{ing}$ , en el que los pasajes no están completamente llenos y la turbulencia y efectos de aspiración son posibles. Algunos ejemplos de relaciones de llenado típicos son los siguientes: para el acero: 1:2:1.5 o 01:3:3; para fundición gris: 01:04:04; para hierro dúctil: 4:8:3; para aluminio: 1:2:4.

Una colada presurizada es recomendada para el llenado de piezas de aluminio por la alta sensibilidad de estas aleaciones a formar óxidos y atrapar otros contaminantes. El estrangulamiento localizado al final del bastón, regula el flujo, causa que el bastón se termine de llenar rápidamente y al mismo tiempo se eliminan las posibilidades de alojamiento del aire antes del estrangulamiento. De esta forma se reduce la velocidad del metal en el sistema. El incrementar el área del canal permite que la velocidad se reduzca más y las inclusiones presentes floten y permanezcan en la parte superior del canal.

El cálculo correcto del sistema de llenado no garantiza una pieza sin defectos, el diseño del sistema de llenado puede contribuir significativamente a la solución del problema. Desafortunadamente, la calidad del diseño es proporcional a la experiencia del diseñador. La simulación del llenado del molde a través de la modelación numérica puede aumentar significativamente las posibilidades para un diseño exitoso, ya que permiten la visualización del llenado del molde y la corrección de los problemas locales a través de rediseño.

## **2.32. Corrosión en aguas residuales**

### **Agua residual.**

Son las aguas que se descargan al alcantarillado después de haber sido usadas en instalaciones domiciliarias o algún tipo de proceso, o producidas por éste, y que no tienen ningún valor inmediato para este proceso.

Las aguas residuales se dividen en municipales e industriales, las aguas residuales municipales son las generadas en nuestras casas, en el lugar de

trabajo y en los lugares públicos; se descargan a los sistemas municipales de alcantarillado, en cuanto a las industriales son las que como su nombre indica son desechadas por actividades que se llevan a cabo en estos lugares. Actualmente cada vez más empresas descargan sus aguas residuales en el alcantarillado municipal, representando un grave problema porque esas aguas tienen un alto contenido de metales pesados y sustancias químicas.

Las aguas residuales se componen de diversos constituyentes de tipo físico, químico y biológico que se encuentran en suspensión o en disolución y que son de tipo orgánico e inorgánico. Casi la mayor parte de la materia orgánica, que se encuentra en ellas, está constituida por residuos de alimentos, excretas, sales minerales, material vegetal y materiales diversos como jabones y detergentes sintéticos.<sup>[33]</sup>

Se estima que la fracción orgánica es el principal constituyente y que corresponde hasta el 70% de la materia sólida presente y el 30% restante es fracción inorgánica.

En la siguiente tabla se muestra la composición de las aguas residuales domesticas según varios autores.

**Tabla No. 2.5. Compuestos orgánicos presentes en aguas residuales domésticas en valores porcentuales<sup>[33]</sup>.**

Compuesto orgánico	Scotti (1968)	Tebbutt (1977)	Metcalf& Eddy (1995)
<b>Proteínas</b>	40	65	40-60
<b>Carbohidratos</b>	50	25	25-60
<b>Lípidos</b>	10	10	10

Entre las proteínas comúnmente presentes están las globulinas, enzimas y las albúminas resultantes de la misma actividad bacteriana. Los carbohidratos están representados por celulosa, sacarosa, almidón, y glucosa, entre otros, y las grasas animales y los aceites provienen de restos de carnes, uso de aceites y otros productos<sup>32</sup>.

### 2.33. Aguas residuales domesticas

El estudio de aguas residuales domésticas (ARD) en reactores prototipo y a nivel de laboratorio, es difícil debido a diversas razones entre las que se cuentan: dificultad de transporte de grandes muestras para ser llevadas al laboratorio para alimentar los reactores, variabilidad en las características fisicoquímicas y bacteriológicas de las aguas residuales crudas y peligrosidad en la manipulación del agua residual doméstica por la presencia de microorganismo patógenos.

Aunque algunos sustratos sintéticos para preparar ARD han sido propuestos, éstos presentan, relativamente, un alto nivel de dificultad en su preparación y, además, exceso de constituyentes.

Por este motivo diversos autores han propuesto sustratos sintéticos de preparación sencilla y con ingredientes comunes de fácil obtención, para la composición de un agua residual sintética (ARS), que presente características similares a las del ARD, pero con carga nula de organismos patógenos.

Torres et al. (1996) considerando las recomendaciones de Vazoller (1988) y de Touzel y Albagnac (1983) propusieron el sustrato sintético que se muestra en la tabla No. 3.3.

**Tabla No. 2.6. Composición del sustrato sintético propuesto por Torres et al. (1996) para preparar agua residual sintética.**

Componente	Cantidad
	Fracción orgánica
Extracto de carne (peptona)	50%
Sacarosa	24%
Almidón	8%
Celulosa	8%
Aceite de soya	10%
$K_2HPO_4$	Macronutrientes
NaCl	28.8 mg/L
$MgCl_2 \cdot 6H_2O$	250 mg/L
	7 mg/L

CaCl <sub>2</sub> -2H <sub>2</sub> O		4.5 mg/L
FeSO <sub>4</sub> -7H <sub>2</sub> O		200 mg/L
CaCO <sub>3</sub>		120 mg/L
Na <sub>2</sub> S		30 mg/L
<b>Micronutrientes</b>		
Ácido Nitrilotriacético		12.8 mg/L
FeCl <sub>3</sub> -6H <sub>2</sub> O		1.35 mg/L
MnCl <sub>2</sub> -4H <sub>2</sub> O		0.1 mg/L
CoCl-6H <sub>2</sub> O		0.024 mg/L
CaCl-2H <sub>2</sub> O		0.1 mg/L
ZnCl anhidro		0.1 mg/L
CuCl-2H <sub>2</sub> O		0.025 mg/L
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>		0.01 mg/L
Molibdato de sodio hidratado		0.024 mg/L
Na <sub>2</sub> SeO <sub>3</sub> -5H <sub>2</sub> O		0.026 mg/L
NiCl <sub>2</sub> -6H <sub>2</sub> O		0.12 mg/L

Otros sustratos más simples han sido propuestos por la Universidad de Valencia, España (2000) que se muestra en la tabla No. 3.4 y por la Norma Alemana DIN 38412, mostrado en la tabla No. 3.5.

**Tabla No. 2.7. Composición del sustrato sintético propuesto por la U. de Valencia (2000) para preparar agua residual sintética <sup>[34]</sup>.**

<b>Componente</b>	<b>Cantidad (mg/L)</b>
Gelatina	34
Almidón	171
Leche en polvo	102
Jabón de tocador	3
MgSO <sub>4</sub> -7H <sub>2</sub> O	3
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	44.5
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	74.2
NaHCO <sub>3</sub>	150

### **2.34. Aguas residuales en México**

La calidad ambiental tiene que ver mucho con la escasez, con la demanda, con el uso del agua, pero también tiene que ver de manera muy importante con las características propias de nuestro país, estas son únicas en esa variabilidad fisiográfica y climática que tenemos y todo esto tiene que ver con la disponibilidad real más que con la disponibilidad teórica de agua en el país.

En términos de los usos del agua en el país, anualmente se utilizan 72 millones de m<sup>3</sup>. De estos el 78% lo usa la agricultura, el uso público urbano, el uso pecuario y la industria consumen el otro 28%.

En términos de aguas residuales, en México se generan alrededor de 420 m<sup>3</sup> cada segundo, de estas las municipales generan 250 m<sup>3</sup> y las no municipales generan el resto (170 m<sup>3</sup>/s). Los giros industriales que generan mayor cantidad en volumen con la acuicultura, la industria del azúcar, la industria del petróleo, la industria química y otros servicios.

Por otra parte, los servicios públicos generan aguas residuales que nos afectan cuando son aguas sin tratar y aparecen organismos que pueden parasitar y crearnos otro tipo de problemas asociados a la salud pública.

Como se mencionó anteriormente la calidad ambiental de las aguas de nuestro país está influenciada por diversos factores, por lo que debido a las diferentes actividades que se desarrollan en cada zona podemos encontrar sustancias tales como; sales arsenicales, algunas otras sales como lo son el Flúor, Nitratos o sólidos disueltos totales, metales pesados y otros compuestos como el Ba, Cr, Fe, Hg, Zn, Al, Ni, Pb, As, Cd, Cianuro de forma sostenida y de manera muy esporádica Cloroetileno, Dibutilftalato, Formaldehído, Cloruro de metileno, Fenol, Piridina y Cloroformo<sup>[33]</sup>.

Po otro lado, de acuerdo con la consulta en la fuente Gómez, B. A, 2002. Evaluación Económica del impacto Ambiental de las descargas de aguas

residuales. La composición de las aguas residuales en nuestro país es la siguiente:

**Tabla No. 2.8. Composición de agua residual en México <sup>[34]</sup>.**

Parámetro	Rango de concentración
pH	6.5-7.5
Temperatura(°C)	20-22
DBO(mg/L)	250-270
DQO(mg/L)	500-530
Sólidos disueltos totales(mg/L)	700-800
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	450-500
Grasas y aceites (mg/L)	75-80
N-total (mg/L)	38-42
N-NH <sup>4</sup> (mg/L)	23-26
N-orgánico (mg/L)	14-18
P-total (mg/L)	4-15
P-orgánico (mg/)	3-10
P-inorgánico (mg/L)	3-10
Cloruros	30-100
Sulfatos	20-50
Alcalinidad	50-200
SAAM-Detergentes	12-16
Coliformes totales NPM/100ml	$100 \times 10^7 - 100 \times 10^8$

### 2.35. Corrosión del aluminio.

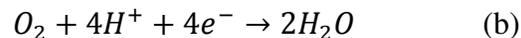
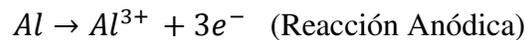
El aluminio es un metal que al entrar en contacto con el aire, forma espontáneamente por oxidación directa una delgada, amorfa, tenaz, compacta e inerte (pasiva) película de óxido natural (alúmina,  $Al_2O_3$ ), que le proporciona protección al aluminio base. El espesor de esta película puede variar entre 40 y 100Å según las condiciones de formación. Esta película suele componerse a su vez de dos subcapas: una subcapa más compacta (capa barrera) más próxima al aluminio base (20- 25Å), y otra subcapa más externa y permeable de bohemita ( $Al_2O_3 \cdot H_2O$ ) o bayerita ( $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ ) que crece lentamente en espesor con la humedad de la atmósfera <sup>[36, 37]</sup>.

Las propiedades de esta película natural de óxido dependen de la composición química de la aleación, de los tratamientos térmicos aplicados, etc.

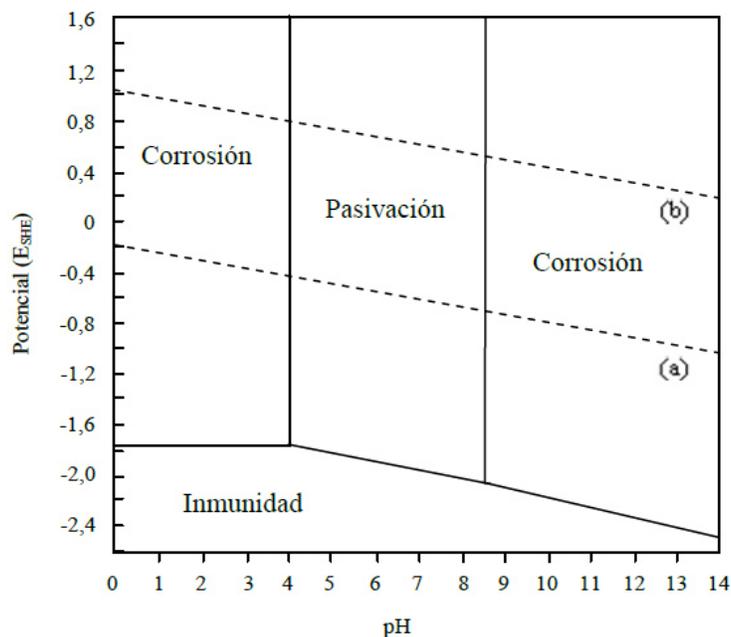
Esta película está muy adherida al aluminio base y es estable químicamente (inerte) en el intervalo de pH de 4 a 8,5. [37]

El fenómeno de corrosión metálica se define como el proceso de degradación de un metal por interacción con el medio ambiente que lo rodea. El aluminio es un metal anfótero que está sujeto a corrosión generalizada tanto en una solución fuertemente ácida como alcalina, según muestra el diagrama de Pourbaix de la Figura No. 19, donde se representa el valor de potencial frente a pH. Bajo estas condiciones el aluminio se encuentra fuera de su estado pasivo sufriendo un proceso de corrosión generalizada, dando lugar a cationes  $Al^{3+}$  inicialmente y aniones  $AlO_2^-$  posteriormente. [38]

Las líneas punteadas (a) y (b) de este diagrama, muestran el equilibrio de desprendimiento de hidrógeno y de descomposición del agua respectivamente:



Para el resto de valores de pH (intervalo de 4 a 8.5) el aluminio mantiene una estabilidad termodinámica de su capa de óxido de naturaleza protectora. Factores como la temperatura, la presencia de agentes en el medio (iones agresivos, etc.) las características de la película de óxido, que puedan formar sales complejas solubles o insolubles con el aluminio, pueden alterar la estabilidad de esta capa pasiva. Bajo estas circunstancias, el proceso de corrosión por picadura es el más importante que puede sufrir el aluminio, rompiéndose la capa de óxido superficial tras sufrir un ataque localizado en un área más específica.



**Figura No.19. Diagrama de Pourbaix del aluminio en términos de corrosión, inmunidad y pasivación a 25°C. Valores de equilibrio para la reacción de desprendimiento de hidrógeno (a) y para la reacción de descomposición del agua (b).**

La actuación de aniones  $\text{Cl}^-$  (iones agresivos) como el daño por medios mecánicos pueden ser motivos de ruptura de la película de óxido. La reparación de esta capa protectora puede ser instantánea, dependiendo de la naturaleza del ambiente, y puede estar acompañada bien de la reacción de reducción del oxígeno, o bien de la reacción de producción del hidrógeno.

La reacción de corrosión conduce a la formación de óxidos/hidróxidos de aluminio, edificando sobre el metal una película de óxido con presencia de defectos, los cuales pueden actuar como nuevos sitios de nucleación para la formación de picaduras, con la consiguiente ruptura de la película pasiva [39,40]. Este nuevo escenario indicaría la formación y repasivación de defectos, en competencia con los iones agresivos del medio que dificultan el proceso de repasivación promoviendo picaduras. Por lo tanto, la ruptura de la capa pasiva podría ocurrir mediante:

- a) Mediante un descenso local del pH a valores tan bajos que rompiera la base del defecto y dejara expuesto el aluminio base
  - b) La penetración de iones agresivos a la base de los defectos, bien en forma de iones complejos de corta vida, o bien por el desarrollo de islas de sales ( $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) que sufran una disolución posterior.
- [41]

El primer mecanismo mencionado es el más aceptado para justificar el proceso de corrosión por picadura del aluminio.

Para proteger al aluminio y su aleaciones frente al riesgo de corrosión (uniforme o localizada), se acude principalmente a dos tecnologías de protección anticorrosiva: recubrimientos orgánicos protectores y tratamientos de anodizado.

### **2.36. Inhibidores de la corrosión.**

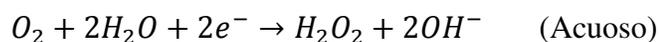
Los inhibidores de corrosión se pueden clasificar de diversos modos: por su composición química, por su mecanismo, por su aplicación y por el proceso parcial que interfieren <sup>[42]</sup>. Si se atiende al proceso en el cual interfieren, se pueden clasificar nuevamente en:

- Inhibidores catódicos. Suelen ser cationes que actúan interfiriendo la reacción catódica y normalmente forman capas protectoras sobre zonas catódicas activas. Son capaces de proteger a bajas concentraciones, aunque su poder de inhibición es menor que el de los inhibidores anódicos, por lo que son buenos inhibidores en ataques localizados. Algunos ejemplos son las sales de magnesio, zinc, níquel, cerio, etc.
- Inhibidores anódicos. Suelen ser aniones (muchos de ellos de carácter básico) que actúan interfiriendo la reacción anódica. Se necesita mayor cantidad para ejercer cierto grado de inhibición, ya que en pequeñas cantidades pueden provocar un ataque localizado y más intenso que en ausencia de inhibidor. Como ejemplos importantes destacan los fosfatos, molibdatos, cromatos, nitritos, etc.

- Inhibidores mixtos. Suelen ser compuestos orgánicos que actúan interfiriendo tanto en la reacción anódica como en la catódica.

### **Cationes $\text{Ca}^{2+}$ .**

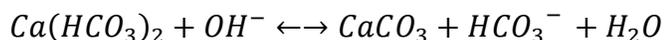
Una gran cantidad de metales catiónicos ( $\text{Mn}^{+}$ ) se comportan como inhibidores catódicos de la corrosión, ya que su presencia en forma hidróxido ( $\text{M}(\text{OH})_n$ ) les permite tener una baja solubilidad relativa <sup>[43]</sup>. La reacción de reducción de oxígeno (ORR) puede ocurrir con la intervención de 2 ó 4 electrones:



La predominancia de una de las reacciones frente a la otra dependerá de la composición del sustrato metálico y de la presencia o ausencia de una capa de óxido en la superficie <sup>[44]</sup>.

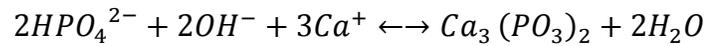
Un ejemplo es el Ce, ya que las propiedades inhibidoras mostradas por sales de este elemento sobre AA7075-T6 han despertado un especial interés en la última década <sup>[44]</sup>. Otro ejemplo es el catión  $\text{Zn}^{2+}$ , el cual ha sido ampliamente utilizado como inhibidor catódico por la precipitación de óxidos e hidróxidos de zinc sobre la superficie metálica <sup>[45]</sup>. El  $\text{Zn}^{2+}$  también suele utilizarse en combinación con otros compuestos, como fosfatos <sup>[46]</sup>.

En cuanto al poder de inhibición del calcio, el bicarbonato de calcio puede precipitar formando carbonato calcio en presencia de soluciones alcalinas:



Estos precipitados dificultan la difusión de oxígeno hacia la superficie metálica <sup>[45]</sup>. Sin embargo, el calcio no suele utilizarse por sí solo como inhibidor, sino que está combinado con otros compuestos (ortofosfatos o

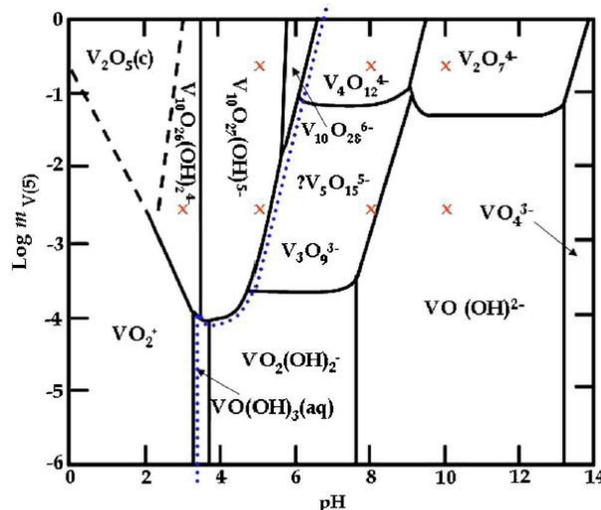
polifosfatos). La inhibición de la reacción catódica se produce por la precipitación de fosfato de calcio poco soluble [45]:



### Aniones Vanadato.

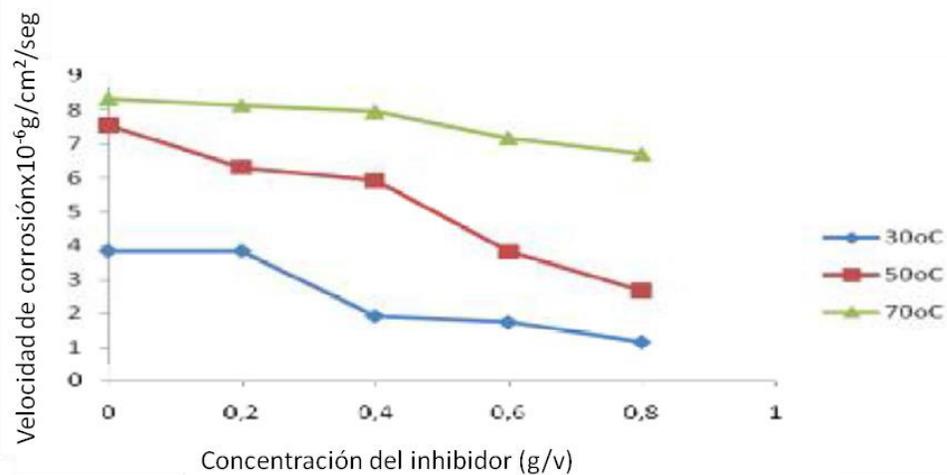
Desde el punto de vista de anticorrosivo, diferentes aniones han sido estudiados: molibdatos, silicatos, fosfatos [47]. Los vanadatos proporcionan buena inhibición para el aluminio comparados con otros compuestos [48]. En este estudio se comprobó que en solución acuosa a pH neutro y básico, estos compuestos alcanzaban un comportamiento anticorrosivo parecido a los cromatos, mientras que a pH ácido no mostraron un buen comportamiento anticorrosivo.

Las propiedades inhibidoras que ejercen estos aniones sobre un sustrato metálico son debidas principalmente a la especiación que presentan estos compuestos, la cual es función del pH y concentración, como muestra el diagrama de equilibrio de las especies  $V^{5+} - OH^-$  de la Figura No.20.



**Figura No. 20. Diagrama de equilibrio de la predominancia de especies  $V^{5+}-OH^-$  en función de la concentración y del pH. La línea punteada delimita las especies coordinadas octaédricamente (izquierda) y tetraédricamente (derecha) [50].**

Un ejemplo de un inhibidor orgánico se presenta en la investigación realizada por Mohammed y colaboradores, [49] estudiando la presencia del aceite del *Cyperus esculentus* como un inhibidor eficaz para la corrosión en la Aleación Al-Si-Mg A356.0, esto usando el método gravimétrico. Se estudiaron velocidades de corrosión en diferentes concentraciones del inhibidor (0.2, 0.4, 0.6, y 0.8 g / v) a temperaturas de 30, 50 y 70°C, mostrando una eficiencia de hasta 69.97% a la temperatura de 30°C y la menor eficiencia del inhibidor a 70°C, mostrando así que esta disminuye a medida que aumenta la temperatura. Por otro lado se obtuvieron mejores resultados con concentraciones de 0,8 g / V a la temperatura de 30°C y se observó que el aceite *Cyperus esculentus* actúa como un inhibidor de la corrosión de tipo mixto y las isothermas de adsorción de Langmuir fueron demostrados para esta aleación de aluminio con un factor de corrección de 0,9905. En la figura No. 21 se muestran los resultados obtenidos.



**Figura No. 21. Variación de la velocidad de corrosión con la concentración del inhibidor a diferentes temperaturas de operación para un tiempo de inmersión de 2h. [49]**

### 2.37. Desgaste en aleaciones de Aluminio

La resistencia al desgaste de un material está asociada a la facilidad o dificultad con la que pueden eliminarse partículas de su superficie. El proceso de desgaste está, por tanto, determinado por la formación de estas partículas

en la región del material situada inmediatamente por debajo de la superficie de contacto. Las propiedades mecánicas de cada material y las variables concretas de cada problema, como la carga aplicada, la temperatura, la velocidad relativa o la geometría de los cuerpos en contacto, condicionan el mecanismo de desgaste. Los mecanismos de desgaste típicos son:

- Desgaste por abrasión
- Desgaste por adherencia
- Fatiga superficial
- Trioxidación
- Corrosión

El desgaste en la mayoría de las aleaciones metálicas está controlado por procesos de deformación plástica que aproximadamente responden al modelo clásico de Archard, según el cual, cuando dos cuerpos deslizan uno sobre otro, el volumen desgastado es directamente proporcional a la distancia de deslizamiento y a la carga normal a la superficie de contacto, e inversamente proporcional a la dureza del material.

Varios investigadores han informado sobre el comportamiento de desgaste de las aleaciones de Al-Si <sup>[57-58,59-66]</sup>. Sin embargo, de estos informes, se ha observado que, sólo unos pocos de ellos han sido dedicados a investigar sistemáticamente el efecto de los contenidos de silicio en el desgaste y el comportamiento de fricción del aluminio.

Las propiedades de desgaste de estas aleaciones se han estudiado principalmente en las condiciones de deslizamiento en seco. Diversos autores han llevado a cabo una serie de experimentos en aleaciones de Al-Si mediante la variación del contenido de silicio <sup>[59-62]</sup>. Shivanath et al. <sup>[59]</sup> han encontrado que el aumento del contenido de silicio en la aleación condujo a un aumento de la resistencia al desgaste de aluminio, excepto en el caso de la composición eutéctica en donde se observó un aumento en la tasa de desgaste.

Sarkar <sup>[60]</sup>, Clarke y Sarkar <sup>[61]</sup> encontró que la resistencia al desgaste de las aleaciones Al-Si mejora con el contenido de silicio hasta la casi la composición eutéctica y las aleaciones hipereutécticas presentan más desgaste que las aleaciones hipoeutécticas. Pramila Bai y Biswas <sup>[62]</sup> sugiere que no hay tendencias sistemáticas en la resistencia al desgaste de las aleaciones Al-Si con respecto al contenido de silicio. Sin embargo, en el estudio de Eyre <sup>[63]</sup>, se sugiere que la superficie grabada de las aleaciones Al-Si expuestas presentan características anti-desgaste y anti-fricción. Esto podría ser debido a la fase de Si que sobresale en contacto con la superficie de contacto de acero, evitando de esta manera el contacto de la matriz y la superficie de contacto de aluminio.

Algunos otros estudios han demostrado que, el efecto de los elementos aleantes en la resistencia al desgaste de las aleaciones de Al-Si es debido al reforzamiento por solución sólida y al endurecimiento por precipitación <sup>[58,67-69]</sup>. Clegg y Das <sup>[70]</sup> estudiaron la influencia de la modificación estructural en la resistencia al desgaste de la aleación Hipereutéctica de Al-Si (LM - 30) mediante la realización de prueba de desgaste bajo dos diferentes cargas y distancias de deslizamiento mediante el uso de un pin en la máquina de ensayo de desgaste del anillo. Sugirieron que la modificación estructural de la aleación hipereutéctica de Al-Si no produce ninguna diferencia significativa en la resistencia al desgaste.

En otro estudio <sup>[57]</sup> las propiedades de desgaste de un pistón de Al-Si tratado térmicamente mostraron una mayor resistencia al desgaste en comparación con la condición no tratada. La literatura revela que aún no existe una información clara con respecto al papel del tamaño, la distribución y la cantidad de partículas de silicio en la resistencia al desgaste de las aleaciones de Al-Si.

Lozano y colaboradores <sup>[72]</sup> estudiaron el comportamiento tribológico de una aleación hipereutéctica Al-Si-Cu sometida al desgaste por deslizamiento; bajo diversas condiciones de carga, velocidades de deslizamiento y en presencia y ausencia de lubricante; obteniendo valores de coeficientes de

fricción similares a los hierros grises en condiciones de lubricación, además observaron que la resistencia al desgaste se ve mejorada por las pequeñas y bien dispersas partículas de aluminio distribuidas en la matriz de aluminio. En la Figura No. 22 se presenta una imagen obtenida en el Microscopio Electrónico de Barrido, de una de las muestras de esta investigación, donde se puede observar que el mecanismo de desgaste en esta condición fue principalmente por mecanismo de abrasivo severo.

S.A. Kori y T.M. Chandrashekharaiah<sup>[30]</sup> realizaron un análisis sobre el comportamiento al desgaste en condiciones no lubricadas para aleaciones Al-Si hipoeutécticas y eutéctica, estudiando el efecto del refinador y modificador de grano, utilizando una máquina de pin on disk. Se variaron condiciones de trabajo, como la composición química; en el caso de las aleaciones hipoeutécticas fueron (Al- 0.2, 2, 3, 4, 5 y 7Si) y en la eutéctica (Al- 12), velocidades de deslizamiento, distancia de deslizamiento y presión normal. Obteniendo como resultados que la resistencia al desgaste de estas aleaciones aumentaron con la adición del refinador y modificador en comparación de cuando estos no eran agregados, mejorando con dicha adición una mejora en las propiedades mecánicas y tribológicas del sistema, debido a un cambio en la microestructura de dendritas columnares gruesas a dendritas equiaxiales finas, así como el cambio del Si eutéctico de placas a partículas finas, esto como consecuencia de la adición de Al-Ti -B refinador de grano y modificador(Sr), respectivamente.

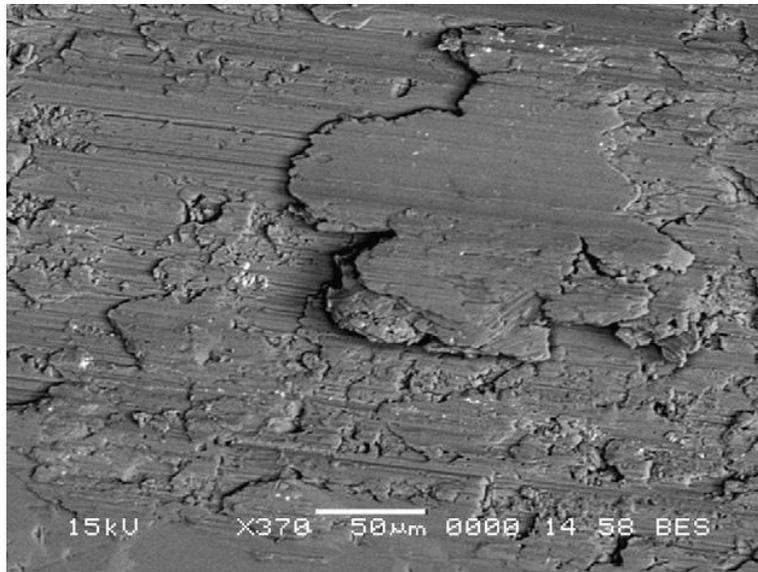


Figura No. 22. Imagen MEB de la muestra n. 4 (condición sin lubricar).<sup>[72]</sup>

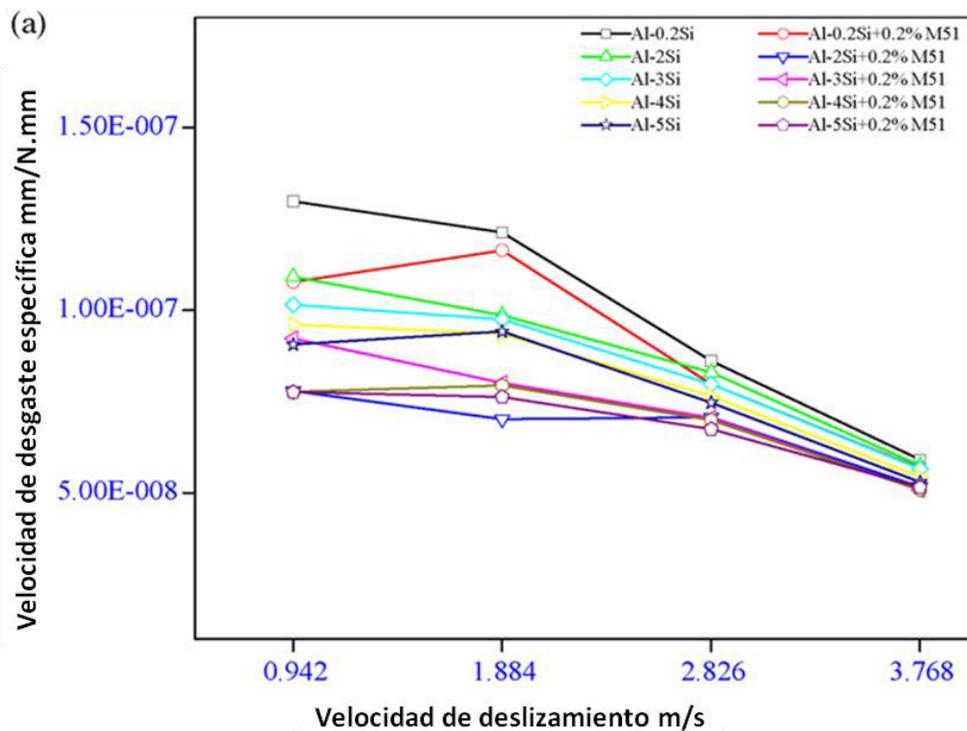
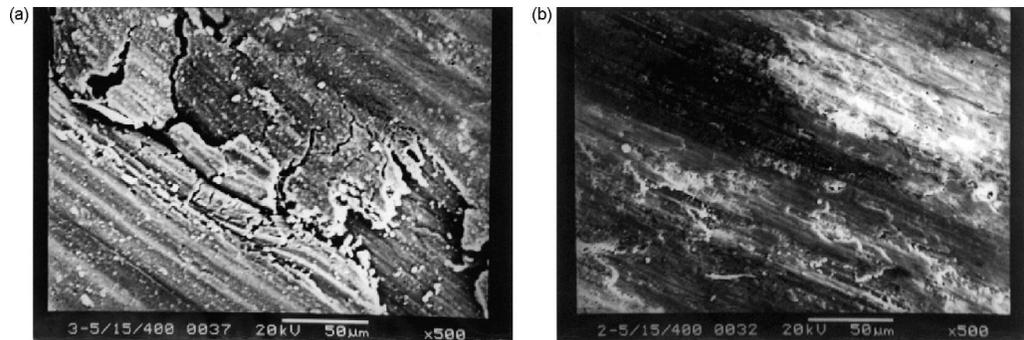
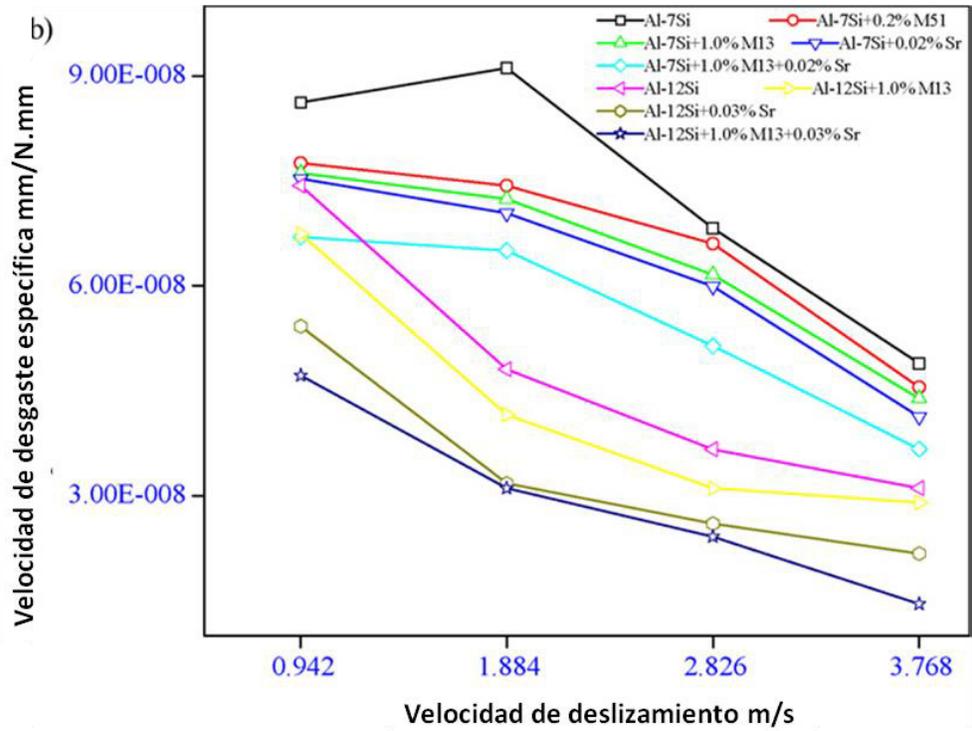


Figura No. 23. Muestra el efecto de la velocidad de deslizamiento en la velocidad de desgaste específica: (a) Al-0.2 a aleaciones 5Si, (b) 7 y aleaciones 12Si.<sup>[30]</sup>



**Figura No.24. Muestra las microfotografías obtenidas por MEB de superficies desgastadas, de aleación de Al-0.2Si después de prueba de desgaste: (a) sin refinador de grano que muestra desgaste adhesivo y desgaste por delaminación, (b) con 0,2% de aleación principal M51 mostrando desgaste adhesivo. [30]**

# Capítulo 3.

## Experimentación

El presente capítulo describe el desarrollo experimental de este proyecto, en esta parte se llevó a cabo las simulaciones en el software comercial ProCast, proceso de moldeo y vaciado de la aleación seleccionada, la caracterización microestructural utilizando microscopía óptica. A su vez se realizaron los estudios de corrosión de la aleación seleccionada. En el siguiente diagrama se muestra el programa experimental global de este trabajo.

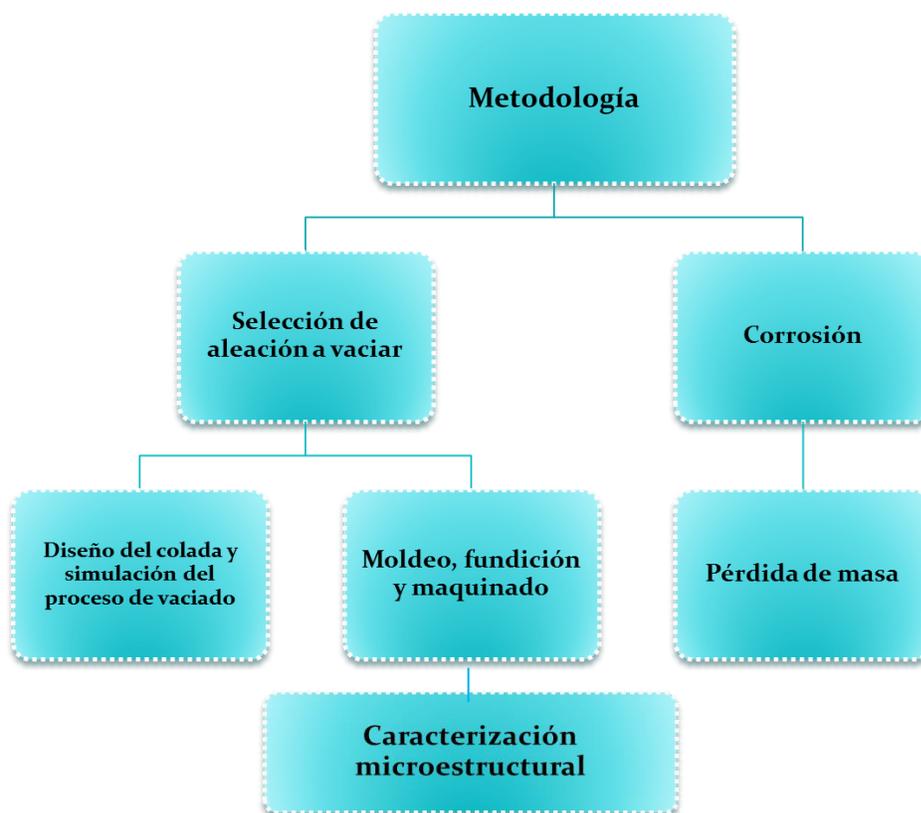


Figura No. 3.1. Programa experimental global

### **3.1. Cálculo del sistema de llenado y alimentación.**

Una vez obtenidas las dimensiones de cada una de los componentes para la carcasa del robot, estas fueron ensambladas para formar la pieza completa. Ya una vez que se obtuvo el diseño de este ensamble, se procedió al cálculo de diseño de colada siguiendo la Norma AFS.

### **3.2. Simulación.**

El uso de simulaciones por computadora permite un mejor análisis sobre el comportamiento de las piezas a vaciar, evitar elevados costos de la experimentación (prueba y error), proporcionando además un beneficio de ahorro en tiempo. Sin embargo para que los programas de simulación cumplan con los objetivos de la aplicación de las piezas, deben conocerse varios requisitos de información que definan un modelo de simulación representativa de la pieza y el proceso real a estudiar cómo son las variantes en la composición química, sistemas de enfriamientos, temperaturas de molde, etc.

Una vez realizado el cálculo del sistema de alimentación se utilizó el software de simulación ProCast por medio de parámetros de entrada (condiciones frontera) puntuales, tales como temperatura de vaciado, temperaturas iniciales de los componentes (aluminio, corazones de arena, enfriamientos, chills, etc.), flujo y duración de enfriamientos, tiempos del ciclo (tiempos de llenado), definición de materiales (aleaciones), se obtiene el cálculo matemático, arrojando resultados del fenómeno de llenado y solidificación. En un proceso de fundición todos los parámetros de proceso tienen un efecto en la sanidad de la pieza, por lo que se tiene la necesidad de definir los rangos de los parámetros de proceso con los cuales el personal debe trabajar para obtener piezas libres de defectos. Y una vez obtenidos los primeros resultados se procedió a optimizar el proceso.

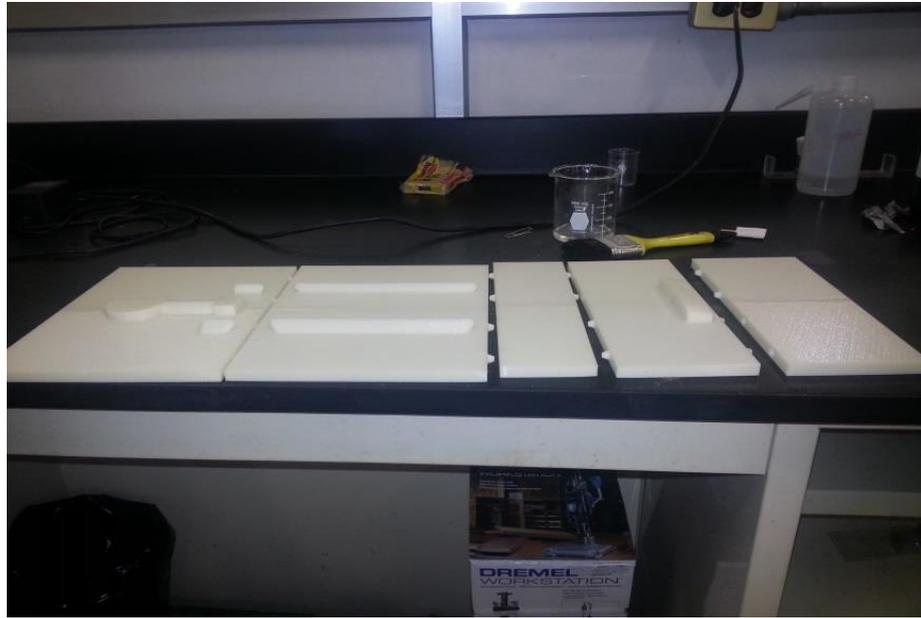
Para la simulación de la carcasa del robot se insertaron varios valores al software para llevar a cabo la simulación del vaciado y solidificación de la pieza, dichos valores se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 3.1. Condiciones necesarias requeridas para el proceso de llenado en ProCast**

<b>Parámetros</b>	<b>Características</b>	<b>Temperatura °C</b>
<b>Aluminio</b>	Densidad 2.7 gr/cm <sup>3</sup>	750
<b>Molde</b>	Arena Silica	30
<b>Filtro</b>	Filtro bajo	30
<b>Enfriamiento</b>	Aire	30
<b>Tiempo</b>	30 segundos	—
<b>Gravedad</b>	Eje Y (-)	—

### **3.3. Moldeo**

De los resultados obtenidos en el proceso de simulación se llevó a cabo la elaboración de las piezas a vaciar, primeramente se procedió a la fabricación del modelo a replicar, utilizando prototipado rápido con ABS (acrilonitrilo butadieno-estireno), obteniéndose el corazón, los laterales y el piso, Figura No. 3.2. Por las dimensiones de impresión de la prototipadora, se tuvieron que imprimir las piezas por partes y una vez obtenidas se procedió a pegar utilizando una mezcla de cloruro de metileno y tricloroetileno como se muestra en la Figura No. 3.3, y posteriormente se pulió la superficie un poco para evitar cualquier defecto que presentarán las piezas por la impresión. Una vez hecho esto se cubrió la superficie con un primer que actúa como base de relleno y a continuación se recubrió dicha superficie con una pintura epóxica, Figura No. 3.4, esto con la finalidad de que el modelo no reaccionará con la resina, ocasionando algún daño en la integridad del mismo. Ya realizado este proceso en cada una de los componentes se procedió al proceso de moldeo.



**Figura No. 3.2. Prototipado del piso del robot**



**Figura No. 3.3. Pegado de las piezas de prototipado de ABS con cloruro de metileno y tricloroetileno.**



**Figura No. 3.4. Modelos laterales de la carcasa después de haber sido pulidos y cubiertos con el primer.**

Para la elaboración de los moldes se utilizaron dos métodos que son ampliamente utilizados en la industria de la fundición; el primero fue el método de silicato de sodio con soplo de  $\text{CO}_2$  y el segundo fue el sistema de aglutinación fenólico uretánico amina.

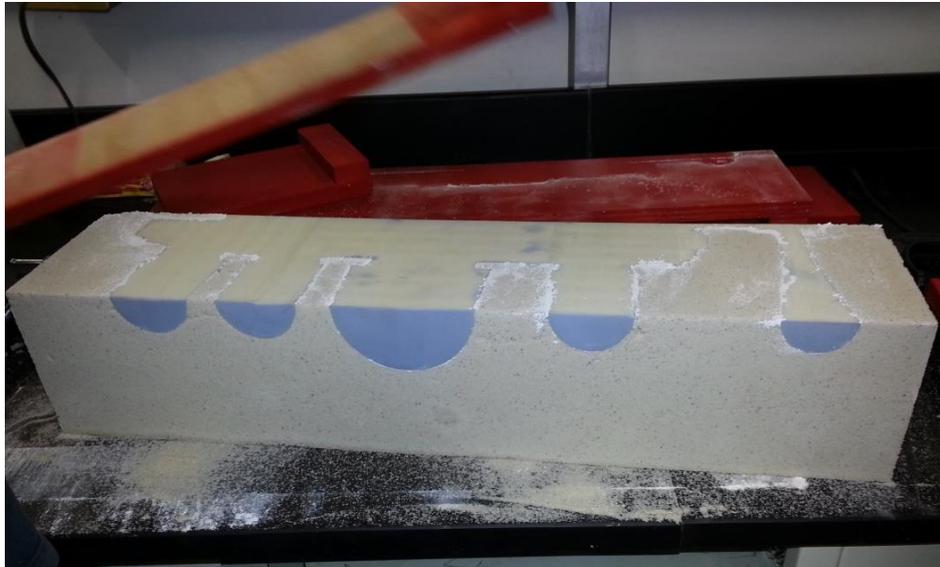
Para el primer método se pesaron las cantidades de arena necesaria para cada componente y se adicionó el silicato de sodio; en este caso se utilizó el 2% en peso en relación con la arena; una vez obtenidas estas cantidades, se procedió al mezclado con ayuda de una batidora hasta que la mezcla fuera uniforme, este proceso es mostrado en la Figura No 3.5. Posteriormente se vació la mezcla a las cajas de madera donde fueron colocados los modelos y se apisono de manera manual. Ya completamente llenas estas cajas, se inició el soplo de  $\text{CO}_2$  a través de diversos orificios (Figura No 3.6) que tenía la madera mediante un tubo conectado a un cilindro que contenía el mencionado gas. Terminado el soplo de  $\text{CO}_2$  se dejó reposar el molde unos minutos y se abrieron, obteniéndose con así los moldes de arena de la pieza a vaciar, ver Figura No. 3.7.



**Figura No. 3.5. Pesaje y mezcla de la arena para el proceso Silicato de Sodio- CO<sub>2</sub>.**



**Figura No. 3.6. Soplo de CO<sub>2</sub> a los moldes.**



**Figura No. 3.7. Molde obtenido por Proceso de Silicato de Sodio-  
CO<sub>2</sub>.**

El segundo método utilizado fue el del sistema fenólico, para llevar a cabo la elaboración de los moldes se utilizan dos resinas y un catalizador, la relación de las resinas es del 1.3% en peso de la arena y la relación que guardan entre ellas de 50/50, cabe mencionar que el catalizador se utilizó al 3% en relación de la cantidad de la resina 1. De igual manera que en el método anterior se pesaron las cantidades de arena y resinas necesarias, ya al tener estas cantidades se comenzó a mezclar la resina 1 con el catalizador hasta tener una mezcla homogénea, que posteriormente fue adicionada a la arena; todo esto se llevó a cabo con la ayuda de una revoladora; y ya mojada la arena con la mezcla anteriormente mencionada se adiciono la segunda resina. Se continuó mezclando hasta que la arena estuviera empapada con ambas resinas y el catalizador, se vació a las cajas con los modelos cubiertos de talco como lubricante y se apisono manualmente. En las Figuras No. 3.8 y 3.9 podemos ver los moldes elaborados por este método, los cuales se dejaron reposar y se abrieron a los 20 minutos. Posteriormente fueron pintados con pintura refractaria base agua para mejorar acabado superficial de la pieza y se dejaron secar durante ocho horas, Figura No. 3.10.



**Figura No. 3.8. Obtención del corazón por el método de resina fenólica.**



**Figura No. 3.9. Molde lateral elaborado por el método de resina fenólica.**



**Figura No. 3.10. Laterales y corazón pintados con pintura refractaria base agua.**

#### **3.4. Fusión y vaciado de la pieza**

Ya obtenidos los moldes por ambos métodos, se tomaron dimensiones para colocar el corazón, que fue pegado al piso, posteriormente se pegó uno de los laterales y se colocaron el filtro y las mazarotas, se cerró el molde y se colocaron placas metálicas y contrapesos para evitar fugas del metal líquido, Figura No. 3.11. Realizado esto, como se seleccionó una aleación A356 se procedió a la fusión la aleación de Aluminio (composición química en la Tabla No. 3.2), para lo cual se utilizó un horno de gas (Figura No. 3.12), donde se adiciono la carga del aluminio en forma de lingotes, ya hecho el caldo de aluminio se prosiguió con el desgasificado con nitrógeno durante 15 minutos, así como la adición de las barras del modificador (estroncio) y refinador de grano (TiBAI). Durante todo el proceso se hizo medición de temperatura en varias ocasiones y el metal fue vaciado a 750°C, Figura No. 3.13.



**Figura No. 3.11. Cerrado del molde.**

Se dejó enfriar las piezas y ya obtenidas se limpiaron los excesos de arena. Se cortaron los sistemas de alimentación y las mazarotas, y se continuó con un maquinado de la carcasa del robot, para después realizar el ensamble de los componentes electrónicos y mecánicos del robot.

**Tabla No 3.2. Composición química de los lingotes de Aleación 356.**

<b>Aluminio 356</b>	
Silicio	7.0400%
Fierro	0.2613%
Cobre	0.0285%
Manganeso	0.0256%
Magnesio	0.3209%
Níquel	0.0056%
Cromo	0.0038%
Zinc	0.0271%
Plomo	0.0043%
Estaño	0.0016%
Titanio	0.0179%
Estroncio	<0.0001
Cadmio	<0.0001
Vanadio	0.0016%
Bismuto	0.0023%



**Figura 3.12. Horno de gas usado para fundición del aluminio.**



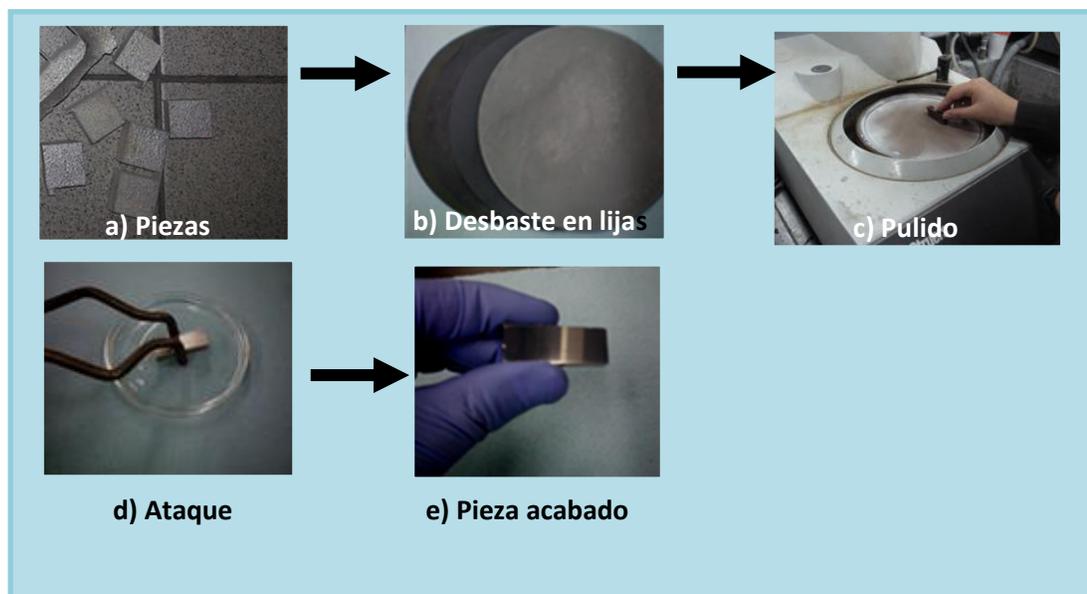
**Figura 3.13. Vaciado de la aleación de aluminio para la obtención de la carcasa del robot.**

### 3.5. Caracterización microestructural

#### 3.5.1. Preparación de las muestras

La preparación de las muestras de la aleación de aluminio por lo general consta de cinco etapas: toma de muestras, montaje en frío o en caliente, desbaste, pulido y ataque con un reactivo adecuado para revelar la microestructura. La selección de la ubicación de la prueba es muy importante para obtener resultados representativos del examen microestructural. Para el caso de la preparación de las muestras se cortaron probetas de las copas obtenidas durante la fundición de la aleación.

Se hizo análisis microestructural por microscopía óptica. En el siguiente diagrama (Figura No. 3.14) se muestra la secuencia de preparación de las muestras, para ambas técnicas se requiere de muestras con acabado espejo en su superficie.



**Figura No. 3.14. Secuencia de la preparación de las muestras de Aluminio 356 para análisis microscópico.**

Para obtener este acabado en las piezas, estas se pulieron con lijas de carburo de silicio con una granulometría de 220, 340, 500, 800, 1,200, 2,400 y 4000, posteriormente se le dio un acabado espejo mediante un pulido en paño con alúmina de 0.1 micras (figura No. 3.15).



**Figura No. 3.15. Pulido en paño con alúmina de 1 micra.**



**Figura 3.16. Microscopio óptico Nikon Ekiphot 460745.**

### 3.6. Corrosión

Para esta investigación se utilizó el sustrato sintético de la Norma Alemana DIN 38412 mostrado en la Tabla No. 3.5.

**Tabla No. 3.5. Composición del sustrato sintético propuesto por la Norma alemana DIN 38412 para preparar agua residual sintética <sup>[35]</sup>.**

Componente	Cantidad (mg/L)
Peptona	160
Extracto de carne	110
Úrea	30
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	28
MgSO <sub>4</sub> -7H <sub>2</sub> O	2
CaCl <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O	4
NaCl	7

#### 3.6.1. Técnicas para evaluar la corrosión

Se ha demostrado que la mejor forma de evaluar la resistencia a la corrosión con la que cuenta un elemento, es aquella en la que se pone a su ambiente de trabajo y después de un tiempo se evalúa la cantidad de corrosión que se generó. Desgraciadamente, este tipo de prueba no se utiliza ya que la inversión y el tiempo que se requiere es muy elevado, por lo tanto, se han generado diversos tipos de pruebas de menor tiempo. Entre estas técnicas se encuentran las mencionadas a continuación <sup>[10]</sup>:

- i. Cambio en las dimensiones de la pieza
- ii. Cantidad de resistencia eléctrica
- iii. Determinación de las características electroquímicas
- iv. Pérdida de peso en la pieza.

Para el desarrollo de esta investigación, la forma en la que la pieza pierde peso debido a la corrosión será nuestra técnica experimental, este tipo de prueba es la más utilizada en la actualidad debido a la sencillez para realizarla y a su gran eficacia. Esta técnica consiste en exponer la pieza en un

ambiente de prueba por cierto período de tiempo y después evaluar la cantidad de material que se pierde por la corrosión. El tiempo que se expone la pieza, el peso de la pieza, la densidad del material, la pérdida de peso, son algunos de los parámetros que se consideran para realizar esta prueba y obtener la cantidad de corrosión con la que cuenta la aleación.

Con el paso del tiempo, la forma de expresar la cantidad de corrosión que adquiere un elemento en un cierto período de tiempo se ha ido desarrollando, en la actualidad esta cantidad se expresa con las unidades mpy (mils per year) o en mm/y (milímetros por año) que expresan la cantidad de corrosión que penetra el material.

Para obtener estas unidades bajo el esquema de una prueba de corrosión por pérdida de peso se utiliza la siguiente ecuación:

$$\text{Velocidad de Corrosión} = \frac{K \times W}{A \times T \times D}$$

Dónde:

K= una constante

T= tiempo en exposición en horas

A= área en cm<sup>2</sup>

W=masa pérdida en gramos

D= densidad en gr/cm<sup>3</sup>

Existen diversos valores para la constante K, mostrados en la siguiente tabla:

**Tabla No. 3.6. Valores de la constante K**

<b>Velocidad de corrosión</b>	<b>Constante (K) en ecuación velocidad de corrosión</b>
Milésimas por año (mpy)	$3.45 \times 10^6$
Pulgadas por año (ipy)	$3.45 \times 10^3$
Pulgadas por mes (ipm)	$2.87 \times 10^2$
Milímetros por año (mm/y)	$8.76 \times 10^4$
Micrómetros por año (um/y)	$8.76 \times 10^7$
Picómetros por segundo (pm/s)	$2.78 \times 10^6$
Gramos por metro cuadrado por hora (g/m <sup>2</sup> ·h)	$1.00 \times 10^4 \times D$
Miligramos por decímetro cuadrado por día (mdd)	$2.40 \times 10^6 \times D$
Microgramo por metro cuadrado por segundo (μg/m <sup>2</sup> ·s)	$2.78 \times 10^6 \times D$

Algunas de las ventajas de esta técnica son:

- Puede realizarse inspección visual.
- La pérdida de peso se puede determinar fácilmente.
- Se puede aplicar en todos los ambientes (líquidos, gases y flujos con partículas sólidas).
- Los depósitos de incrustación pueden ser observados y analizados.

### **3.6.2. Preparación de probetas para la prueba de Corrosión por pérdida de masa.**

Para la realización de la prueba de corrosión por pérdida de masa, primeramente se elaboraron moldes de arena sílica con la finalidad de obtener tres placas de la aleación de aluminio, dicha fabricación de los moldes se hizo mediante el sistema fenólico uretánico amina, y una vez obtenidos se dejaron reposar. Posteriormente se hizo la preparación de la carga de la aleación, su respectiva fundición y vaciado en los moldes mencionados anteriormente. Una vez obtenidas estas placas, se cortaron con chorro de agua en pequeños cuadros, obteniéndose 25 cuadros en total, Figura No. 3.17.



**Figura No. 3.17 Placas de Aluminio cortadas para obtención de probetas para la prueba de Corrosión.**

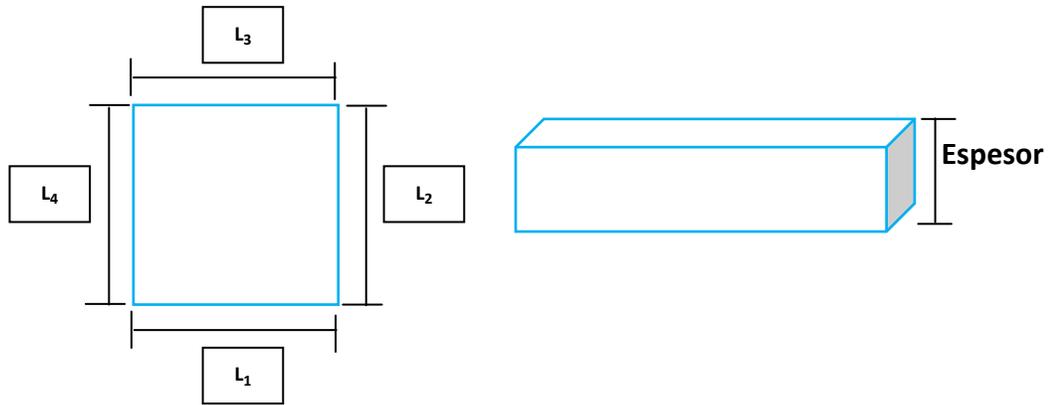
Se mandó analizar uno de los cuadros (muestra No. 2) de los que se cortaron, para obtener composición química de la aleación que se vació, en la siguiente tabla se muestra el resultado de dicho análisis:

**Tabla No. 3.7. Composición química muestra No. 2**

<b>Elemento</b>	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Sr	Ti
%	6.680	0.256	0.129	0.196	0.115	0.013	0.020	0.040	0.001	0.070

Por otra parte teniendo los cuadros se procedió a la preparación de 16 de ellos, comenzando con un desbaste con una lija de grano grueso, esto con la finalidad de eliminar algunas rebabas y bordes que presentaban las piezas, enseguida se continuó el desbaste hasta la lija 500. Después se tomó medida de las dimensiones de los cuadros, así como su respectivo peso.

Las dimensiones tomadas en las probetas se hicieron en todos sus lados y su espesor como se puede observar en la Figura No. 3.18, los valores obtenidos en las mediciones se encuentran en la siguiente tabla:



**Figura No. 3.18. Representación gráfica de las dimensiones medidas en las probetas.**

**Tabla No. 3.8. Dimensiones y pesos de las probetas.**

Muestra	L <sub>1</sub> (mm)	L <sub>2</sub> (mm)	L <sub>3</sub> (mm)	L <sub>4</sub> (mm)	Espesor(mm)	Peso(gr)
1	19.48	19.97	19.42	20.07	9.72	10.0836
2	17.42	18.53	17.28	18.42	9.39	Análisis químico
3	19.94	19.92	19.89	19.91	9.14	8.8798
4	19.39	19.59	19.38	19.60	9.52	9.5757
5	19.86	20.04	19.92	20.01	8.99	8.9529
6	19.86	20.02	19.90	20.10	8.67	9.1664
7	19.91	19.77	19.99	19.78	8.57	9.0365
8	19.76	19.68	19.67	19.74	8.88	9.1505
9	19.61	19.54	19.56	19.55	8.49	8.639
10	19.48	19.89	19.32	19.97	9.56	9.7069
11	19.94	18.40	19.90	18.31	9.66	9.2932

<b>12</b>	19.98	19.72	19.96	19.76	8.88	9.1339
<b>13</b>	19.39	19.72	19.53	19.95	9.20	9.4401
<b>14</b>	20.19	20.18	20.12	20.17	8.95	9.652
<b>15</b>	19.60	19.64	19.55	19.63	9.25	9.3415
<b>16</b>	19.91	20.16	19.93	20.12	8.67	9.2415
<b>17</b>	19.80	19.73	19.83	19.79	9.29	9.5929
<b>18</b>	19.59	19.91	19.68	19.83	8.74	8.8801
<b>19</b>	19.96	20.04	19.94	19.94	9.22	9.6417

Enseguida se les dio un recubrimiento con pintura epóxica por cinco de las seis caras y se dejaron secar (Figura No. 3.19), nuevamente se tomaron pesos de las muestras y posteriormente se montaron en resina en frío.

Para el montaje de las piezas se ocupó la resina epoxi de Struers, que consta de una resina y un endurecedor. Inicialmente se hizo el proceso de preparación de las muestras mencionado anteriormente, enseguida se colocaron los cuadros en los vasitos de montado para resina previamente engrasados con vaselina, se les adiciono un imán que iría dentro de la resina; esto con la finalidad de que ayudara a la adherencia de la muestra a la tapa del frasco donde fue colocada la muestra; y por último se hizo la preparación de la resina. Esta preparación se hizo mezclando las proporciones de resina y endurecedor necesarias durante dos minutos, teniendo especial cuidado en este paso para evitar la formación de burbujas de aire y a continuación se dejó reposar esta mezcla por dos minutos, transcurrido este tiempo se vació a los vasos con las probetas dentro de ellos y se dejaron secar por doce horas. En el siguiente diagrama de flujo podemos observar el proceso de montado de las probetas, Figura 3.20.

**Tabla No. 3.9. Pesos de las probetas recubiertas con pintura epóxica**

<b>Muestra</b>	<b>Peso (gramos)</b>
1	10.0939
2	Análisis químico
3	8.8901
4	9.5860
5	8.9632
6	9.1767
7	9.0468
8	9.1608
9	8.6493
10	9.7172
11	9.3035
12	9.1442
13	9.4504
14	9.6623
15	9.3518
16	9.2518
17	9.6032
18	8.8904
19	9.6952

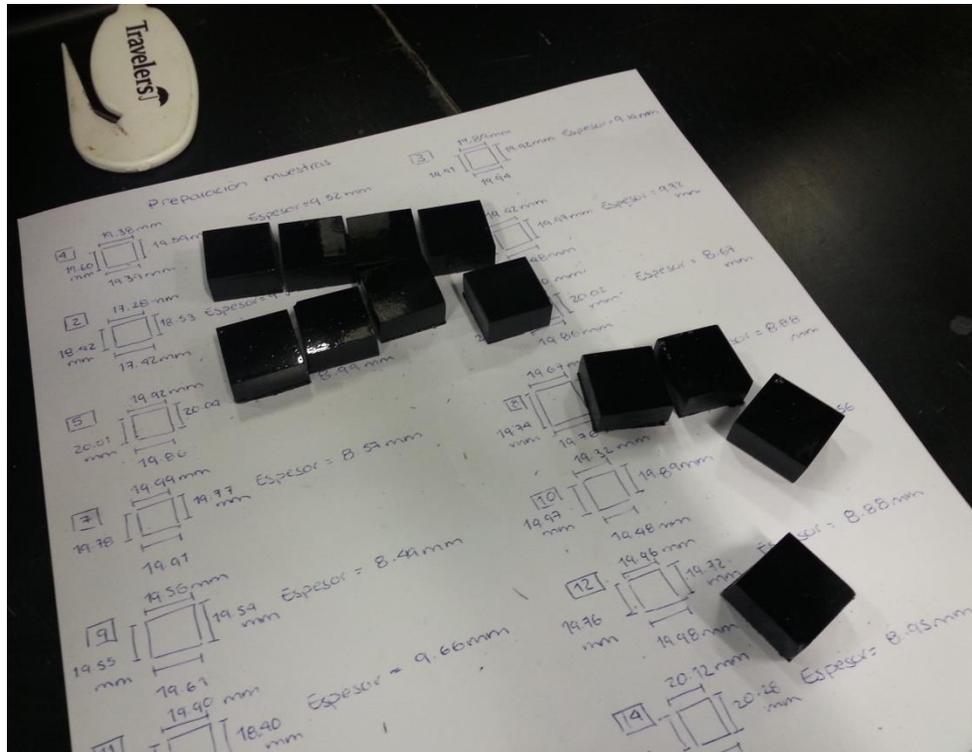


Figura 3.19. Probetas recubiertas con pintura epóxica.

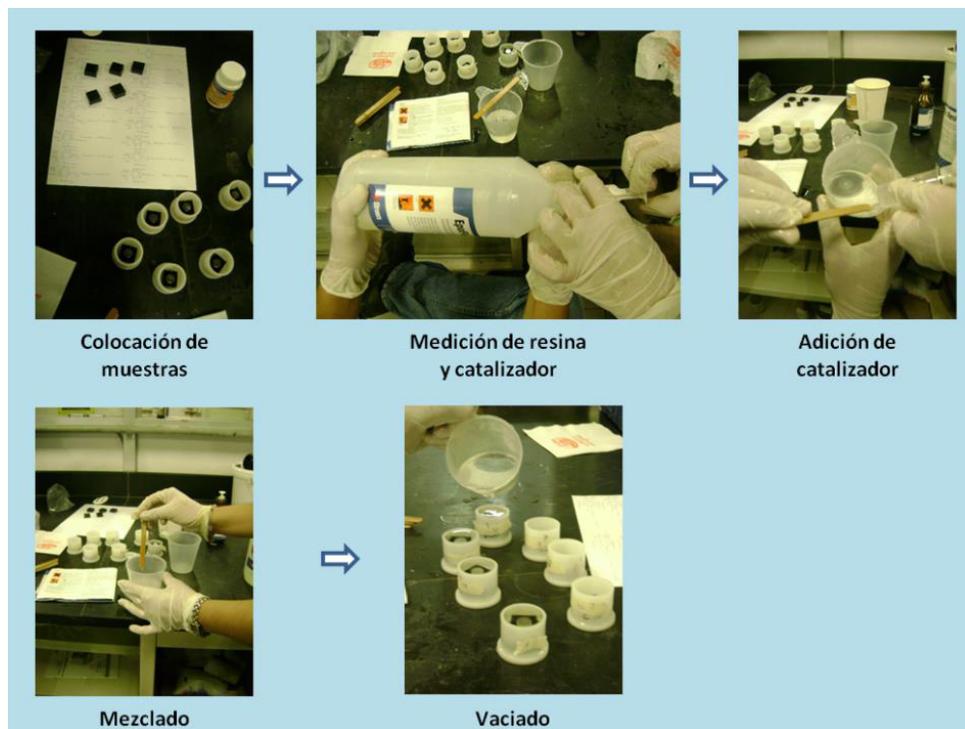


Figura 3.20. Diagrama de flujo del proceso de montaje en frío.

Después de que se montaron las probetas se repitió el proceso de pesaje de las muestras y se prosiguió con el desbaste y pulido de la cara que estará expuesta a la solución, ver Figura No 3.21, esto se hizo con lijas de carburo de silicio y pulido con paño y alúmina. Se volvieron a pesar nuevamente terminado el pulido de las piezas.

**Tabla No. 3.10 de pesos de las probetas montadas en resina en frío**

<b>Muestra</b>	<b>Peso (gramos)</b>
<b>1</b>	17.3945
<b>2</b>	Análisis químico
<b>3</b>	17.1268
<b>4</b>	16.8175
<b>5</b>	16.1203
<b>6</b>	16.7077
<b>7</b>	16.7145
<b>8</b>	16.8166
<b>9</b>	16.3804
<b>10</b>	17.1041
<b>11</b>	Metalografía
<b>12</b>	16.4898
<b>13</b>	17.0434
<b>14</b>	Metalografía
<b>15</b>	17.0697
<b>16</b>	16.6544
<b>17</b>	17.115
<b>18</b>	16.4397
<b>19</b>	16.4586

**Tabla No. 3. 12. Pesos de las probetas pulidas**

<b>Muestra</b>	<b>Peso (gramos)</b>
<b>1</b>	17.2347
<b>2</b>	Análisis químico
<b>3</b>	16.3592
<b>4</b>	16.8144
<b>5</b>	15.6811
<b>6</b>	16.3815
<b>7</b>	16.3805
<b>8</b>	16.3485
<b>9</b>	15.9534
<b>10</b>	16.5935
<b>11</b>	Metalografía
<b>12</b>	16.1104
<b>13</b>	16.6739
<b>14</b>	Metalografía
<b>15</b>	16.6428
<b>16</b>	16.3864
<b>17</b>	16.8536
<b>18</b>	16.0162
<b>19</b>	16.1860



**Figura 3.21. Probetas pulidas para el experimento.**

### **3.6.3. Preparación del agua residual sintética.**

Se hizo la preparación del agua residual de acuerdo a la norma Alemana DIN 38412, siguiendo la siguiente metodología:

Se pesaron las cantidades necesarias de cada uno de los diversos reactivos de acuerdo a las proporciones establecidas por la norma (Figura 3.23), ya pesados cada uno de ellos se diluyeron de manera individual en agua desionizada en un matraz aforado de 250 ml y posteriormente se vació cada una de estas mezclas en un matraz aforado de 1000 ml, en total fueron hechas ocho mezclas por lo que al final de este proceso se obtuvieron 2000 ml en total de la solución. Estos dos litros fueron mezclados en un solo recipiente para que todos los reactivos añadidos se integraran y formarán el sustrato de agua residual. (Figuras No. 3.24 a 3.29)

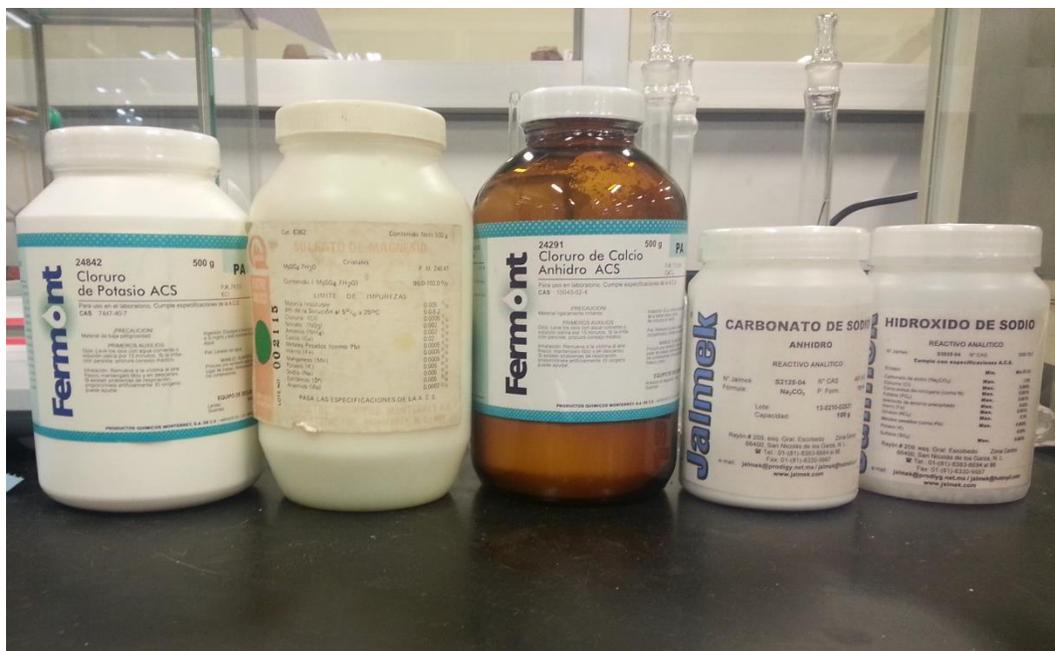


Figura 3.22. Substancias para síntesis de agua residual.

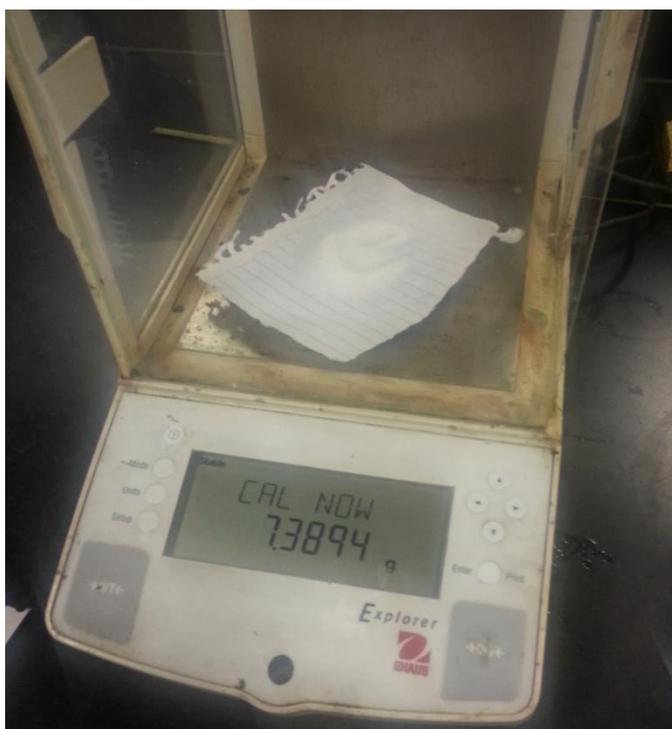
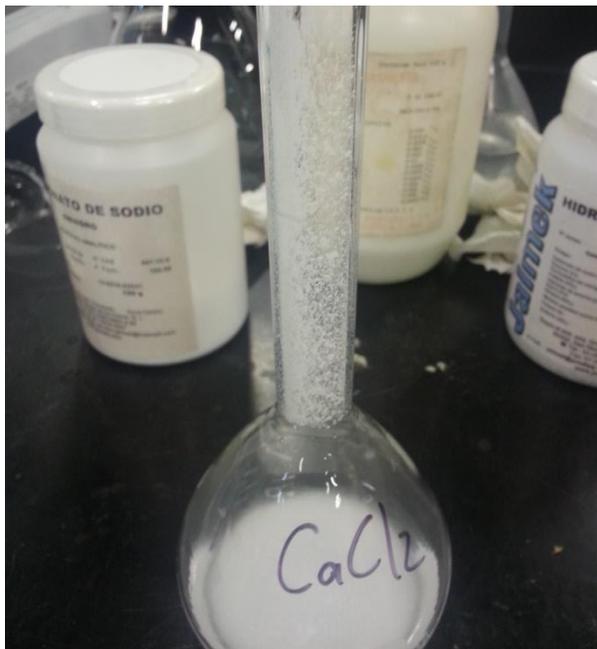


Figura 3.23. Pesaje de las substancias para el sustrato de agua residual.



**Figura 3.24. Preparación sustrato de agua residual.**



**Figura 3.25. Dilución de  $\text{CaCl}_2$  en agua desionizada.**

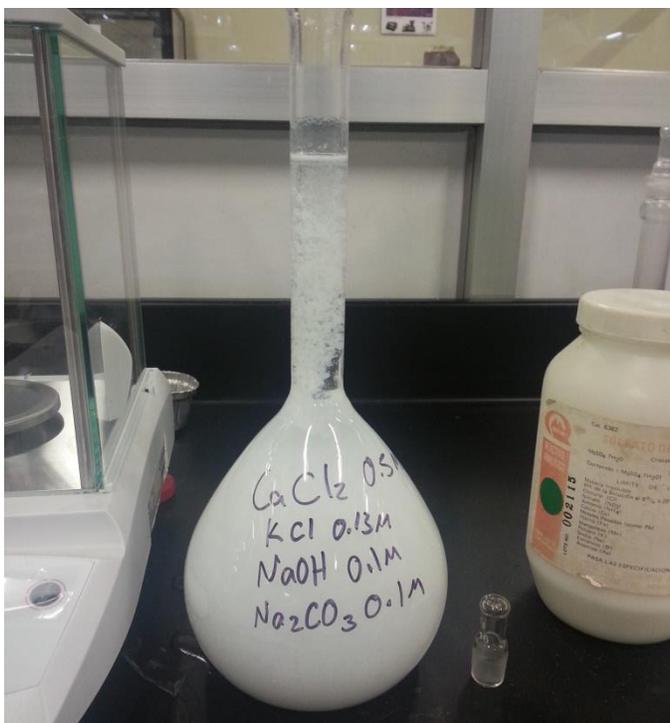
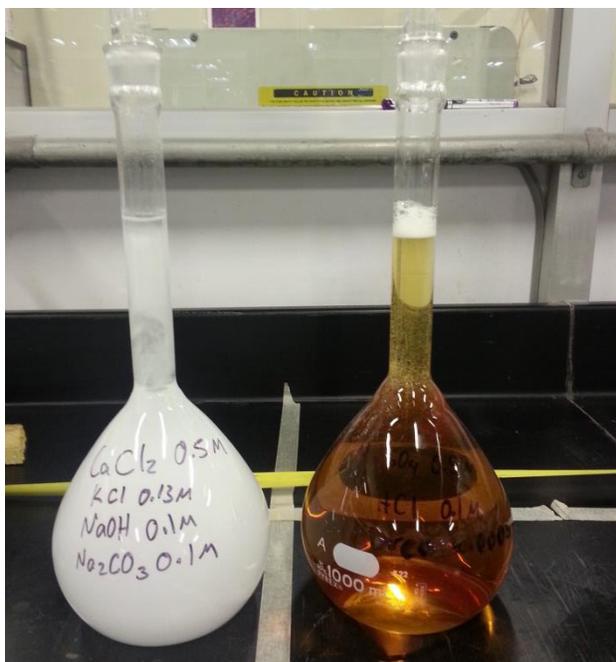


Figura 3.26. Mezcla de  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{NaOH}$  y  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  en matraz aforado.



Figura 3.27. Disolución del extracto de carne en agua desionizada.



**Figura 3.28. Mezcla de las sustancias en matraces aforados.**



**Figura 3.29. Agua residual sintetizada de acuerdo a norma DIN 38412.**

A continuación se puede observar las sustancias utilizadas así como sus respectivas cantidades.

**Tabla No. 3. 13 Reactivos utilizados para la síntesis de agua residual.**

<b>Reactivos</b>	<b>Gramos</b>	<b>Real</b>
CaCl <sub>2</sub> 0.5mol/L	13.874	13.95
MgSO <sub>4</sub> 0.5mol/L	30.809	30.89
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 0.1mol/L	2.65	2.6588
KCl 0.13mol/L	2.423	2.433
HCl 0.1mol/L	0.912	1.12
NaOH 0.1mol/L	1	1.0093
Urea 0.0005mol/L	7.5075	7.598
Extracto de carne	27.5	30.065

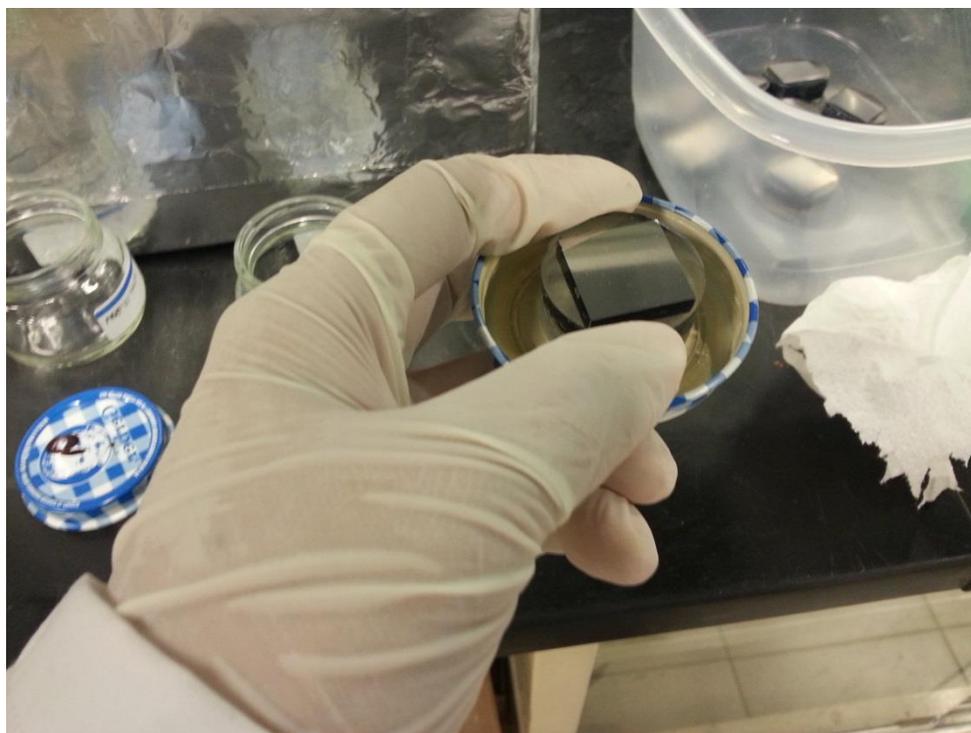
Ya sintetizado y mezclado el sustrato de agua residual se marcó cada uno de los frascos (Figura 3.30) con el número de probeta, peso al ser sumergida y fecha en la que se sacaría dicha probeta de la solución. Una vez hecho esto se vació el sustrato en cada uno de los frascos de vidrio donde fueron colocadas cada una de las muestras colocándoles un imán para que se adhirieran a la tapa e introducidas en una caja forrada con papel aluminio, ver Figura No 3.31 y 3.32.



**Figura 3.30. Etiquetado de frascos.**



**Figura 3.31. Preparación de prueba de Corrosión.**



**Figura 3.32. Colocación de muestras en frascos.**

#### **3.6.4. Limpieza de las muestras sometidas a la prueba de corrosión.**

Para la limpieza de las muestras se siguió el procedimiento indicado en la Norma ASTM G1, primeramente se sacaron los frascos del desecador a diferentes periodos de tiempo, se les tiro el agua residual contenida en cada uno de ellos y se procedió a hacer el primer pesaje de las muestras. Posteriormente se hicieron tres ciclos de limpieza usando el reactivo de acuerdo a la norma ASTM G1 para el Aluminio y sus aleaciones, esto durante un minuto. El reactivo usado que se utilizó fue ácido nítrico y una vez realizada la limpieza se hicieron los respectivos pesajes de las muestras.

# Capítulo 4.

## Resultados y Discusión

Este capítulo presenta todos los resultados obtenidos durante la ejecución de esta investigación.

### 4.1. Diseño del sistema de alimentación

La primera parte de la experimentación consistió en realizar el cálculo del sistema de alimentación para esta pieza, tratándose de un sistema de alimentación horizontal, método que es ampliamente utilizado en llenado por gravedad, fundición en arena en verde y die casting. Donde el plano de partición es horizontal y contiene los corredores y alimentadores, a su vez el alimentador es vertical y perpendicular al plano de partición.

Contando con los datos de entrada mostrados en la siguiente tabla se procedió a realizar los cálculos.

**Tabla No. 4.1. Valores de entrada del sistema de colada.**

Dato	Valor
Peso en lb/Kg	9.52/4.32
Espesor mínimo en pulg/cm	0.79/2.01
Volumen cm <sup>3</sup>	1599.9
Área cm <sup>2</sup>	2541.8
Altura del casting en pulg/cm	3.6/9.14

Cabe mencionar que el peso fue obtenido, considerando que  $\rho = \frac{m}{V} \therefore m = V\rho$  y que la densidad del Aluminio es 2.7 gr/cm<sup>3</sup>, sustituyendo valores se

realizo el cálculo y la conversión necesaria, obteniéndose con esto el peso de la pieza.

A partir de los datos de la tabla se hizo el cálculo del flujo de entrada:

$$\text{Flujo de Entrada} = \frac{\text{Peso de la pieza}}{(0.86 + 1.09 * \text{Espesor mínimo})^{0.5}}$$

$$\text{Flujo de Entrada} = \frac{9.52 \text{ lb}}{(0.86 + 1.09 * 0.787401575 \text{ pulg})^{0.5}}$$

$$\text{Flujo de Entrada} = 2.35 \text{ lb/pulg}$$

Con los datos obtenidos anteriormente se propone una base del orificio de colada (sprue) con un diámetro D=1.5-2 y una altura H=1-1.5, por lo anterior se propuso una entrada del orificio de colada de 1 pulg y salida de 0.75 pulg, así como un ataque de 0.75 pulg, para mantener el mismo flujo.

Adicional al flujo de entrada se calculó el tiempo de solidificación. El tiempo total de solidificación es el tiempo necesario para que la fundición solidifique después del vaciado. Este tiempo depende de la forma y tamaño de la fundición, y es expresada por una relación conocida como regla de Chvorinov, esta relación es la siguiente y es una aproximación:

$$TST = C_m \left( \frac{V}{A} \right)^2$$

Donde:

TST = Tiempo de solidificación total, min.

V = Volumen de fundición, (m<sup>3</sup>).

A = Área superficial de la fundición, (m<sup>2</sup>).

n = Exponente que toma usualmente un valor de 2.

C<sub>m</sub> = Es la constante del molde.

El valor de la constante del molde depende de las condiciones particulares de la fundición, entre las cuales incluyen el material del que este hecho el molde (propiedades como la conductividad térmica y el calor específico), la temperatura relativa del vaciado con respecto al punto de fusión del metal y además de las propiedades térmicas del metal a fundir; como lo son el calor específico, la entalpía de fusión y la conductividad térmica.

Sustituyendo valores y considerando que la velocidad de enfriamiento para moldes de arena es  $q=0.27 \text{ pulg}/\text{min}^2$ , tenemos:

$$TST = \frac{1}{q^2} \left( \frac{V}{A} \right)^2$$

$$TST = \frac{1}{\left(0.27 \frac{\text{pulg}}{\text{min}^{1/2}}\right)^2} \left( \frac{97.63 \text{ pulg}^3}{393.97 \text{ pulg}^2} \right)^2$$

$$TST = \frac{1}{\left(0.0729 \frac{\text{pulg}}{\text{min}^{1/2}}\right)^2} (0.24781075 \text{ pulg})^2$$

$$TST = 0.84238911 \text{ min}$$

Además la regla de Chvorinov indica que una fundición con una relación de volumen a área superficial se enfriará y solidificará más lentamente que otra con una relación más baja. Este principio ayuda en el diseño de la mazarota del molde. Para cumplir su función de alimentar metal fundido en la cavidad principal, el metal de la mazarota debe permanecer en fase líquida más tiempo que el de la fundición. En otras palabras, el Tiempo de solidificación total para la mazarota debe exceder el tiempo de solidificación total de la fundición principal. Como la condición del molde

Si el diseño de la mazarota incluye una relación de volumen a área más grande, podemos estar más o menos seguros de que la fundición principal solidificará primero y se reducirán los efectos de la contracción.

Como se mostró en la tabla de valores de entrada, la pieza a fabricar tiene un volumen de 1599.86 cm<sup>3</sup> y un área superficial de 2541.76 cm<sup>2</sup>. Con base en la tabla No. 4.1 se observa que el aluminio tiene una contracción por solidificación de aproximadamente el 7 %, como primer propuesta del volumen que debería tener la mazarota, calculamos el porcentaje de contracción por solidificación para el volumen total de nuestra pieza y tenemos que la cantidad de material a contraerse es de 111.9902 cm<sup>3</sup>. Por lo que necesitaríamos una mazarota cuyo volumen contrarreste dicha cantidad.

Adicionalmente se realizó el cálculo de los módulos, como se muestra a continuación:

$$M_c = \frac{V_c}{A_c} = \frac{1599.86}{2541.76} = 0.63 \text{ cm}$$

$$M_r = 1.3M_c = 1.3(0.63) = 0.82$$

Debido a que la forma del alimentador es cilíndrica, se uso la relación H/D= 1.

$$D = H = M_r * 5 \text{ (cm)}$$

$$D = H = 0.82 * 5$$

$$D = H = 4.1$$

**Tabla No. 4.2 Contracción volumétrica para diferentes metales de fundición debida a la contracción por solidificación.**

Metal	Contracción volumétrica debida a:	
	Contracción por solidificación %	Contracción térmica del sólido %
Aluminio	7	5.6
Aleación de Aluminio (típica)	7	5
Fundición de Hierro gris	1.8	3
Fundición de hierro gris al alto carbono	0	3
Fundición de acero bajo carbono	3	7.2
Cobre	4.5	7.5
Bronce (CuSn)	5.5	6

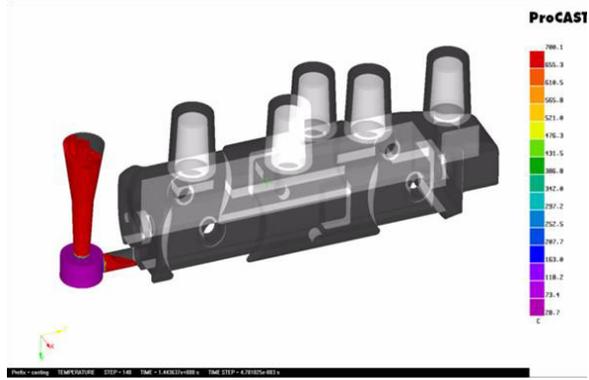
Una vez realizados los cálculos mencionados en los párrafos anteriores, se procedió a hacer el diseño de colada en SolidWorks para posteriormente ser simulado con el Software comercial ProCast.

## **4.2 Simulación**

Se realizó la simulación del proceso de llenado de la carcasa utilizando el software ProCast. Partiendo de los dibujos de la carcasa del robot se realizó el mallado de la misma. Posteriormente, se establecieron los parámetros involucrados en el proceso de vaciado, como lo son: tipos de materiales (metal y revestimiento cerámico), temperatura de los materiales en el proceso, gravedad, tiempo de llenado, flujo del metal líquido, etc. para continuar con la simulación del caso.

Se realizaron diferentes simulaciones, con el objetivo de encontrar el punto de vaciado óptimo. Se probó colocando alimentadores en diferentes zonas, obteniendo malos resultados de llenado, como consecuencia, atrapamiento de gases y en algunos casos un llenado incompleto, la Figura No. 4.2 muestra la secuencia de llenado para la carcasa a diferentes tiempos de simulación, donde se está proponiendo un arreglo de cinco mazarotas que nos ayuden a compensar la contracción de la pieza.

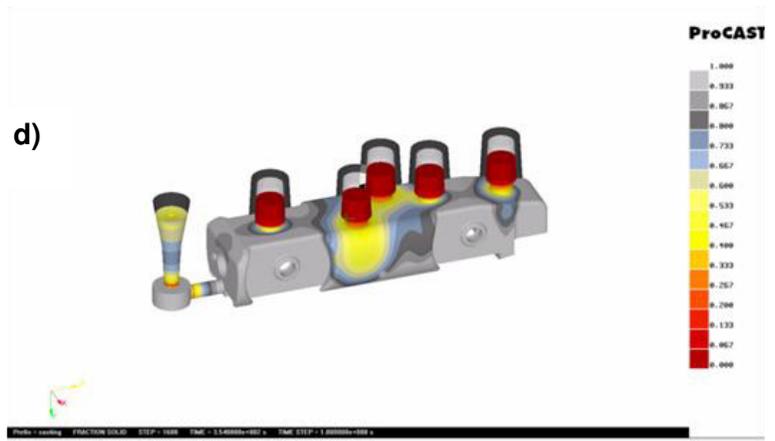
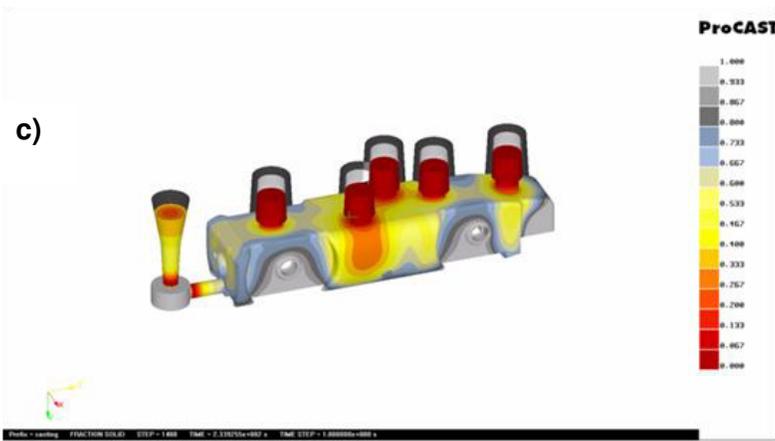
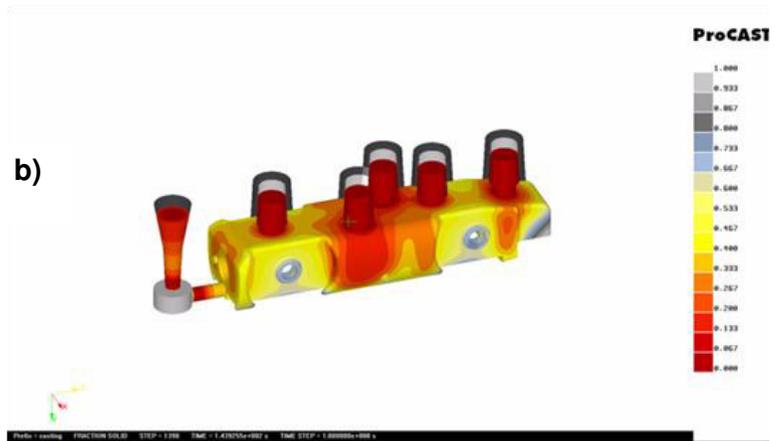
a)



**Figura No. 4.2. Proceso de llenado del molde a) 1.44, b) 6.33, c) 21.6 y d) 29.94segundos.**

En la Figura No. 4.3 se presenta un análisis de la secuencia de solidificación, en particular un análisis de la fracción sólida en función del tiempo, este análisis nos permite visualizar de manera gráfica las ultimas zonas en solidificar y saber si no se formaran bolsas de metal liquido aisladas para garantizar que no haya formación de rechupes.





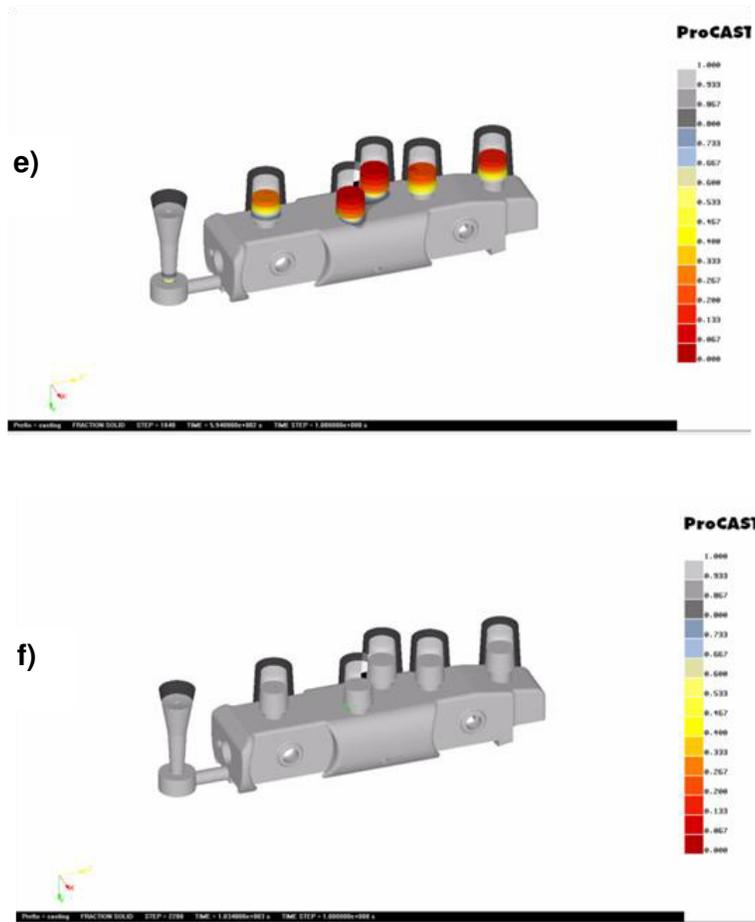


Figura No. 4.3. Proceso de solidificación de la carcasa para varios tiempos de este proceso: a) 73.9, b) 143, c) 240, d) 354, e) 594 y f) 1034 segundos respectivamente.

Para el caso de este arreglo con cinco mazarotas tuvimos la presencia de algunas porosidades, tal es el caso mostrado en la Figura No. 4.4 donde se muestra la pieza mostrando algunos de estos defectos.

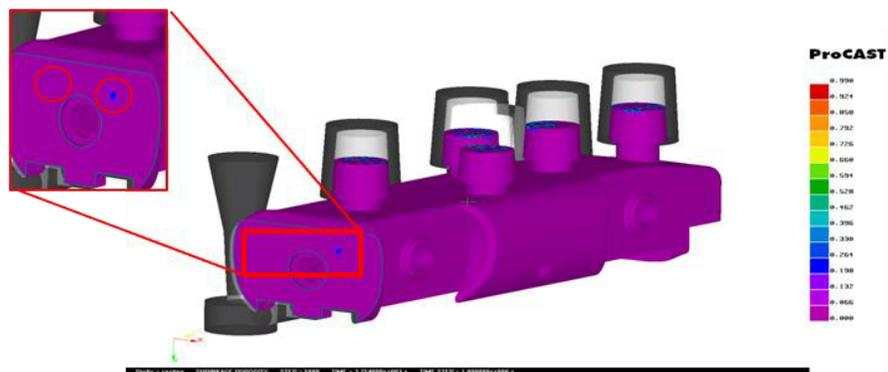
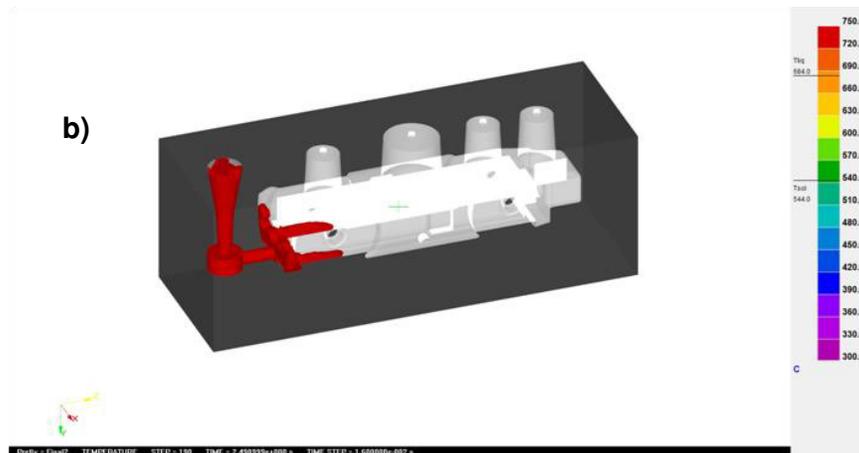
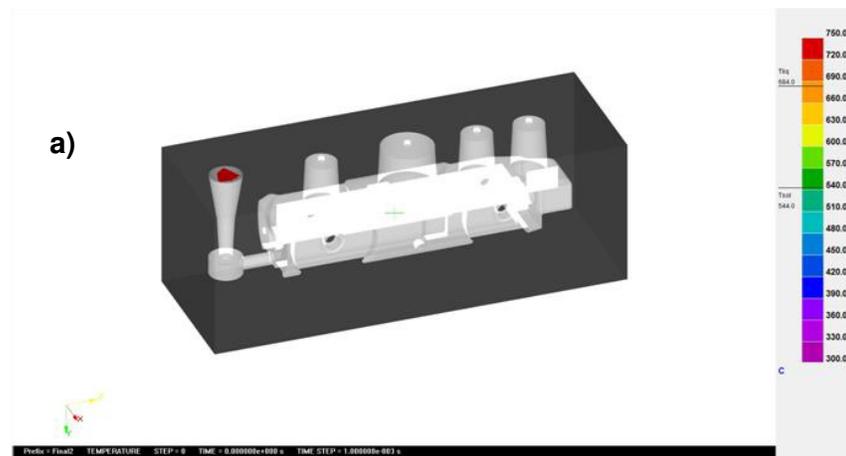
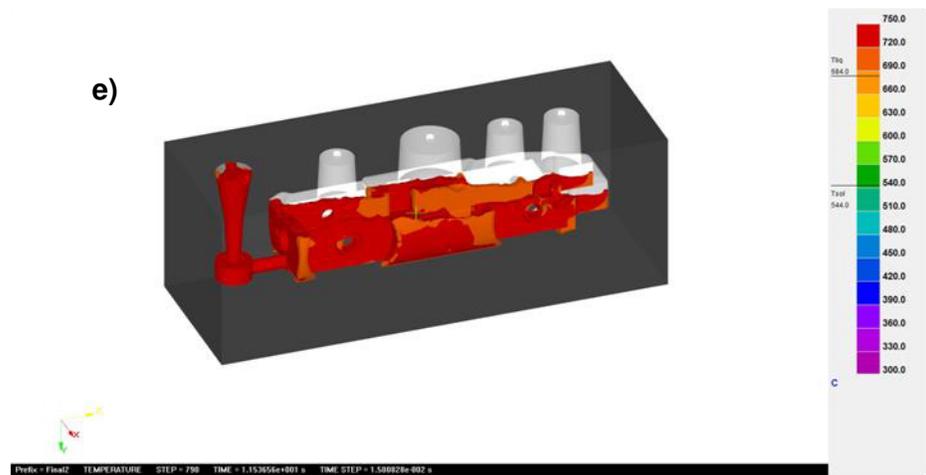
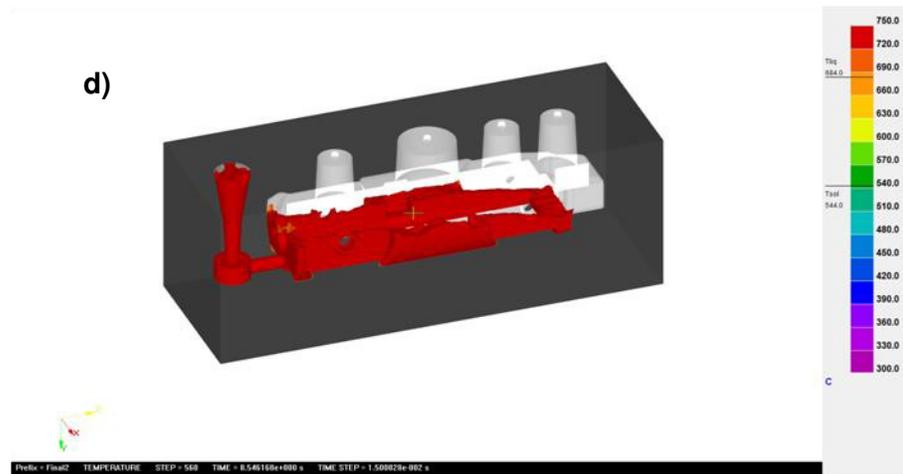
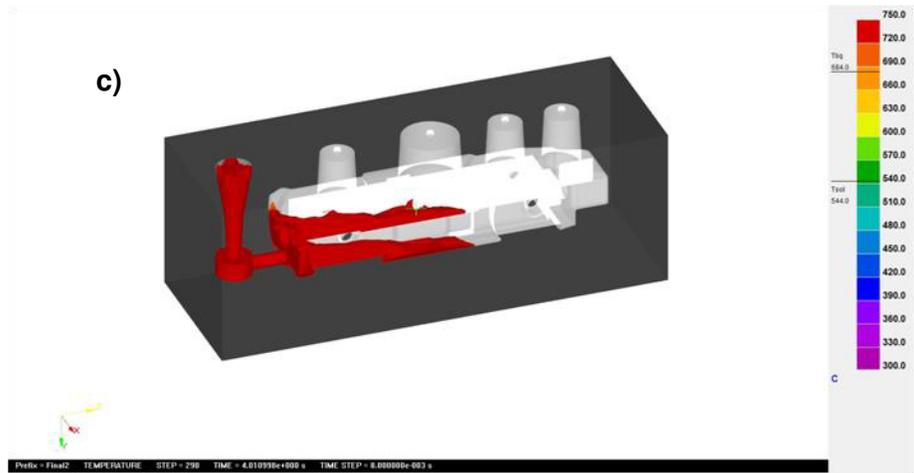


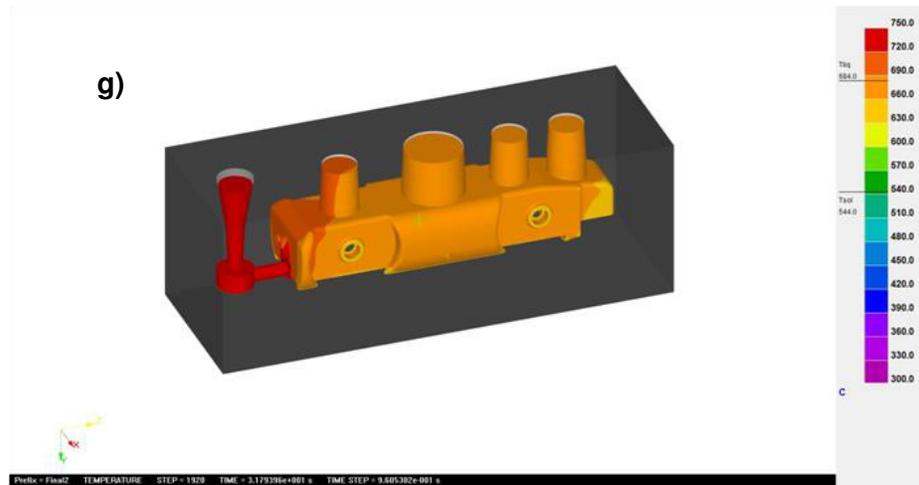
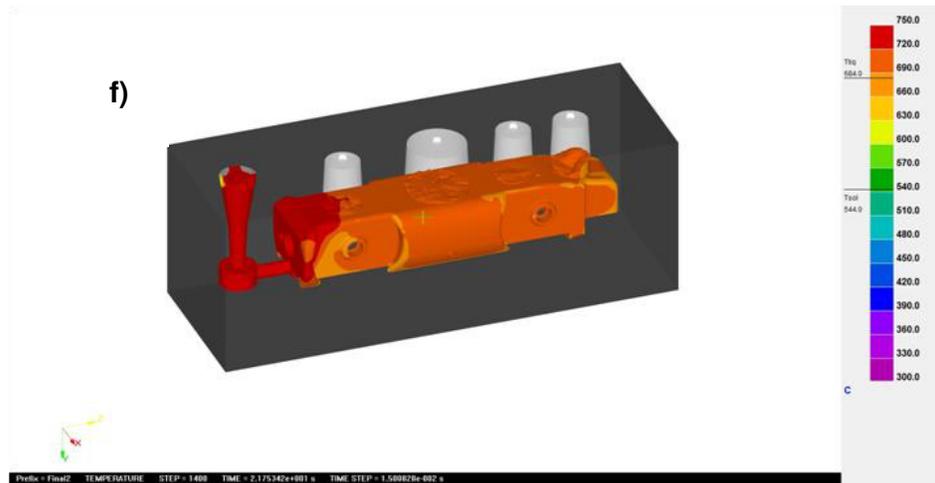
Figura No. 4.4. Microporosidad mostrada en la pieza con arreglo de cinco mazarotas.

Adicionalmente a los defectos antes mostrados en la Figura No. 4.5 se presentaron en la parte central donde el espesor de la pieza es mayor, por esta razón que se decidió cambiar la configuración de las mazarotas y hacer una distribución diferente de las mismas.

En las siguientes figuras podemos ver la nueva configuración, tratándose de cuatro mazarotas, entre ellas una mazarota de un volumen considerable que es la que nos servirá para mantener caliente la parte central, que es donde se presenta el mayor espesor de la pieza. Además en ellas se muestra la secuencia de llenado para la carcasa a diferentes tiempos de simulación.



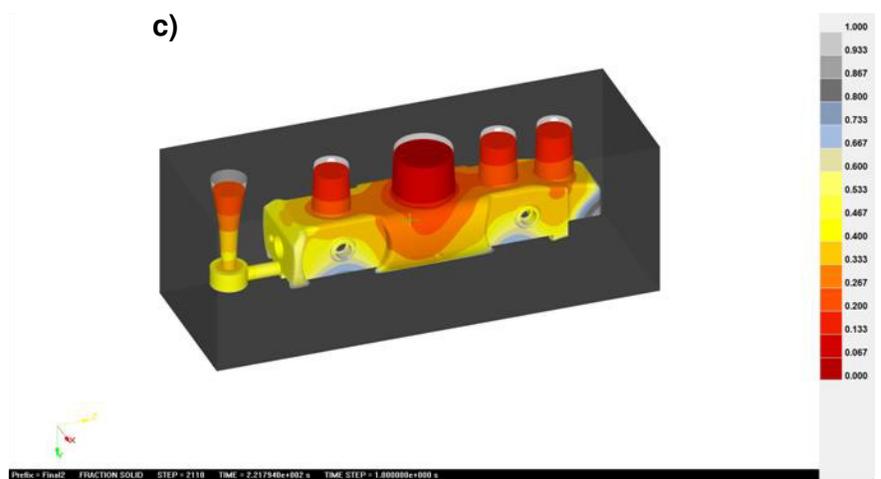
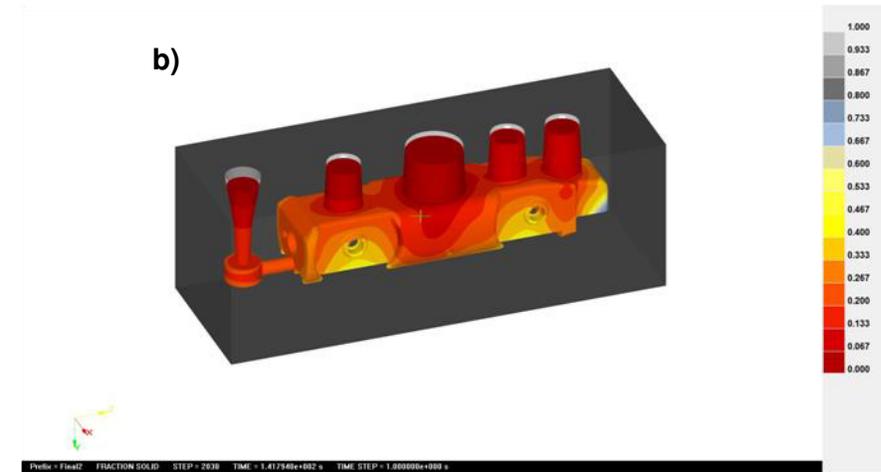
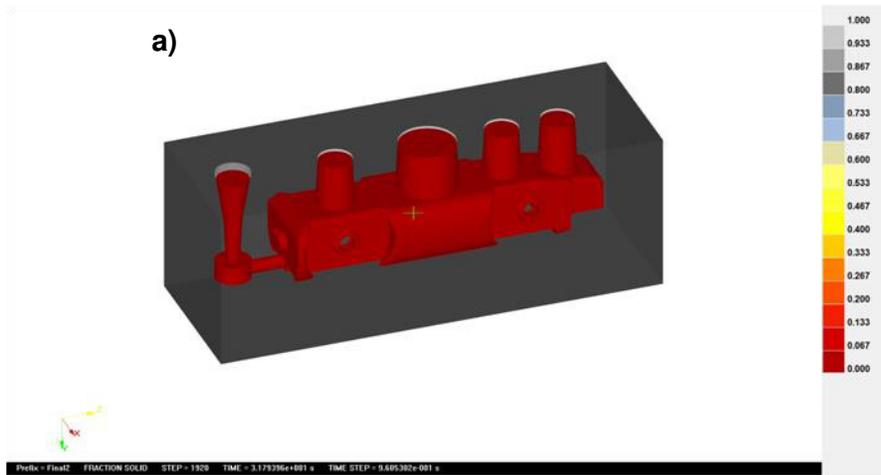


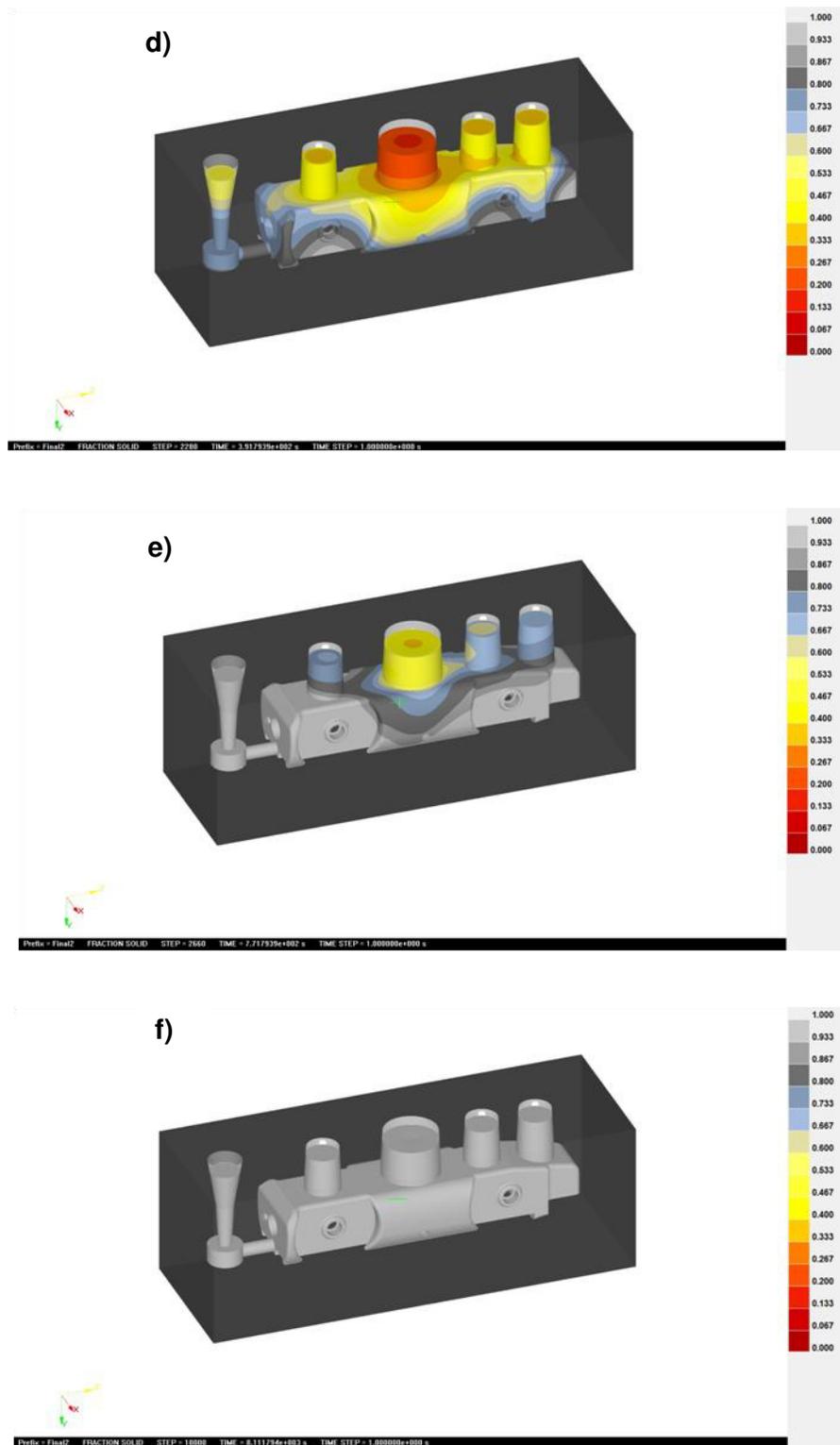


**Figura No. 4.5. Proceso de llenado del molde a) 0, b) 2.5, c) 4, d) 8.6, e) 11.6, f) 21.8 y g) 31.8 segundos.**

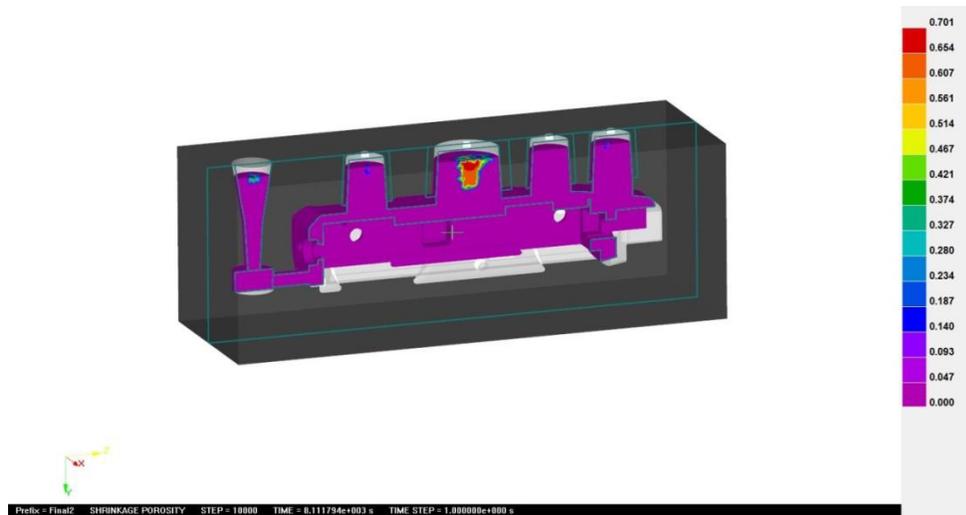
En la Figura No. 4.6. Se presenta un análisis de la fracción sólida en función del tiempo para este caso.

Y en la Figura No. 4.7 muestra un corte transversal de la carcasa del robot mostrando microporosidades únicamente en la parte de las mazarotas y de la alimentación, mostrando que este sistema de alimentación es eficiente.





**Figura No. 4.6. Figura 9. Proceso de solidificación de la carcasa para varios tiempos de este proceso: a) 31.8, b) 141.8, c) 221.8, d) 391.8, e) 771.8 y f) 811.1 segundos respectivamente.**



**Figura No. 4.7. Corte transversal de la carcasa del robot mostrando microporosidad en las mazarotas.**

### 4.3 Fundición de la pieza

Después de la optimización del sistema de colada a través de la simulación, se procedió a la impresión del modelo a replicar mediante prototipado y a su posterior moldeo y vaciado. A continuación se presentan resultados de la obtención de las piezas obtenidas durante la fundición.



**Figura No. 4.8. Primera carcasa vaciada.**

a)



b)



c)

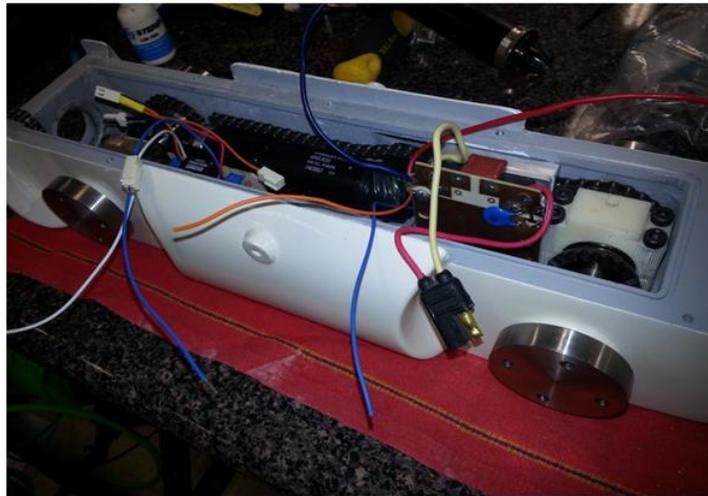


**Figura No. 4.9. a) Corte de mazarotas de la carcasa, b) Granallado de la carcasa y c) maquinado de la carcasa.**

a)



b)



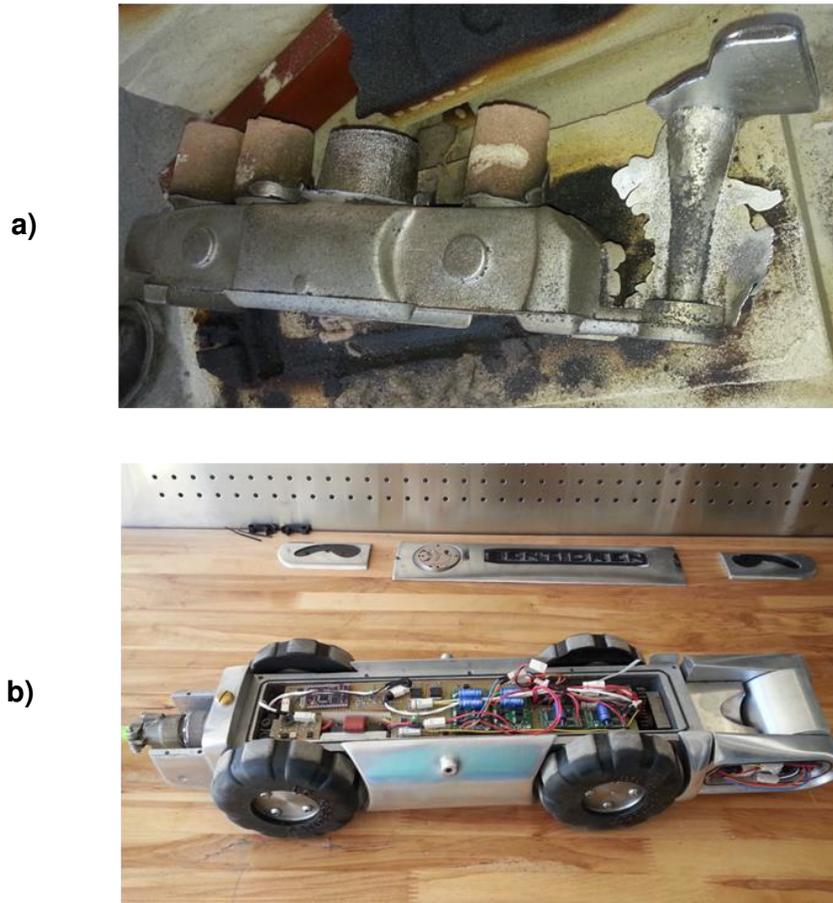
c)



**Figura No. 4.10. a) Aplicación de pintura a la carcasa, b) Ensamble de componentes y c) Robot terminado.**

Como se pudo observar en las anteriores figuras se logró la fundición del primer prototipo del robot, al cual se le hizo un maquinado y se pintó por motivos de marketing esto debido a que sería presentado en la Asociación Nacional de de Empresas de Agua y saneamiento de México (ANEAS).

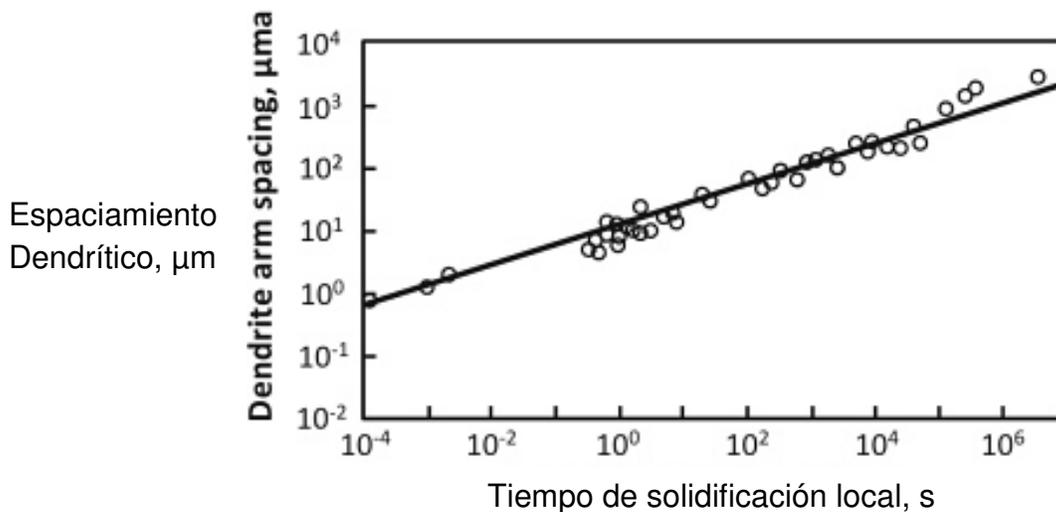
En las imágenes siguientes se observa una de las dos carcasas que se obtuvieron satisfactoriamente en posteriores vaciadas, cabe mencionar que debido a que el moldeo se realizó usando el sistema de aglutinación fenólico uretánico amina, estas presentaron un mejor acabado superficial. Adicionalmente se presenta una imagen del robot terminado, a este último solo se hizo maquinado debido a que es la idea original de acabado del robot.



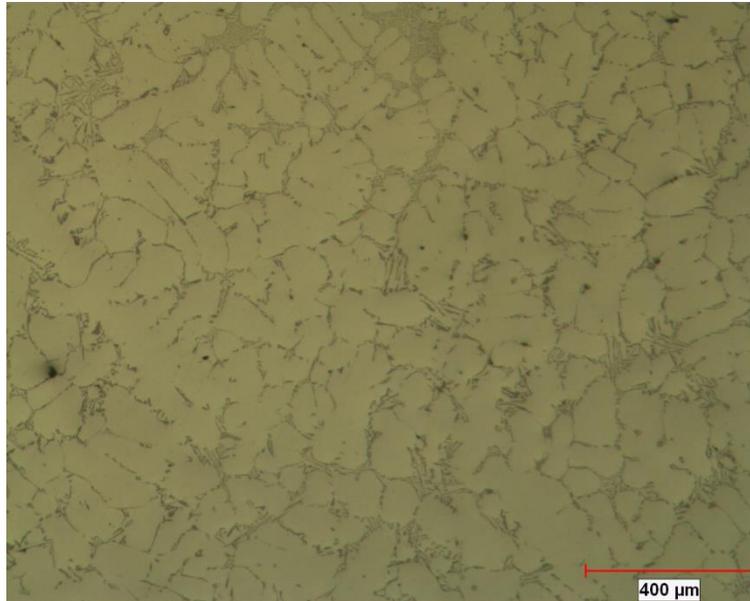
**Figura No. 4.11. a) Carcasa vaciada en aleación de aluminio y b) Robot ensamblado y armado para su uso en la inspección de las tuberías.**

#### 4.4 Análisis metalográfico

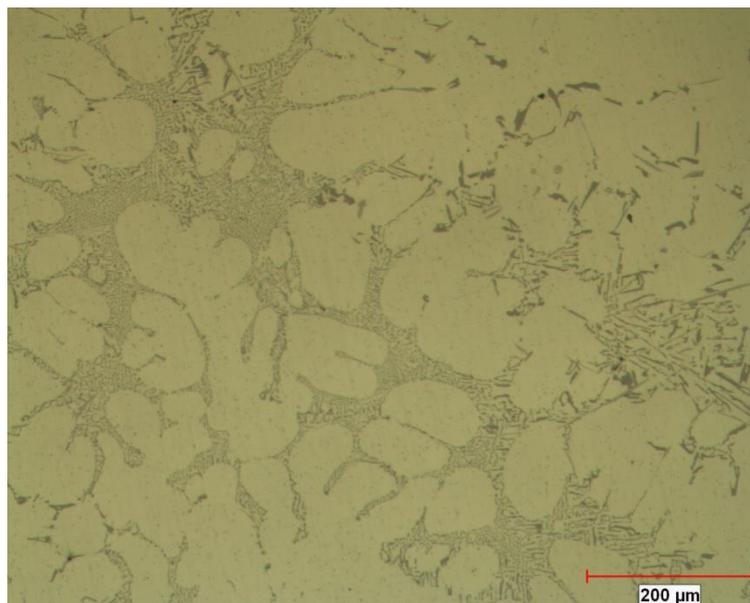
Mediante microscopía óptica se obtuvieron las micrografías de las dos piezas cortadas de las placas fundidas de la aleación de Aluminio a diferentes magnificaciones. En cuanto a la microestructura podemos decir que se trata una matriz de aluminio, con precipitados de silicio eutéctico y otros intermetálicos característicos en este tipo de aleaciones, las fases que podemos observar son:  $\text{Al}_5\text{FeSi}$ ,  $\text{Al}_8\text{Mg}_3\text{FeSi}_6$  y  $\text{Mg}_2\text{Si}$ . Presentando un DAS de  $10^2 \mu\text{m}$ , que tiene un valor característico de aleaciones vaciadas en arena. [Flemings]



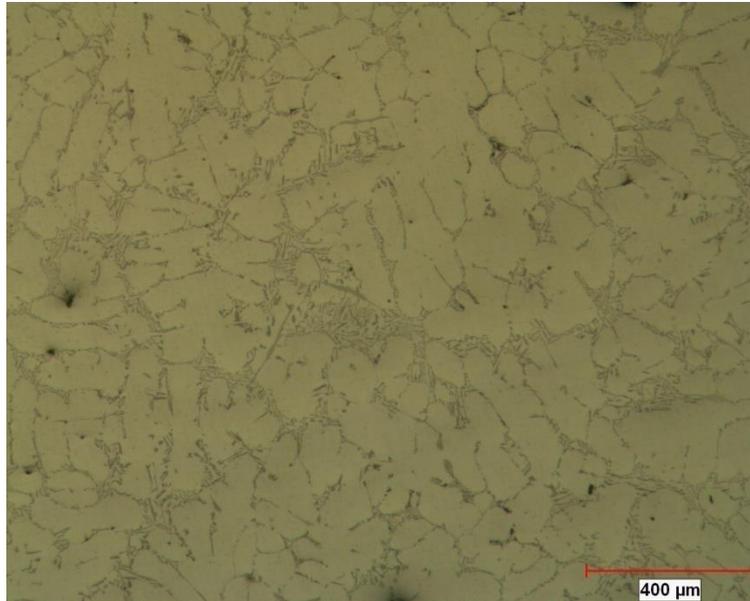
**Figura No. 4.12. Relación entre DAS y tiempo de solidificación.  
(Flemings, 1991)**



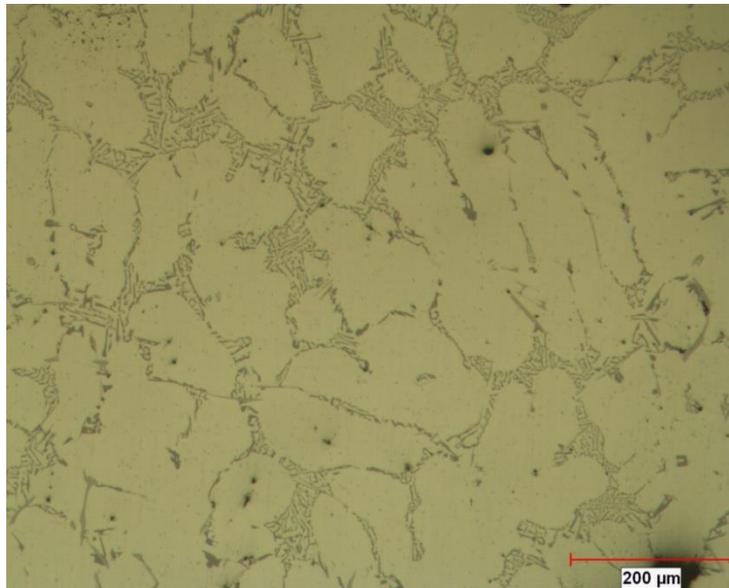
**Figura No. 4.13. Microestructura de la muestra 1 de aluminio A356 a 50x.**



**Figura No. 4.14. Microestructura de la muestra 1 de aluminio A356 a 100x.**



**Figura No. 4.15. Microestructura de la muestra 2 de aluminio A356 a 50x.**

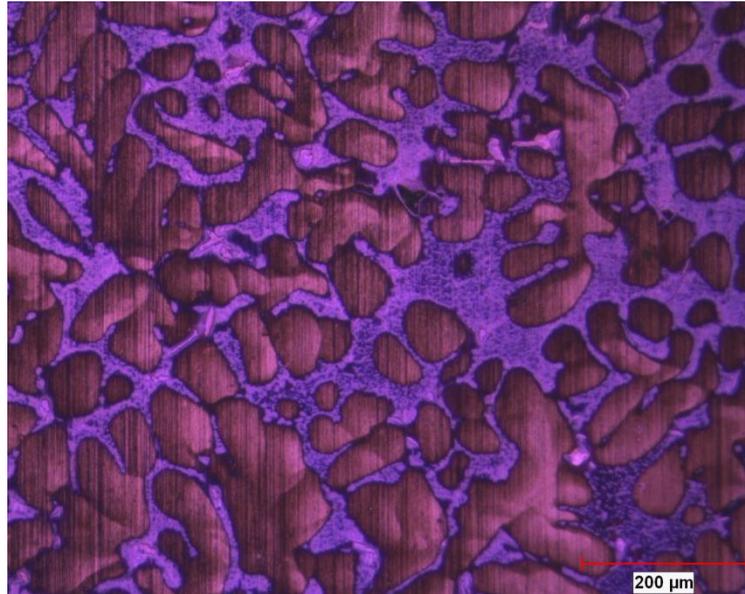


**Figura No. 4.16. Microestructura de la muestra 2 de aluminio A356 a 100x.**

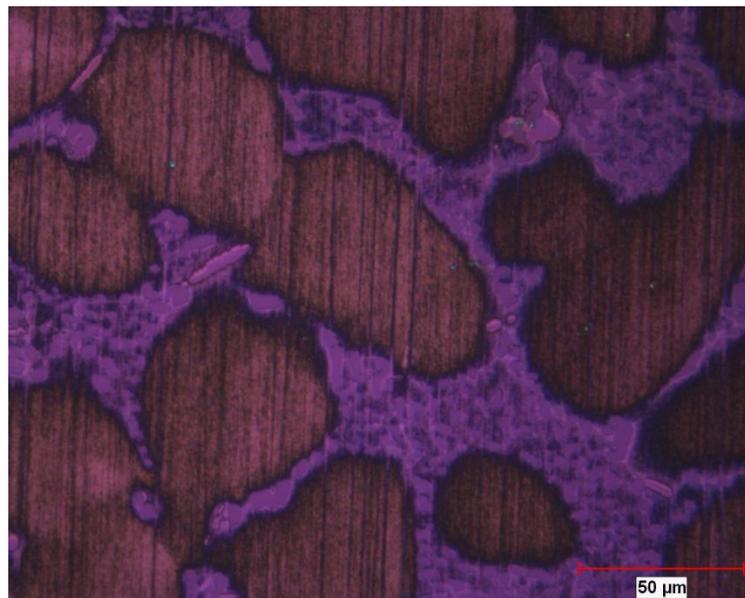
El posterior ataque de las muestras se realizó a temperatura ambiente utilizando el reactivo desarrollado por Weck para aleaciones de aluminio. Este último consiste en una solución de permanganato potásico, hidróxido sódico y agua en las proporciones siguientes:

Agua destilada (100 ml)	KMnO <sub>4</sub> (4 gr)	NaOH (1 gr)
-------------------------	--------------------------	-------------

Se utilizo luz polarizada y un ataque alrededor de 20 segundos para obtenerlas.



**Figura 4.17. Metalografía obtenida utilizando reactivo Weck a 100 x.**



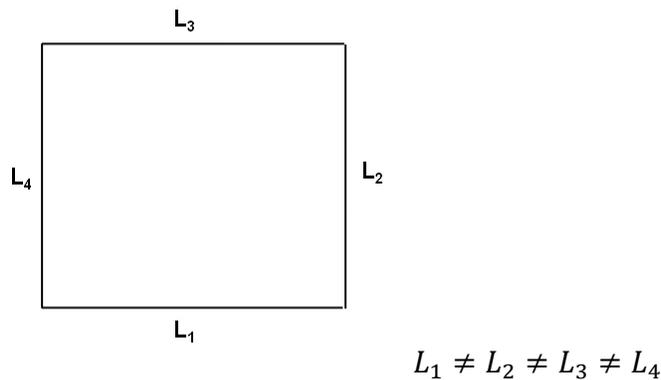
**Figura 4.18. Metalografía obtenida utilizando reactivo Weck a 400 x.**

#### 4.5. Corrosión por pérdida de peso.

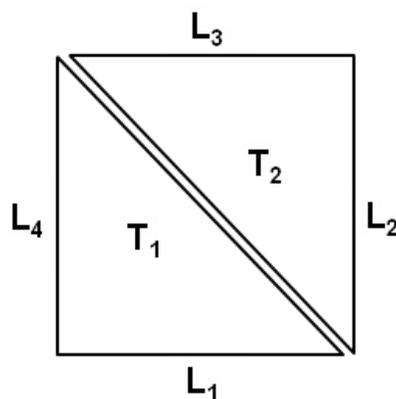
Una vez iniciado este experimento, las probetas sometidas a esta prueba fueron retiradas de la solución a diferentes tiempos (una semana, treinta días, noventa días y ciento ochenta días). Se retiraron tres muestras en cada uno de los tiempos, siendo en total doce las muestras retiradas las cuales fueron pesadas después de los respectivos ciclos de limpieza.

Para comenzar con este análisis, una vez obtenidas las medidas de cada una de las probetas, se procedió a efectuar el cálculo del área de cada una de ellas. Como se pudo observar en la Tabla No. 3.8 del capítulo anterior, las dimensiones de los cuatro lados son diferentes por lo que para el cálculo del área se realizó el siguiente procedimiento.

1.- Se consideró una figura de cuatro lados diferentes.



2.- Se dividió esta figura en dos triángulos rectángulos.



3.- Siendo triángulos rectángulos y conociendo dos de los lados se procedió a hacer el cálculo de la hipotenusa utilizando el teorema de Pitágoras para cada uno de los triángulos.

Por ejemplo: Para una de las muestras que tiene dimensiones  $L_1=a_1=19.48$  mm,  $L_4=b_1=20.07$  mm,  $L_2=a_2=19.97$  mm y  $L_3=b_2=12.42$  mm respectivamente tenemos lo siguiente:

$$\text{Teorema de Pitágoras} \rightarrow c^2 = a^2 + b^2$$

$$c_1^2 = (19.48 \text{ mm})^2 + (20.07 \text{ mm})^2$$

$$c_1 = \sqrt{(19.48 \text{ mm})^2 + (20.07 \text{ mm})^2}$$

$$c = 27.9691848$$

4.- Calculado el lado desconocido se procedió a utilizar la Formula de Herón que relaciona el área de un triángulo en términos de las longitudes de sus lados a, b y c.

$$\text{Formula de Herón} \rightarrow A = \sqrt{S(S - a)(S - b)(S - c)}$$

Donde s es el semiperímetro del triángulo

$$S = \frac{a + b + c}{2}$$

Continuando con el ejemplo anterior se tiene:

$$S_{T1} = \frac{19.48 \text{ mm} + 20.07 \text{ mm} + 27.9691848 \text{ mm}}{2}$$

$$S_{T1} = 33.75959241 \text{ mm}$$

$$A_{T1} = \sqrt{33.7595(33.7595 - 19.48)(33.7595 - 20.07)(33.7595 - 27.9691)}$$

$$A_{T1} = \sqrt{(38213.13413)}$$

$$A_{T1} = 195.4818 \text{ mm}^2$$

5.- Obtenido el valor se realizó el mismo procedimiento mencionado para calcular el área del segundo triángulo.

$$c_2^2 = \sqrt{(19.97 \text{ mm})^2 + (19.42 \text{ mm})^2}$$

$$c_2 = 27.8556511 \text{ mm}$$

$$S_{T2} = \frac{19.97 \text{ mm} + 19.42 \text{ mm} + 27.855611 \text{ mm}}{2}$$

$$S_{T2} = 33.62282557 \text{ mm}$$

$$A_{T2} = \sqrt{33.6228(33.6228 - 19.97)(33.6228 - 19.42)(33.6228 - 27.8556)}$$

$$A_{T2} = \sqrt{(37600.58394)}$$

$$A_{T2} = 193.9087 \text{ mm}^2$$

6.- Por último se sumaron las dos áreas obtenidas de los triángulos, siendo esta el área de la probeta.

$$A_T = A_{T1} + A_{T2}$$

$$A_T = 195.4818 \text{ mm}^2 + 193.9087 \text{ mm}^2$$

$$A_T = 389.3905 \text{ mm}^2 = 3.893905 \text{ cm}^2$$

A continuación se muestran los resultados que fueron obtenidos por el método descrito en los párrafos anteriores. En la Tabla No. 4.3 podemos observar los valores calculados para los triángulos número uno y en la Tabla 4.4 se presentan los valores de los triángulos números dos. Adicionalmente se presenta la Tabla 4.5 con las áreas de las probetas para este experimento.

Tabla No. 4.3. Valores triángulo rectángulo número uno.

Triángulo 1				Semiperímetro (mm) $S = \frac{a + b + c}{2}$	Área (mm <sup>2</sup> ) $A = \sqrt{S(S - a)(S - b)(S - c)}$
Muestra	a (mm)	b (mm)	c (mm)		
1	19.48	20.07	27.969	33.759	195.482
2	Análisis químico				
3	19.94	19.91	28.178	34.014	198.502
4	19.39	19.6	27.570	33.280	190.022
5	19.86	20.01	28.192	34.031	198.699
6	19.86	20.1	28.256	34.108	199.593
7	19.91	19.78	28.065	33.877	196.909
8	19.76	19.74	27.931	33.715	195.031
9	19.61	19.55	27.6903341	33.425	191.687
10	19.48	19.97	27.8975142	33.673	194.508
11	Análisis metalográfico				
12	19.98	19.76	28.101	33.920	197.402
13	19.39	19.95	27.820	33.580	193.415
14	Análisis metalográfico				
15	19.6	19.63	27.739	33.485	192.374
16	19.91	20.12	28.306	34.168	200.294
17	19.8	19.79	27.994	33.792	195.925
18	19.59	19.83	27.875	33.647	194.235
19	19.96	19.94	28.214	34.057	199.001

Tabla No. 4.4. Valores triángulo rectángulo número dos.

Triángulo 2				Semiperímetro (mm) $S = \frac{a + b + c}{2}$	Área (mm <sup>2</sup> ) $A = \sqrt{S(S - a)(S - b)(S - c)}$
Muestra	a (mm)	b (mm)	c (mm)		
1	19.97	19.42	27.856	33.623	193.908
2	Análisis químico				
3	19.92	19.89	28.149	33.979	198.104
4	19.59	19.38	27.556	33.263	189.827
5	20.04	19.92	28.256	34.108	199.598
6	20.02	19.9	28.227	34.074	199.199
7	19.77	19.99	28.115	33.937	197.601

<b>8</b>	19.68	19.67	27.825	33.587	193.553
<b>9</b>	19.54	19.56	27.648	33.374	191.101
<b>10</b>	19.89	19.32	27.729	33.469	192.137
<b>11</b>	Análisis metalográfico				
<b>12</b>	19.72	19.96	28.058	33.869	196.806
<b>13</b>	19.72	19.53	27.754	33.502	192.566
<b>14</b>	Análisis metalográfico				
<b>15</b>	19.64	19.55	27.712	33.451	191.981
<b>16</b>	20.16	19.93	28.348	34.219	200.894
<b>17</b>	19.73	19.83	27.973	33.767	195.623
<b>18</b>	19.91	19.68	27.995	33.792	195.914
<b>19</b>	20.04	19.94	28.270	34.125	199.799

**Tabla No. 4.5. Áreas de las probetas en cm<sup>2</sup>.**

<b>Muestra 1</b>	<b>Muestra 2</b>	<b>Muestra 3</b>	<b>Muestra 4</b>	<b>Muestra 5</b>
3.5434	AQ	3.8812	3.8852	3.9919
<b>Muestra 6</b>	<b>Muestra 7</b>	<b>Muestra 8</b>	<b>Muestra 9</b>	<b>Muestra 10</b>
3.9610	3.9263	3.8524	3.8560	3.7468
<b>Muestra 11</b>	<b>Muestra 12</b>	<b>Muestra 13</b>	<b>Muestra 14</b>	<b>Muestra 15</b>
AM	3.9022	3.9618	AM	3.9227
<b>Muestra 16</b>	<b>Muestra 17</b>	<b>Muestra 18</b>	<b>Muestra 19</b>	
3.9681	3.8985	3.9491	3.988	

Para el cálculo de la velocidad de corrosión se consideró la siguiente información para cada una de las muestras retiradas.

- Material de trabajo: Aluminio 356
- Tiempo de exposición: 7, 30, 90, 180 días dependiendo de cuando fue retirada.
- Área de la muestra previamente calculada.
- Peso inicial.
- Peso obtenido después de cada uno de los ciclos de limpieza

- Densidad del Aluminio
- Constante K.

Por ejemplo para la muestra número uno tenemos:

#### Medidas

Tiempo de exposición: 30 días = 720 horas

Área de la muestra: 3.8939 cm<sup>2</sup>.

Peso inicial (W<sub>0</sub>): 9.9341 gr.

Peso obtenido después de 1<sup>er</sup>. ciclo de limpieza (W<sub>1</sub>): 9.9174 gr.

Peso obtenido después de 2<sup>do</sup>. ciclo de limpieza (W<sub>2</sub>): 9.9002gr

Peso obtenido después de 3<sup>er</sup>. ciclo de limpieza (W<sub>3</sub>): 9.824 gr.

#### Cálculos

Para calcular W (masa perdida en gramos) se realizo lo siguiente:

$$W_x = W_0 - W_1$$

$$W_x = 9.9341 - 9.9174$$

$$W_x = 0.0167 \text{ gramos}$$

$$W_y = W_0 - W_2$$

$$W_y = 9.9341 - 9.9002$$

$$W_y = 0.0339 \text{ gramos}$$

$$W_z = W_0 - W_3$$

$$W_z = 9.9341 - 9.824$$

$$W_z = 0.1101 \text{ gramos}$$

$$W = W_x + W_y + W_z$$

$$W = 0.0167 + 0.0339 + 0.1101$$

$$W = 0.1607 \text{ gramos}$$

Sustituyendo valores en la ecuación y considerando una constante  $K=8.76 \times 10^4$  y una densidad de  $2.7 \text{ gr/cm}^3$ .

$$\text{Velocidad de Corrosión} = \frac{K \times W}{A \times T \times D}$$

$$\text{Velocidad de Corrosión} = \frac{(8.76 \times 10^4) \times (0.1607)}{3.8939 \times 720 \times 2.7}$$

$$\text{Velocidad de Corrosión} = \frac{14077.32}{7569.7416}$$

$$\text{Velocidad de Corrosión} = 1.8596 \text{ milímetros por año}$$

Obteniéndose con esto la velocidad de corrosión para esta y sucesivamente para cada una de las probetas.

En la tabla No. 4.6 se muestra la masa pérdida en gramos (W) para cada espécimen, donde se puede observar valores marcados en amarillo que representan que hubo ganancia de masa en la muestra, siendo en las primeras muestras retiradas (168 horas) donde se presenta este aumento así como en el pesaje realizado después del primer ciclo de limpieza.

A su vez en la Tabla No. 4.7 se encuentran las velocidades de corrosión en milímetros por año para las doce muestras de este experimento.

**Tabla No.4.6. Pesos de las muestras después de retiradas del ambiente corrosivo y de ser limpiadas, para la obtención de la masa total perdida durante el experimento.**

Muestra	W <sub>o</sub> (gr)	W <sub>1</sub> (gr)	W <sub>x</sub> (gr)	W <sub>2</sub> (gr)	W <sub>y</sub> (gr)	W <sub>3</sub> (gr)	W <sub>z</sub> (gr)	W <sub>f</sub> (gr)	W (gr)
1	9.9341	9.9174	0.0167	9.9002	0.0339	9.824	0.1101	9.7734	0.1607
3	8.1225	8.0987	0.0238	8.1072	0.0153	8.1036	0.0189	8.0645	0.058
4	9.5829	9.5849	-0.002	9.5842	-0.0013	9.5833	-0.0004	9.5866	-0.0037
5	8.524	8.5296	-0.0056	8.5263	-0.0023	8.5242	-0.0002	8.5321	-0.0081
6	8.8505	8.801	0.0495	8.7992	0.0513	8.7268	0.1237	8.626	0.2245
9	8.3495	8.3087	0.0408	8.3019	0.0476	8.2223	0.1272	8.1339	0.2156
12	8.7648	8.7703	-0.0055	8.7676	-0.0028	8.7652	-0.0004	8.7735	-0.0087
15	8.9249	9.0143	-0.0894	8.8048	0.1201	8.5635	0.3614	8.5328	0.3921
16	8.9938	8.9279	0.0659	8.919	0.0748	8.8184	0.1754	8.6777	0.3161
17	9.3418	9.4615	-0.1197	9.2523	0.0895	9.0293	0.3125	9.0595	0.2823
18	8.4669	8.5632	-0.0963	8.3108	0.1561	8.1572	0.3097	8.0974	0.3695
19	9.4898	9.504	-0.0142	9.4755	0.0143	9.2172	0.2726	9.2171	0.2727

\*El signo negativo indica que hubo ganancia de masa en las muestras.

**Tabla No.4.7. Velocidades de corrosión para las muestras sometidas en agua residual de Aluminio 356.**

Muestra	W (gr)	Área (cm <sup>2</sup> )	T (horas)	Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	K	Velocidad de Corrosión (mm/año)
1	0.1607	3.8939	720	2.7	87600	1.8596
3	0.058	3.966	720			0.6589
4	0.0037	3.7984	168			0.1881
5	0.0081	3.9828	168			0.3927
6	0.2245	3.9879	720			2.5367
9	0.2156	3.8278	2160			0.8460
12	0.0087	3.942	168			0.4262
15	0.3921	3.8435	4320			0.7661
16	0.3161	4.0118	2160			1.1835
17	0.2823	3.9154	4320			0.5414
18	0.3695	3.9014	4320			0.7112
19	0.2727	3.988	2160			1.0271

Como se sabe que el componente mayoritario presente en la aleación, es el aluminio, que se trata de un metal muy activo, como se deduce de su posición en la serie electroquímica de potenciales normales de electrodo, pero se pasiva por exposición al aire ó al agua. Godard y sus colaboradores [25] sugirieron que el producto inicial de la corrosión del aluminio en un ambiente acuoso es el hidróxido de aluminio:



Posteriormente, se originará un óxido hidratado ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ). El aluminio resiste la corrosión, en medio neutro, pero se corroe con rapidez, en medio alcalino. Según el diagrama de Pourbaix para el aluminio, la capa de óxido superficial formada según la reacción (1), es estable a temperatura ambiente para valores de pH entre 4 y 8,5. Sin embargo el Aluminio en presencia de bacterias presenta corrosión es por lo que al formarse la capa de bacterias sobre la muestra puede generar la presencia de corrosión y la respectiva pérdida del material.

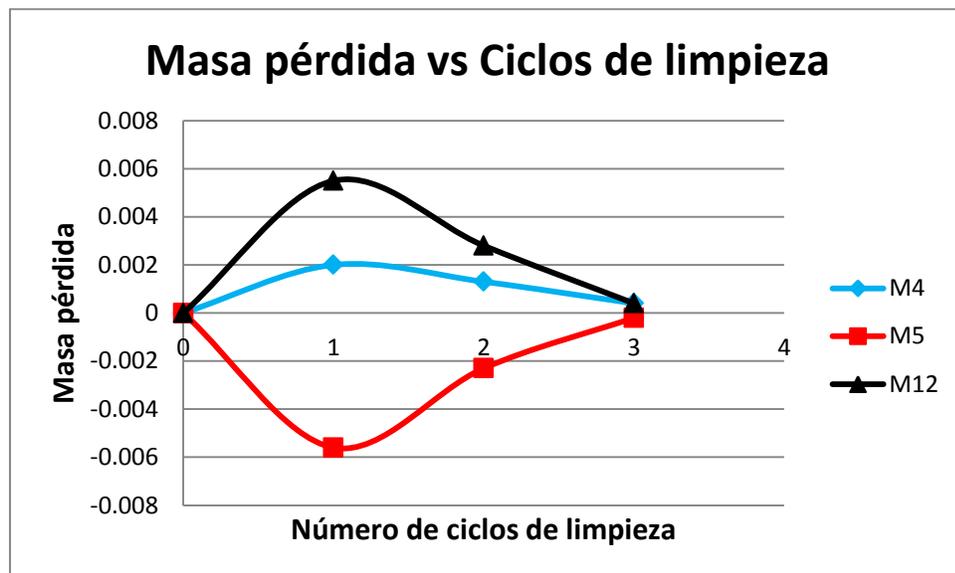
Como se puede observar en la Tabla No. 4.7 las mayores velocidades de corrosión se presentaron en la probeta número uno, seis, dieciséis y diecinueve. Y en las muestras cuatro, cinco y doce expuestas por 168 horas y en las cuales se presentó ganancia de masa son las que presentan menor velocidad de corrosión.

Un clásico al respecto, *Metals in Wastewater Treatment*, William H. Ailor [83], respecto al Aluminio informa lo siguiente:

Un número de metales estructurales fueron expuestos en dos localidades de la corriente de flujo de una planta de tratamiento de aguas residuales municipales. Los metales de la prueba incluyeron varias aleaciones de aluminio, acero dulce, acero bajo carbono, acero inoxidable tipo 304, titanio y zinc. Las exposiciones durante un período de 1 año se hicieron en el punto de toma de aguas residuales sin tratar y en la descarga del efluente después del tratamiento. La velocidad más baja de corrosión medida en aguas residuales sin

tratar era 0.002 mpy para el acero inoxidable y la tasa más alta era 3.345 mpy para el acero dulce. Para los aluminios fue de 0.007 mpy para el metal de alta pureza y de 0.181 mpy para la aleación que contiene cobre (2036). El acero de baja aleación mostró una tasa de 2.055 mpy y el zinc una razón de 0.016 mpy. Ningún material mostró ninguna pérdida sustancial en las propiedades de tensión como resultado de la exposición. Los aluminios en general se pican después de 1 año de aguas residuales sin tratar. La exposición de 1 año en el efluente con mucho cloro fue más agresiva hacia los aluminios que el agua residual cruda.

Suplementariamente se muestra en las siguientes figuras los valores graficados de la pérdida de masa contra el número de ciclos de limpieza, pudiendo observarse como se mencionó anteriormente que en algunas de las muestras hubo en un principio ganancia de peso, tal es el caso de la muestras retiradas a las 168 horas, debido a que en la superficie se depositó una capa de microorganismos durante la exposición de las muestras a la solución de agua residual, pero una vez realizadas las limpiezas a las probetas se logró ver la pérdida de peso que hubo en cada espécimen.



**Figura No. 4.28. Gráfica de la masa pérdida de las muestras 4, 5 y 12 resultante de los Ciclos repetitivos de limpieza. Muestras retiradas a las 168 horas.**

En las figuras 4.28 los valores negativos de la muestra 5 representan la ganancia de peso que se presentó este experimento. Siendo en un principio el mayor aumento de masa y decayendo conforme seguían los ciclos de limpieza.

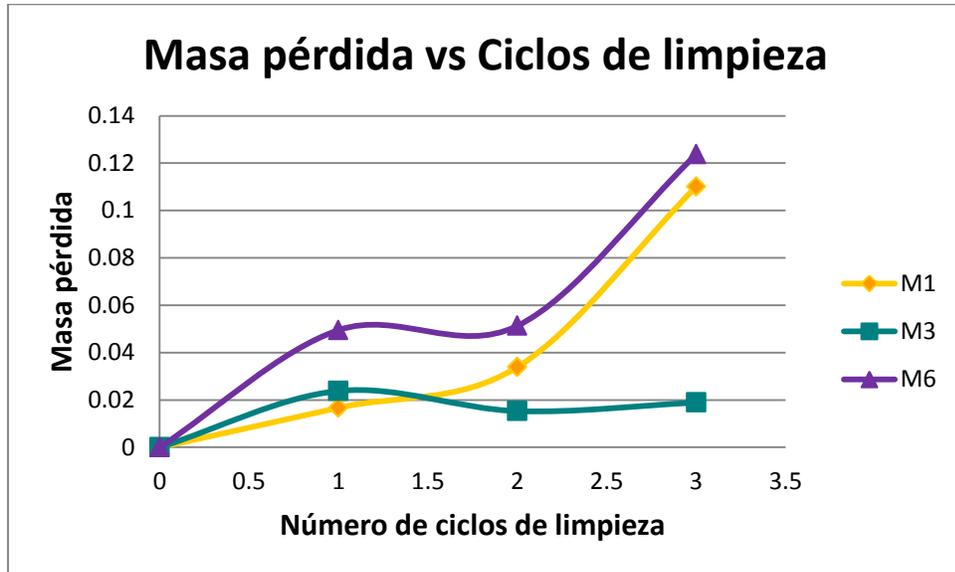


Figura No. 4.29. Gráfica de la masa pérdida de las muestra número 1, 3 y 6 resultante de los Ciclos repetitivos de limpieza. Muestras retiradas a las 720 horas.

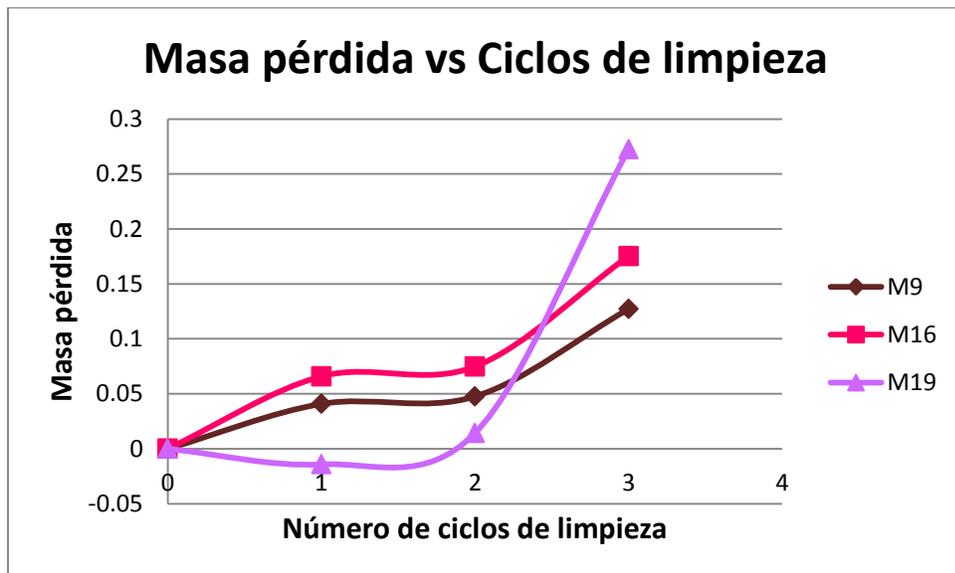
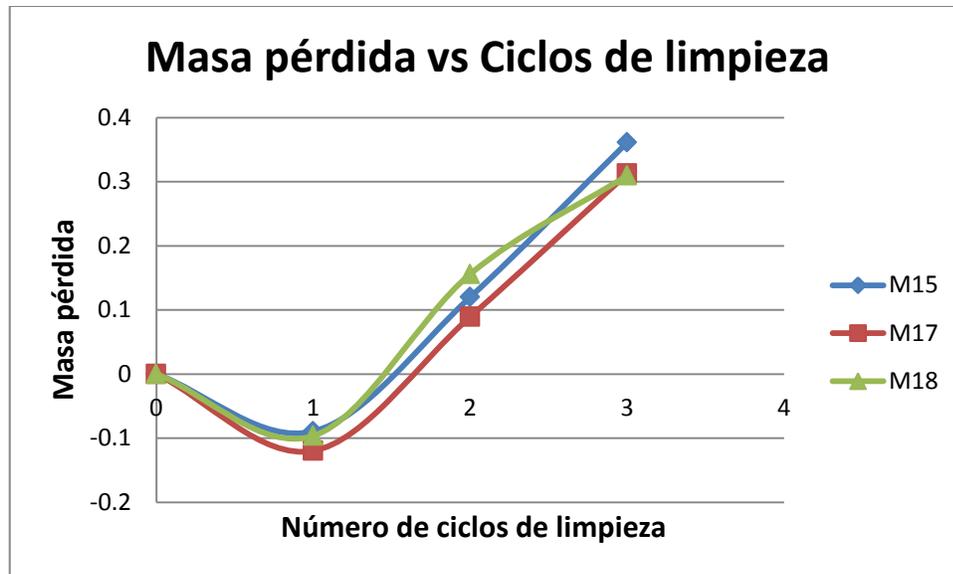


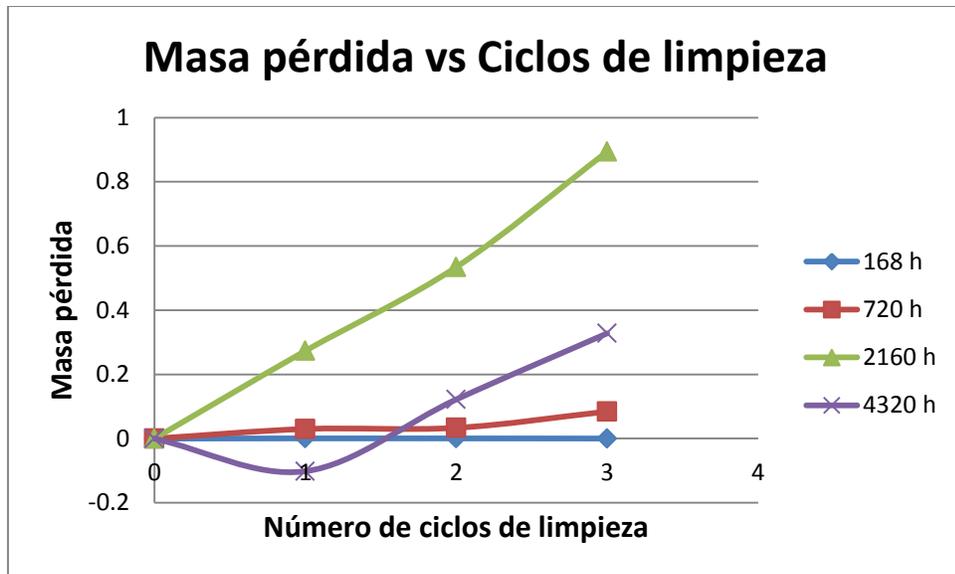
Figura No. 4.30. Gráfica de la masa pérdida de las muestras 9, 16 y 19 resultante de los Ciclos repetitivos de limpieza. Muestras retiradas a las 2160 horas.



**Figura No. 4.31. Gráfica de la masa pérdida de las muestras 15, 17 Y 18 resultante de los Ciclos repetitivos de limpieza. Muestra retirada a las 4320 horas.**

En la muestra número quince la pérdida de masa se presenta hasta el segundo ciclo de limpieza como lo podemos observar en la gráfica 4.35

Al igual que en la muestra quince, las muestras diecisiete, dieciocho y diecinueve presentan en el primer ciclo de limpieza un aumento de masa y hasta el segundo ciclo se presenta la disminución en la misma.



**Figura No. 4.32. Gráfica de los promedios de masa perdidos en cada tiempo de retirada.**

En la figura anterior podemos observar el promedio de las masas perdidas para cada periodo de tiempo de retirada en este experimento, se puede observar que el período de 168 horas la pérdida de masa fue muy similar en los tres ciclos de limpieza. A su vez se observa que a las 2160 horas fue donde se obtuvo la mayor pérdida de masa, inclusive mayor a las muestras sometidas al más largo tiempo de exposición de este experimento, que fue de 4320 horas.

# Conclusiones.

- Se desarrolló un método de manufactura de una pieza monolítica de una aleación de aluminio, que evita la infiltración del agua, es resistente al desgaste y a la corrosión en su ambiente de trabajo.
- Se realizó la Simulación del proceso de llenado y solidificación de la pieza con la ayuda el Software comercial ProCast obteniéndose buenos resultados.
- El primer prototipo y el robot definitivo fueron ensamblados y probados en el campo con éxito.
- Se realizó la prueba de corrosión por pérdida de masa, retirando probetas a diferentes períodos de tiempo pudiéndose observar que las muestras sufrieron velocidades de corrosión desde los 0.4262 hasta los 2.5367 mm/año en el período de la prueba, mostrando que el aluminio bajo las condiciones de aguas residuales se corroe.

# Referencias

- [1] R.Colás, E Velasco y S. Valtierra “Castings”. Handbook of Aluminum Vol. 1, Physical and Metallurgy Processes, En G Totten y D Mackenzie (editores), Marcel Dekker, Nueva York, EUA, 2003.
- [2] ASM International Metals Handbook. Properties and selection nonferrous alloys and special purpose materials. Handbook Committee. USA. V2. 1990.
- [3] Fernández, C. Y Flores, N. Microestructura y propiedades mecánicas a la tracción de la aleación A356, colada en arena y utilizando molde gasificable. U.C.V. Venezuela, p. 8-16, 1990.
- [4] León, J. Efecto del antimonio en la microestructura y las propiedades mecánicas a la tracción de la aleación de aluminio A356.2. U.C.V. Venezuela, p. 26-27, 1982.
- [5] Gargano, J. Y Lebón, G. Efecto del Na y P en las estructuras de solidificación de las aleaciones Al-Si. U.C.V. Venezuela, p. 26-27, 1982.
- [6] Hernández, I. Y Villarroel, D. Propiedades mecánicas y tratamientos térmicos de las aleaciones para fundición de los sistemas Al-Si-Cu y Al-Si-Mg. U.C.V. Venezuela, p. 4, 1982.
- [7] McDonald, S, Nogita, K Y Zindel J. W. Materials Transaction V42, p. 1981 (2001). Eutectic solidification mode in sodium modified Al-7 mass%Si-3, 5 mass%Cu- 0, 2 mass%Mg casting alloys.
- [8] Dahle, A.K. Y Nogita K. Materials Characterization V46, p. 305 (2001). Eutectic solidification in hypoeutectic Al-Si alloys: electron backscatter diffraction analysis.
- [9] D.G. Eskin, K.L. Suyitno, Progress in Materials Science, 49, (2004).

- [10] E. L. Rooy "Casting, ASM Handbook, Vol. 15, ASM, Metals Park, Ohio, EUA, 1988.
- [11] S. Shankar. A Study of the Interface Reaction Mechanism between Molten Aluminum and Ferrous Die Materials, Ph.D. Worcester Polytechnic Institute, (2000).
- [12] Liu, W. Y Yeh J. Metallurgical and Materials Transaction A 27A, p. 3558 (1996). The cracking mechanism of silicon particles in an A357 aluminum alloy.
- [13] Gruzleski, J.E. Y Mohanty P.S. Acta mater. 44(9), p. 3749 (1996). Grain refinement mechanisms of hypoeutectic Al-Si alloys.
- [14] Gómez Moyeda Ernesto. "Tecnología de las arenas de moldeo". Instituto Tecnológico de Saltillo. México. 1997.
- [15] "Chemically bonded core and molds", American Foundry Society. EUA, 1987.
- [16] Clyde Anton Sanders. "Foundry sand practice". American Colloid Company Bulletin. EUA, 1960.
- [17] García Sosa Víctor. "Tecnología del control de las arenas". México. 2008.
- [18] "ASM casting handbook", Vol. 15, 2nd Edition, E.U.A, 1992.
- [19] "Manual de entrenamiento para el proceso de caja fría". Delta-HA. México. 2001.
- [20] "Sandbindersystems". Foundry Management Technology. Penton Publication. E.U.A. 1989.
- [21] Castro García Pablo. "Proceso de corazones Nematik". Nematik S.A. México. 1997.
- [22] Velázquez García J P. "Curso de arena y corazones", Nematik S.A. México. 2007

- [23] “Core manufacturing”. HidroAluminium Deutschland GmbH. Germany. 2003.
- [24] KuhsBernd. “Inorganic binder formulations”. Germany. 2005.
- [25] Torres Torres Carlos. “Sistemas de aglutinación química”. Instituto Tecnológico de Saltillo. México. 1997.
- [26] El proceso Ashland”. Ashland Chemical México. México. 1999.
- [27] Guajardo Hernández P. “Penetración de aluminio en los moldes de arena sílica unidos por un sistema de cold box”. Tesis de Maestría. UANL, FIME. México. 2006.
- [28] S. Strobl, “Good Gatings Leads to Good Castings”, Modern Casting, EUA, 2002.
- [29] Esparza C. E., Ríos R. Z., Guerrero M. P., Optimización del Diseño de un Sistema de Alimentación en el Proceso de Producción de Piezas Automotrices.
- [30] S.A. Kori \*, T.M. Chandrashekharaiyah, Studies on the dry sliding wear behaviour of Hypoeutectic and eutectic Al–Si alloys, R & D Centre, Department of Mechanical Engineering, Basaveshwar Engineering College, Bagalkot 587102. August 2006.
- [31] B. S. Murty, S. S. Kori, K. Venkateshwralu, R. R. Bhat, and M. Chakraborty: J. Mater. Process. Technol., 1999, 89–90, 152–158.
- [32] Metcalf& Eddy (1995). Ingeniería de Aguas Residuales: Tratamiento, vertido y reutilización. 3ª ed. Madrid: McGrawHill. Vol. 1. 505 p.
- [33] Torres Lozada, Patricia; Foresti, Eugenio y Vazoller, Rosana (1996). Composición y uso de agua residual doméstica en reactores a escala de laboratorio. En: Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 25 - AIDIS. Consolidación para el desarrollo. México, D.F.

- [34] Departamento de Ingeniería Química. (2000). Guía de laboratorio de aguas residuales. Universidad Valencia-España.
- [35] DIN-Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN 38412). Laborkläranlage OECD Confirmatory-Test. Alemania. Institut für Biologische Verfahrenstechnik. Alemania.
- [36] Morcillo, M. and E. Almeida, Corrosión Atmosférica del Aluminio, en Corrosión y Protección de Metales en las Atmósferas de Iberoamérica, M. Morcillo, et al., Editors. 1998, CYTED: Madrid. p. 591.
- [37] Morcillo, M., Protección del Aluminio en la Atmósfera mediante Recubrimientos de Pintura, en Corrosión y Protección de Metales en las Atmósferas de Iberoamérica, M. Morcillo, et al., Editors. 2002, CYTED: Madrid. p. 293.
- [38] Szklarska-Smialowska, Z., Pitting corrosion of aluminum. Corrosion Science, 1999. 41(9): p. 1743-1767.
- [39] Galvele, J.R., Transport Processes in Passivity Breakdown .2. Full Hydrolysis of the Metal-Ions. Corrosion Science, 1981. 21(8): p. 551-579.
- [40] Thompson, G.E., P.E. Doherty, and G.C. Wood, Observations of flaws on preconditioned aluminum surfaces. Journal of The Electrochemical Society, 1982. 129(7): p. 1515-1517.
- [41] Janikczachor, M., G.C. Wood, and G.E. Thompson, Assessment of the processes leading to pit nucleation. British Corrosion Journal, 1980. 15(4): p. 154-161.
- [42] González Fernández, J.A., Control de la Corrosión: Estudio y Medida por Técnicas Electroquímicas. 1989, Madrid: CSIC. 524.
- [43] Bohm, S., et al., Novel environment friendly corrosion inhibitor pigments based on naturally occurring clay minerals. Materials and Corrosion-Werkstoffe Und Korrosion, 2001. 52(12): p. 896-903.

- [44] Hinton, B.R.W., D.R. Arnott, and N.E. Ryan, The inhibition of aluminum-alloy corrosion by cerouscations. *Metals Forum*, 1984. 7(4): p. 211-217.
- [45] Poindexter, J.D., *Corrosion: Fundamentals, Testing and Protection*. ASM Handbook. Vol. 13A. 2003: ASM International.
- [46] Aramaki, K., Preparation of self-healing protective films on a zinc electrode treated in a cerium (III) nitrate solution and modified with sodium phosphate and cerium (III) nitrate. *Corrosion Science*, 2004. 46(6): p. 1565-1579.
- [47] Sinko, J., Challenges of chromate inhibitor pigments replacement in organic coatings. *Progress in Organic Coatings*, 2001. 42(3-4): p. 267-282.
- [48] Cook, R.L. and S.R. Taylor, Pigment-derived inhibitors for aluminum alloy 2024-T3. *Corrosion*, 2000. 56(3): p. 321-333.
- [49] R. A. Mohammed 1, M. Abdulwahab, I. A. Madugu, J. O. Gaminana, F. Asuke, Inhibitive effect by natural *Cyperusesculentus* L. oil on the corrosion of A356.0-type Al-Si-Mg alloy in simulated seawater environment, 1Department of Metallurgical and Materials Engineering, Ahmadu Bello University, Zaria, Nigeria, (2012).
- [50] Ralston, K.D., et al., Corrosion inhibition of aluminum alloy 2024-T3 by aqueous vanadium species. *Journal of The Electrochemical Society*, 2008. 155(7): p. C350-C359.
- [51] Rosales, A., Cardozo, J., "Prácticas de laboratorio de estabilidad de materiales", Universidad Simón Bolívar (publicaciones técnicas), Venezuela, 2003.
- [52] <http://chemistry.huji.ac.il/>, apuntes de la página WEB oficial del Instituto de Química de Jerusalén.
- [53] Hernández, M. A., "Técnicas electroquímicas aplicadas al estudio de la corrosión de una aleación Al-Zn-In en función de la concentración de NaCl",

Tesis de maestría en Ingeniería Química Metalúrgica, UNAM, Facultad de Química, 2001.

[54]“Técnicas electroquímicas para el control y estudio de la corrosión”, editor Juan Genesca Llongueras, México, D. F.: UNAM, Programa Universitario de Materiales, 2002.

[55] Saavedra, J. J., “Estudio de la corrosión por métodos electroquímicos de acero estructural 1010 causada por una mezcla de microorganismos anaerobios”, Tesis de Maestría en Microbiología, UNAMF. E.S.C., México, 1998.

[56] Graver, R., Moreland, P.J., “A literature review of polarization resistance constant (B) values for the measurement of corrosion rate”, NACE, Houston, 1985.

[57] M.M. Haque, A. Sharif, Study on wear properties of aluminium-silicon piston alloy, J. Mater. Process. Technol. 118 (2001) 69–73.

[58] N. Saheb, T. Laoui, A.R. Daud, M. Harun, S. Radiman, R. Yahaya, Influence of Ti addition on wear properties of Al–Si eutectic alloys, Wear 249 (2001) 656–662.

[59] R. Shivanath, P.K. Sengupta, T.S. Eyre, Wear of aluminium-silicon alloy, Br. Foundrymen 79 (1977) 349–356.

[60] A.D. Sarkar, Wear of aluminium-silicon alloys, Wear 31 (1975) 331–343.

[61] J. Clarke, A.D. Sarkar, Wear characteristics of as-cast binary aluminium silicon alloys, Wear 54 (1979) 7–16.

[62] B.N. Pramila Bai, S.K. Biswas, Characteristics of dry sliding wear of Al–Si alloys, Wear 120 (1987) 61–74.

[63] T.S. Eyre, Wear characteristics of castings used in internal combustion engines, met. Technol. 11 (1984) 81–90.

- [64] A. Somi Reddy, B.N. Pramila Bai, K.S.S. Murthy, S.K. Biswas, Mechanism of seizure of aluminium-silicon alloys dry sliding against steel, *Wear* 181–183 (1995) 658–667.
- [65] A. Somi Reddy, B.N. Pramila Bai, K.S.S. Murthy, S.K. Biswas, Wear and seizure of binary Al–Si alloys, *Wear* 171 (1994) 115–127.
- [66] H. Torabian, J.P. Patak, S.N. Tiwari, Wear characteristics of Al–Si alloys, *Wear* 172 (1994) 49–58.
- [67] J.P. Pathak, S. Mohan, Abrasive wear characteristics of as cast aluminium silicon alloys sliding against corundum disc, *Indian Foundry J.* (1998) 1–9.
- [68] M. Harun, I.A. Talib, A.R. Daud, Effect of element addition on wear properties of eutectic aluminium-silicon alloys, *Wear* 194 (1996) 54–59.
- [69] A. Dasgupta, S.K. Bose, Effect of copper on the Tribological properties of Al–Si base alloys, *J. Mater. Sci. Lett.* 14 (1995) 1661–1663.
- [70] A.J. Clegg, A.A. Das, The influence of structural modification on the wear resistance of a hypereutectic aluminium-silicon alloy, *Br. Foundryman* (1977) 333–349.
- [71] A.D. Sarkar, *Wear of Metals*, Pergaman Press, England, 1976, 50–160.
- [72] D.E. Lozano, R.D. Mercado-Solis, A.J. Perez, J. Talamantes, F. Morales, M.A.L. Hernandez-Rodriguez, Tribological behaviour of cast hypereutectic Al–Si–Cu alloy subjected to sliding wear, Universidad Autónoma de Nuevo León, FIME and NEMAK S.A de C.V, Mexico. (2008).
- [73]. John E. Gruzleski y Bernard M. Closset, "The Treatment of Liquid Aluminum-Silicon Alloys", The American Foundrymen's Society, Inc., pp. 1-59, 75-77, 127-140, 149, 1990.

- [74]. Rafael Colas, Eulogio Velasco y Salvador Valtierra, "Castings". George E. Totten y D. Scott MacKenzie, "Handbook of Aluminum, Vol. 1, Physical Metallurgy and Processes", Marcel Dekker, Inc., pp. 591-593, 602, 2003.
- [75]. Robert Howard, Neils Bogh y D. Scott MacKenzie, "Heat Treating Processes and Equipment", "Handbook of Aluminum, Vol. 1, Physical Metallurgy and Processes", Marcel Dekker, Inc., pp. 881-916, 920, 2003.
- [76]. Lennart Backerud, Guocai Chai y Jarmo Tamminen, "Solidification Characteristics of Aluminum Alloys, Volume 2, Foundry Alloys", AFS/SKANALUMINIUM, 1990.
- [77]. R. Trivedi y W. Kurz, "Solidification of Single-Phase Alloys", "ASM Handbook Vol. 15: Casting", ASM Internacional, pp. 244-256, 1992.
- [78]. Marcos I. Z. Cardoso, "Análisis de la solidificación de los precipitados de Cu en la aleación de aluminio A319", Tesis de Maestría, Instituto Tecnológico de Saltillo, pp. 25 - 28, 2006.
- [79]. Efren A. Carrera, "Estudio de la influencia del Sr y los parámetros de envejecimiento sobre las propiedades mecánicas de una aleación Al-Si con 2.5% de Cu", Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, pp. ,2006.
- [80]. John Campbell, "Castings", Butterworth-Heinemann, pp 267-306, 1991.
- [81]. M. C. Flemings, T. Z. Kattamis, B. P. Bardes. "Dendrite Arm Spacing in Aluminum Alloys". AFS Transactions, pp. 91-176.
- [82]. Douglas A. Granger "Solidification of Eutectic Alloys: Aluminum-Silicon Alloys", "ASM Handbook Vol. 15: Casting", ASM Internacional, pp. 348-370, 1992.
- [83]. Metals in Wastewater Treatment, William H. Ailor, Journal of the Environmental Engineering Division 100 (2) 295-309 (1974).