



# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

### **FABRICACIÓN DE UN MATERIAL FUNCIONALMENTE GRADUADO MEDIANTE LA MÁQUINA DE COLADO CENTRÍFUGO HORIZONTAL DEL LABORATORIO DE FUNDICIÓN DE LA ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO  
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**JOFFRE ANDRÉS POZO TRUJILLO**

**[joffre.pozo@epn.edu.ec](mailto:joffre.pozo@epn.edu.ec)**

**DIRECTOR: FAUSTO HERNÁN OVIEDO FIERRO**

**[fausto.oviedo@epn.edu.ec](mailto:fausto.oviedo@epn.edu.ec)**

**Quito, agosto 2022**

## CERTIFICACIONES

Yo, JOFFRE ANDRÉS POZO TRUJILLO declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



**JOFFRE ANDRÉS POZO TRUJILLO**

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por JOFFRE ANDRÉS POZO TRUJILLO, bajo mi supervisión.



**FAUSTO HERNÁN OVIEDO FIERRO**  
**DIRECTOR**

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Joffre Andrés Pozo Trujillo', written in a cursive style.

**JOFFRE ANDRÉS POZO TRUJILLO**

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a mis padres Silvio Pozo y Gladys Trujillo por siempre ayudarme haciendo hasta lo imposible para ello, por su apoyo, sus palabras de aliento y por enseñarme a nunca rendirme.

A todas las personas que confiaron y siempre creyeron en mí, que de una u otra forma me han ayudado a lo largo de esta gran travesía de mi vida.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios todo poderoso por todas sus bendiciones a lo largo de esta gran travesía, por darme salud, vida y sabiduría para lograr culminar este trabajo.

Eternamente agradecido con mis padres por su apoyo incondicional, sin ellos no hubiera sido posible nada.

A la Facultad de Ingeniería Mecánica, a los ingenieros Fausto Oviedo y Luis Huilca, por la guía y contribución brindado para lograr culminar este trabajo.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	V
RESUMEN.....	VII
ABSTRACT.....	VIII
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....	1
1.1 Objetivo general.....	2
1.2 Objetivos específicos.....	2
1.3 Alcance.....	2
1.4 Marco teórico.....	2
1.4.1 Estado del arte.....	2
1.4.2 Material funcionalmente graduado.....	3
1.4.3 Matrices metálicas más utilizadas en FGM.....	4
1.4.4 Características del proceso de fundición de aluminio.....	4
1.4.5 Propiedades del carburo de silicio.....	5
1.4.6 Tipos de desgasificantes y fundentes para fundición de aluminio.....	5
1.4.6.1 Desgasificante.....	5
1.4.6.2 Fundente.....	5
1.4.7 Características del molde de fuerza centrífuga.....	6
1.4.8 Procesos de colado por fuerza centrífuga.....	6
1.4.8.1 Métodos de fuerza centrífuga.....	6
1.4.8.2 Métodos de colado por fuerza centrífuga.....	6
1.4.9 Aplicaciones de los materiales funcionalmente graduados.....	7
2 METODOLOGÍA.....	7
2.1 Inspección de los equipos para la fabricación del FGM.....	8
2.1.1 Inspección del Equipo Stir Casting.....	8
2.1.2 Inspección de la máquina de colado centrífugo horizontal.....	10
2.2 Equipos e insumos para la fabricación del FGM.....	10
2.2.1 Horno a gas.....	10
2.2.2 Equipo Stir Casting.....	11
2.2.3 Máquina de colado centrífugo horizontal.....	11
2.2.4 Secador.....	12
2.2.5 Tacómetro Digital.....	12

2.2.6	Termocupla .....	13
2.2.7	Pirómetro Digital .....	13
2.2.8	Matriz de Aluminio .....	14
2.2.9	Partículas de refuerzo cerámicas de SiC.....	14
2.2.10	Fundente.....	14
2.2.11	Desgasificante .....	15
2.2.12	Afinador (tibor).....	15
2.3	Determinación de los parámetros .....	15
2.3.1	Matriz de aluminio .....	16
2.3.2	Tamaño de las partículas cerámicas de SiC .....	16
2.3.3	Temperatura de la matriz de Al-Si .....	17
2.3.4	Porcentaje en peso de las partículas de refuerzo de SiC .....	17
2.3.5	Temperatura de precalentado del molde centrífugo.....	17
2.3.6	Frecuencia-Velocidad del Stir Casting.....	18
2.3.7	Frecuencia-Velocidad máquina centrífuga .....	18
2.3.8	Resumen de parámetros para la formación del FGM con partículas de SiC... .....	18
2.4	Proceso para la fabricación del FGM.....	18
2.4.1	Recepción y almacenamiento .....	19
2.4.2	Fusión .....	19
2.4.3	Secado.....	20
2.4.4	Mezclado.....	21
2.4.5	Centrifugado .....	21
2.4.6	Material funcionalmente graduado con partículas de SiC.....	22
2.5	Caracterización del FGM.....	22
2.5.1	Preparación de las probetas .....	22
2.5.1.1	Corte .....	22
2.5.1.2	Desbaste .....	23
2.5.1.3	Empastillado .....	23
2.5.1.4	Desbaste Empastillado .....	23
2.5.1.5	Lijado .....	23
2.5.1.6	Pulido.....	24
2.5.2	Ensayo de Metalográfico.....	25
2.5.2.1	Sin ataque químico.....	25
2.5.2.2	Con ataque químico .....	25
2.5.3	Ensayo de Microdureza Vickers.....	26
2.5.4	Costos de la fabricación del material funcionalmente graduado.....	27

2.5.4.1	Costos de reparación y reacondicionamiento de las máquinas.....	27
2.5.4.2	Costo de insumos.....	28
2.5.4.3	Costo Total .....	28
3	RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	28
3.1	Resultados .....	28
3.1.1	Material funcionalmente graduado Al 365.0/SiC/6p .....	29
3.1.2	Metalografía.....	29
3.1.2.1	Sin ataque químico.....	29
3.1.2.2	Con ataque químico .....	33
3.1.3	Ensayo de microdureza Vickers.....	37
3.2	Conclusiones .....	40
3.3	Recomendaciones.....	42
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	43
5	ANEXOS .....	45
	ANEXO I. PLANO DEL AGITADOR. ....	45
	ANEXO II. ANÁLISIS DE GRANULOMETRÍA LÁSER. ....	46
	ANEXO III. INFORME DE RESULTADOS DEL ENSAYO DE MICRODUREZA VICKERS. ....	47

## RESUMEN

El presente proyecto tiene como finalidad fabricar un material funcionalmente graduado (FGM) de matriz de aluminio con refuerzo de partículas de carburo de silicio (SiC). La fabricación del FGM se lo realizará teniendo en cuenta parámetros específicos como la velocidad de rotación del molde, temperatura de la matriz, tamaño de las partículas de SiC (malla #320), porcentaje en peso de las partículas y temperatura de precalentamiento del molde; una vez que se definan dichos parámetros, se procederá a fabricar el FGM con ayuda de un horno a gas, un equipo Stir Casting y la máquina de colado centrífugo que se encuentran disponibles en el laboratorio de fundición de la Escuela Politécnica Nacional. Para el proceso, se realizará una fundición de 5000 g compuesta por: matriz de aluminio, partículas de SiC, fundente, desgasificante y el afinador de grano. El proceso inicia fundiendo la matriz de aluminio, después agregando el fundente y el desgasificante, para escorificar la colada, finalmente se insertan las partículas de SiC progresivamente, que serán mezcladas con ayuda de la máquina Stir Casting manteniendo una temperatura aproximada de 750°C, para después verter la colada (compuesta por la matriz Al y el SiC) en la máquina de colado centrífugo horizontal que debe estar previamente precalentada y puesta a marcha a una velocidad de 1000 rpm, que dará como resultado un tubo funcionalmente graduado. Se caracterizará el material mediante probetas obtenidas del tubo fabricado a través de un análisis metalográfico para verificar si se trata de un FGM y finalmente realizar un ensayo de microdureza.

**PALABRAS CLAVE:** Material funcionalmente graduado, colado centrífugo, análisis metalográfico, microdureza.

## ABSTRACT

The present project aims to fabricate a functionally graded material (FGM) of aluminum matrix with silicon carbide (SiC) particle reinforcement. The FGM will be manufactured taking into account specific parameters such as mold rotation speed, matrix temperature, SiC particle size (#320 mesh), particle weight percentage and mold preheating temperature; once these parameters are defined, the FGM will be manufactured with the help of a gas furnace, a Stir Casting equipment and the centrifugal casting machine available at the foundry laboratory of the National Polytechnic School. For the process, a 5000 g casting will be made, consisting of: aluminum matrix, SiC particles, flux, degassing agent and the grain refiner. The process starts by melting the aluminum matrix, then adding the flux and the degassing agent, to slag the casting, then the SiC particles are added progressively, which will be mixed with the help of the Stir Casting machine maintaining a temperature of approximately 750°C, to then pour the casting (composed by the Al matrix and the SiC) in the horizontal centrifugal casting machine that must be previously preheated and started up at a speed of 1000 rpm, which will result in a functionally graduated tube. The material will be characterized by means of specimens obtained from the fabricated tube through a metallographic analysis to verify if it is a FGM and finally perform a micro hardness test.

**KEYWORDS:** Functionally graded material, centrifugal casting, metallographic analysis, microhardness.

# 1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

La finalidad del proyecto es fabricar un material funcionalmente graduado (FGM) con partículas cerámicas de refuerzo de Carburo de Silicio (SiC) mediante el proceso de colado centrífugo horizontal, para poder caracterizar un FGM en la metalografía se debe apreciar las tres fases características de este tipo de material y su cambio en la estructura para que pueda ser considerado como un material funcionalmente graduado. El proceso de colado centrífugo horizontal es accesible, económico y el más usado para la fabricación de FGMs los cuales tienen varias aplicaciones a nivel industrial.

Se revisó la literatura de los materiales funcionalmente graduados donde se tratan temas de gran importancia como la clasificación, proceso de fabricación y aplicaciones en el campo industrial. Por lo general los materiales funcionalmente graduados trabajan con matrices de aluminio, cobre, titanio, magnesio y níquel, para el presente proyecto se utilizó una matriz de aluminio 365.0 debido a que el aluminio posee propiedades como: alta resistencia, alto módulo específico, buena resistencia al desgaste y bajo coeficiente de expansión térmica, además de ser la matriz más común para la fabricación de FGMs, en cuanto a las partículas cerámicas de refuerzo más utilizadas a nivel de investigación e industriales son: Carburo de silicio (SiC), Alúmina ( $Al_2O_3$ ), Óxido de silicio ( $SiO_2$ ), entre muchas otras. Las partículas que se utilizaron son de carburo de silicio (SiC) ya que son accesibles a nivel comercial, de bajo costo y dan al material un buen incremento en cuanto a sus propiedades mecánicas, con un tamaño de malla #320. Para lograr disminuir cantidad de escoria y porosidades se utilizó el fundente Alufundex y el Desgasificante Apartagas H7 que la industria Juval recomienda para fundiciones de aluminio y sus aleaciones. Para el proceso de fundición del aluminio se utilizó el horno a gas con un crisol móvil. La mezcla de las partículas cerámicas con la fundición de aluminio se la realizará dentro del crisol a una temperatura de  $750^{\circ}C$ , mediante la máquina Stir Casting durante 3 minutos, una vez que se haya mezclado se procederá a verter el material en la máquina de colado centrífugo, tomando en cuenta que previamente se debe precalentar el molde a una temperatura de  $240^{\circ}C$ , con una velocidad de giro de 1000 rpm de esta manera se obtendrá un tubo FGM que podrá ser retirado de la máquina una vez enfriado completamente. Del tubo mencionado se cortarán dos anillos de 1.5 cm de los cual se obtendrán probetas para realizar la posterior caracterización del material mediante el método metalográfico donde se podrá evidenciar el gradiente de distribución que caracteriza a un FGM y también se realizará un ensayo de microdureza en el que se podrá evidenciar la variación de las propiedades mecánicas debido a la adición de partículas de SiC.

## **1.1 Objetivo general**

Obtener un material funcionalmente graduado mediante el método de colado centrífugo horizontal del laboratorio de fundición de la Escuela Politécnica Nacional.

## **1.2 Objetivos específicos**

1. Realizar una revisión del estado del arte sobre el método de colado centrífugo.
2. Determinar los parámetros adecuados para la fabricación del FGM.
3. Verificar la viabilidad de la obtención de este tipo de materiales en el Laboratorio de Fundición.

## **1.3 Alcance**

La fabricación de un material funcionalmente graduado con matriz de aluminio y refuerzo de partículas cerámicas de carburo de silicio mediante colado centrífugo horizontal de molde permanente permitirá obtener tubos sin costura de diversos espesores donde tendrá un aumento en las propiedades mecánicas, la fabricación de este tipo de materiales debe ser accesible tanto para proyectos de investigación como para el sector industrial. La caracterización se hará mediante un análisis metalográfico donde se podrá evidenciar el gradiente de distribución de las partículas cerámicas a lo largo de la dirección radial del corte transversal del tubo funcionalmente graduado, además de poder evidenciar el cambio en las propiedades mecánicas en la microdureza del material cuando se refuerza con partículas de SiC.

## **1.4 Marco teórico**

### **1.4.1 Estado del arte**

La constante evolución de los materiales día a día se debe a la necesidad de satisfacer las necesidades del mercado que va incrementado los requerimientos de mejora continua, por ende, demandan de mejores propiedades en los materiales. En el pasado los ingenieros buscaban fabricar materiales con poca o ninguna variación en sus propiedades, pero con el pasar del tiempo y debido a las necesidades de la industria se desarrollaron los materiales compuestos para satisfacer a las industrias aeroespaciales, automovilística y en el área biomédica, en las que se necesita un cambio gradual en su composición, estructura y de sus propiedades [1]. De esta manera surgen los materiales funcionalmente graduados en el año 1972, los cuales tienen una variación gradual en sus propiedades mecánicas, térmicas y en sus características volumétricas para poder ser utilizados en diversas aplicaciones. La idea de los FGM se diseñó inicialmente para materiales resistentes al calor y a cargas externas, con el tiempo estos materiales han sido utilizados para controlar la deformación, la presión, el desgaste y la corrosión [1]. En las últimas décadas, debido al crecimiento de la industria los FGMs han mostrado un gran

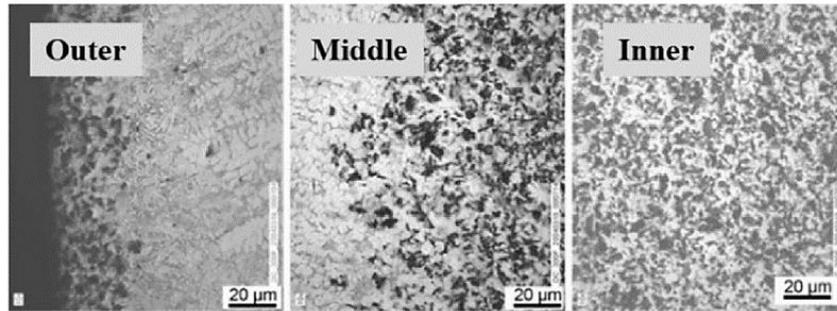
crecimiento, las propiedades graduadas no son nuevas se las puede encontrar en la naturaleza, algunos ejemplos de estructura funcionalmente graduados son parte del cuerpo humano como huesos, dientes y la piel tienen graduación en sus propiedades de dureza y ductilidad [1].

La gran variedad de campos de aplicación ha contribuido significativamente al desarrollo de los FGMs apoyando en la investigación con una amplia variedad de proyectos, logrando un gran desarrollo en los últimos treinta años, gracias a los grandes avances tecnológicos se logró desarrollar varios métodos para la fabricación de FGMs tales como: los métodos de fuerza centrífuga, métodos de polvimetalurgia, métodos de deposición de vapor y los métodos de fabricación por aditivos [1].

#### **1.4.2 Material funcionalmente graduado**

Los FGMs son materiales compuestos de ingeniería avanzada que cuentan con una matriz metálica y un refuerzo cerámico con elevadas propiedades mecánicas permitiéndoles soportar ambientes extremos de trabajo, no pierden sus propiedades durante su operación debido a que cuentan con un gradiente de distribución estructural lo que los hace materiales de gran importancia para cumplir con las aplicaciones en donde el material es sometido a condiciones extremas [2]. El gradiente de composición estructural le permite mantener sus altas propiedades mecánicas permitiéndole mantener su funcionalidad óptima. La primera aplicación que se les dio a los FGMs fue la de soportar grandes temperaturas, con el pasar del tiempo estos materiales fueron tomando mayor importancia tanto así que los distintos campos apoyaron su investigación logrando su desarrollo, hoy en día son aplicados en áreas que requieran soportar ambientes corrosivos, de desgaste, de tracción y de altas presiones [1].

La fabricación de los FGMs depende del cumplimiento de una condición de gran importancia, la cual nos dice que la matriz y el refuerzo deben ser hidrofóbicos o hidrofílicos, es decir deben contar con una buena mojabilidad que les permita contar con una solubilidad adecuada para la mezcla, es de gran importancia ya que se requiere que las partículas de refuerzo cerámicas ingresen en la colada y no permanezcan flotando en la superficie [1, 2].



**Figura 1.4.1.** Gradiente de distribución de un FGM.

Fuente: [1].

### **1.4.3 Matrices metálicas más utilizadas en FGM**

Los metales que se ocupan para la elaboración de los FGMs son metales con porcentaje de aleaciones que le permite a la matriz adquirir propiedades idóneas para las distintas aplicaciones de ingeniería que se vayan a efectuar, es decir dependiendo el grado de requerimiento ya sean estas propiedades mecánicas o térmicas, también podrían ser ambas en cierto grado una mayor a otra. Los FGMs deben cumplir con las condiciones óptimas de operación, debido a que el material mejora sus propiedades mecánicas al adicionarle partículas de refuerzo debido a ello es importante la selección de su matriz [3].

La más utilizada es la matriz de aluminio dado a que cuenta con adecuadas propiedades mecánicas tanto de dureza, resistencia al desgaste, módulo específico y un bajo coeficiente de expansión térmica [1]. Si a la matriz de aluminio se le adiciona partículas de refuerzo el material funcionalmente graduado que se forma logra obtener propiedades de gran interés como la resistencia a altas temperaturas, un adecuado módulo de Young y una gran resistencia a la tracción. La fundición del Aluminio nos brinda un ahorro del 50% de masa muy importante en comparación con la función gris, esto se debe a su resistencia al desgaste, lo que hace a esta matriz idónea para la elaboración de FGMs que se utilizará en diversas áreas tanto de investigación, como a nivel industrial [3].

### **1.4.4 Características del proceso de fundición de aluminio**

En el proceso de fundición se debe tomar en cuenta distintas propiedades que distingue a cada una de las fundiciones para la fundición del aluminio tenemos:

- Los costos de mecanizado son bajos debido a que el producto final cuenta con una buena presentación.
- Tiene altas posibilidades de poder realizar tratamientos superficiales en él una vez terminado.
- Cuenta con una resistencia a la fatiga sobresaliente.

Como menciona G.E Totten [4] y Malgorzata [5], el elemento a fabricar dependiendo de su forma, tamaño, aleación y propiedades mecánicas a cumplir cada una de las características pueden variar.

Para el horno de fundición de aluminio debe contar con distintas características como:

Debe contar con un crisol que resista temperaturas superiores a 600°C que son las que se necesitan para fundir Aluminio.

La materia del crisol debe ser refractario o con cualidades de resistir temperaturas superiores a las del Aluminio.

Las paredes internas del crisol deben poseer un buen acabado para evitar que partículas que puedan presentarse se adhieran al material fundido.

#### **1.4.5 Propiedades del carburo de silicio**

El carburo de silicio (SiC) son partículas cerámicas de refuerzo muy comunes y ampliamente utilizadas en la producción de materiales compuestos, tiene alta resistencia térmica, dureza, al desgaste y a la corrosión. Son utilizadas como refuerzo en la matriz de aluminio para mejorar las características mecánicas y de desgaste para materiales funcionalmente graduados [6].

De las variables que juega un papel de gran importancia en cuanto a las propiedades mecánicas de FGM son el tamaño de las partículas que puede estar en el rango de 12,89 a 500  $\mu\text{m}$  y la fracción de 2,5 a 20% en peso [6].

#### **1.4.6 Tipos de desgasificantes y fundentes para fundición de aluminio**

##### **1.4.6.1 Desgasificante**

El desgasificantes nos ayuda a disminuir los poros que puedan generarse debido al proceso de fundición, humedad, óxidos en los elementos fundidos y al mantener a temperaturas muy elevadas [7]. Entre unos de los que se puede encontrar nos permite adquirir la industria metal química Galvano son: DEGASAL, DEGASAL R, DEGASAL F [8].

##### **1.4.6.2 Fundente**

El fundente crea una capa que protege sobre el metal fundido reduciendo la oxidación y minimizando la absorción de hidrógeno [7]. Entre unos de los que se puede encontrar que nos permite adquirir la industria metal química Galvano son: ITALPURO EXTRA, ITALPURO STD-M, ITALPURO STD e ITALPURO TRL [8].

### 1.4.7 Características del molde de fuerza centrífuga

El molde de fundición por fuerza centrífuga consta de una boquilla de entrada, guías, revestimiento y tapas de extremos. Es empleado de acuerdo con la forma y cantidad de material que se pretenda fundir [2].

El molde de la máquina de colado centrífugo del laboratorio de la Escuela Politécnica Nacional está formado por un tubo de acero A36 con una longitud de 60,96 cm, diámetro exterior de 12,54 cm y un diámetro interior de 9,98 cm. El acero A36 cuenta con propiedades como soportar altas temperaturas y presión, que son requeridas para el proceso de fundición por fuerza centrífuga [2].

### 1.4.8 Procesos de colado por fuerza centrífuga.

#### 1.4.8.1 Métodos de fuerza centrífuga

La fuerza centrífuga es uno de los principales parámetros para la fabricación de FGM, además que cuenta con características específicas que son apropiadas para múltiples aplicaciones industriales.

#### 1.4.8.2 Métodos de colado por fuerza centrífuga

El colado por fuerza centrífuga es un método de estado líquido, los parámetros que intervienen en el proceso son: la velocidad de rotación, la velocidad de alimentación, el precalentamiento del molde, tamaño de las partículas de refuerzo cerámico y la fracción de porcentaje en peso [1]. Se divide en los siguientes procesos:

#### Proceso de colado por fuerza centrífuga in situ

El proceso de colado por fuerza centrífuga in situ es un método en el que las partículas de refuerzo tienen lugar dentro de la matriz durante el proceso. Como primer punto se tiene la fundición de la matriz y se agregan las partículas cerámicas para ser mezcladas junto a la colada para homogenizar la mezcla como se puede observar en la figura 1.4.2 a, después se tiene que colar en la máquina de colado centrífugo para obtener el FGM como se observa en la figura 1.4.2 b [1,6].

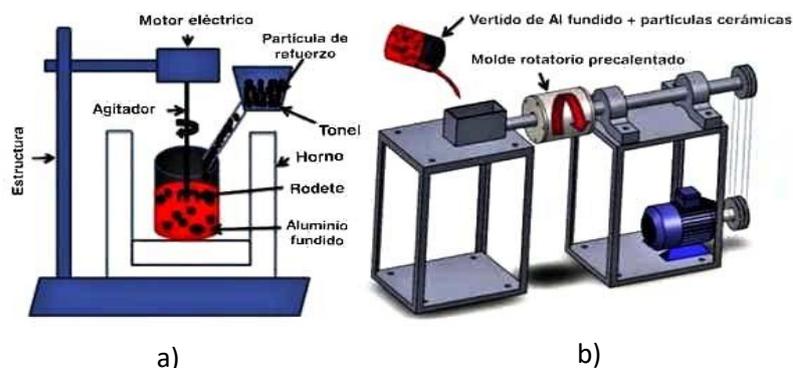


Figura 1.4.2. Proceso de colado por fuerza centrífuga

Fuente: [6].

## Método de colado por fuerza centrífuga con partículas sólidas o ex situ

Para producir un tubo con propiedades graduales, utiliza materiales de refuerzo con una temperatura de fusión superior a la temperatura de la matriz, es decir, las partículas permanecieron sólidas durante el proceso y se distribuyeron a lo largo de la dirección radial bajo la influencia de la fuerza centrífuga. Las partículas duras se distribuyen en la superficie exterior o interior de un tubo funcionalmente graduado, dependiendo de la densidad entre el metal base y las partículas [1].

### 1.4.9 Aplicaciones de los materiales funcionalmente graduados.

Los FGM son la solución ideal para la gran demanda de aplicaciones aeroespacial, automotrices, biomédicas, de defensa, energéticas, electrónicas, maquinarias y equipos, en donde se requiere construir elementos como se puede observar en la tabla 1.4.9, de alta dureza en el exterior y una alta ductilidad en el interior, que soporten trabajos a altas temperaturas sin perder sus propiedades [1,6].

**Tabla 1.4.9.** Aplicaciones de los materiales funcionalmente graduados.

Fuente: [1,6].

<b>Aplicaciones de los materiales funcionalmente graduados</b>		
<b>Aeroespaciales</b>	<b>Automotrices</b>	<b>Biomédicas</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Motores de cohetes.</li> <li>– Estructura de engranajes de naves espaciales.</li> <li>– Placas de intercambiadores de calor.</li> <li>– Estructuras como: reflectores, paneles solares, literas de cámaras, ruedas de turbinas, recubrimiento de palas de turbinas, cubiertas de nariz, y el borde frontal de los misiles y transbordadores espaciales.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Pistones y camisas de motores Diesel.</li> <li>– Cámaras de combustión.</li> <li>– Frenos de autos de carrera.</li> <li>– Ejes de transmisión.</li> <li>– Volantes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Implantes dentales.</li> <li>– Huesos artificiales para acelerar el crecimiento de los huesos y la prevención de pérdida ósea.</li> <li>– Reparar cartílagos.</li> </ul>
<b>Defensa</b>	<b>Energéticas y electrónicas</b>	<b>Maquinarias y equipos</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Placas de blindaje.</li> <li>– Chalecos antibalas.</li> <li>– Piezas defensivas como: varillas guía, rodillos de precisión, ejes, tubos, pestillos, alojamientos de ejes y percutores.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– En generadores de energía térmica.</li> <li>– Componentes de energía solar.</li> <li>– Dispositivos de conversión de energía.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Herramientas de corte.</li> <li>– Moldes de formación.</li> <li>– Quiques de motores de máquinas.</li> </ul>

## **2 METODOLOGÍA**

En el presente proyecto se fabricará un material funcionalmente graduado mediante la máquina de colado centrífugo del laboratorio de fundición de la Escuela Politécnica Nacional, como primer punto se procede con la revisión del estado de los equipos y siendo el caso de tener algún inconveniente su arreglo o adaptación de acuerdo con las necesidades que presenten, de esta manera se tendrá los equipos acondicionados y totalmente funcionales para el posterior desarrollo. Como siguiente punto la adquisición de instrumentos de medición e insumos necesarios entre ellos tenemos: tacómetro digital, termocupla, pirómetro digital, pistones de motor de combustión interna, partículas cerámicas de SiC malla #320, fundente, desgasificante y afinador de grano.

Para la determinación de los parámetros para la formación del FGM se tomó como referencia los trabajos de L.G. Huilca [3] y A. Garrido [10], de experimentos con muy buenos resultados que son de gran utilidad para el desarrollo de FGMs. Una vez elaborado el FGM se procederá a cortar dos anillos de aproximadamente 1,5 cm en la sección donde el tubo del FGM tenga mayor fusión, dado que los 5000 g de fundición no fueron suficientes para completar el molde de la máquina de colado centrífugo horizontal, de los dos anillos obtendremos las probetas a ser analizadas después de ser procesadas (desbastadas, lijadas y pulidas), en donde se podrá caracterizar al material a través de una metalografía, se realizará un ensayo de microdureza de la zona con mayor cantidad de partículas que será comparada con la zona sin partículas y una micrografía para identificar la microestructura del FGM.

### **2.1 Inspección de los equipos para la fabricación del FGM**

#### **2.1.1 Inspección del Equipo Stir Casting**

El equipo Stir Casting se encuentran en completo funcionamiento: el variador de frecuencia, el motor eléctrico y la estructura metálica. Sin embargo, la chumacera y el eje poseen óxidos y dificultad de movimiento, las aspas mezcladoras se encuentran totalmente desgastadas. Por lo que se procedió a reemplazar estos elementos por nuevos, se cambió el eje por uno de acero inoxidable para evitar la oxidación, se adquirió una nueva chumacera. Para las aspas mezcladoras se utilizó una ballesta de automóvil que fueron recalculadas de acuerdo con el crisol que se va a ocupar siguiendo el mismo proceso según G.A. Borona López [12].

La máquina Stir Casting consta de cuatro aspas planas de iguales dimensiones, las consideraciones que se tomarán serán la masa total que son 5000 g para fundir, las dimensiones del crisol que se muestra en la figura 2.1.1 y la ecuación 1, de esta manera podremos determinar la altura H de la siguiente forma:



**Figura 2.1.1.** Dimensiones del crisol arcilla-grafito #18.

**Fuente:** [12].

Masa total de la fundición:

$$m = \delta \times V \quad \text{Ec. 1}$$

Donde  $m$  representa la masa total de la fundición,  $\delta$  es la densidad aproximada del Al-Si reforzado con 6% de SiC y  $V$  es el volumen de la fundición obtenido de [12].

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

$$5000 [g] = 2,7 \left[ \frac{g}{cm^3} \right] \times \pi \times \left( \frac{18 \text{ cm}}{2} \right)^2 \times H$$

$$H = 22.86 \text{ cm} \approx 228.62 \text{ mm}$$

Para calcular las dimensiones de las aspas ocuparemos la Ecuación 2, Ecuación 3 y Ecuación 4, obtenidas de [12]. Las cuales son:

Diámetro de aspa a aspa;

$$\phi = 0.6D \quad \text{Ec. 2}$$

Altura del aspa:

$$b = 0.3D \quad \text{Ec. 3}$$

Distancia de la base del crisol a las aspas:

$$C = 0,2H \quad \text{Ec. 4}$$

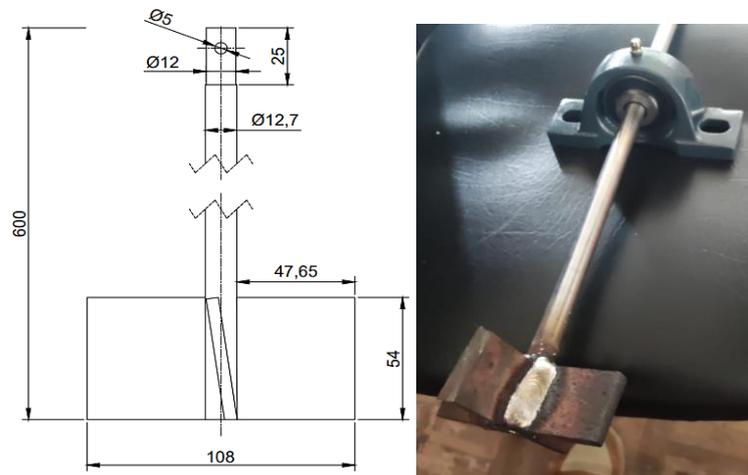
Donde  $D$  representa el diámetro del crisol,  $\phi$  representa la distancia punta a punta de las aspas,  $b$  es la altura del aspa,  $H$  es la altura de la fundición y  $C$  es la distancia del crisol a las aspas obtenido de G.A. Borona López [12].

$$\phi = 0.6D = 0,6 \times 180 \text{ mm} = 108 \text{ mm}$$

$$b = 0.3D = 0,3 \times 180 \text{ mm} = 54 \text{ mm}$$

$$C = 0,2H = 0.2 \times 228.62 \text{ mm} = 44.72 \text{ mm} \approx 45 \text{ mm}$$

Para la construcción tomaremos el ángulo de inclinación de  $75^\circ$  según G.A. Borona López [12] y se soldaron las aspas en el eje con electrodos de acero inoxidable como se puede observar en la figura 2.1.2 y en el plano que se adjunta en el Anexo I, para evitar el desgaste y la corrosión debido a las altas temperaturas del proceso de fundición.



**Figura 2.1.2.** Mezclador de acero inoxidable con aspas de acero ASTM 4340.

Fuente: [Propia].

### 2.1.2 Inspección de la máquina de colado centrífugo horizontal

La máquina de colado centrífugo horizontal se encuentra en perfecto estado y funcional, el rediseño y construcción por parte de la referencia [2], además de que fue acondicionada con un variador de frecuencia que facilita el control de la velocidad de giro.

## 2.2 Equipos e insumos para la fabricación del FGM

### 2.2.1 Horno a gas

El horno a gas tiene ventajas en comparación con otros hornos de ser más económico y de fácil manipulación. El horno a gas se puede observar en la figura 2.2.1, el cual cuenta con un sistema de sobrealimentación de aire que mejora el sistema de combustión y una tapa de un material refractario que ayuda a disminuir las pérdidas. Funciona con GLP, tiene un crisol móvil, funde Aluminio, alcanzando una temperatura máxima de  $1100^\circ\text{C}$  y tiene una capacidad de aproximadamente 7 kg de Aluminio [9].



**Figura 2.2.1.** Horno de gas del Laboratorio de fundición EPN.

**Fuente:** [Propia].

### **2.2.2 Equipo Stir Casting**

El equipo Stir Casting está conformado por una estructura metálica, motor eléctrico con variador de frecuencia y acoplado a un eje con aspas para la mezcla de la colada con las partículas de SiC, lo podemos observar en la figura 2.2.2.



**Figura 2.2.2.** Maquina Stir Casting del Laboratorio de fundición EPN.

**Fuente:** [Propia].

### **2.2.3 Máquina de colado centrífugo horizontal**

La máquina de colado centrífugo horizontal está conformado por un sistema de transmisión del eje, un molde de acero A36, motor eléctrico y un variador de frecuencia para poder controlar la velocidad de rotación, se lo puede observar en la figura 2.2.3, los parámetros óptimos para este equipo tenemos una temperatura de precalentamiento de 165 °C, temperatura de colado 801 °C, La temperatura promedio del molde 165-500 °C y una velocidad de rotación de aproximadamente 1198 rpm [2].



**Figura 2.2.3.** Máquina de colado centrífugo horizontal Laboratorio de fundición EPN.

**Fuente:** [Propia].

#### **2.2.4 Secador**

Debido al ambiente las partículas contienen humedad y debido al choque térmico que se pudo producir dado que las partículas de SiC se encuentran a temperatura ambiente, se consideró secarlas con la ayuda de la máquina para secar granos del laboratorio de fundición de la Escuela Politécnica Nacional la cual se puede observar en la figura 2.2.4.

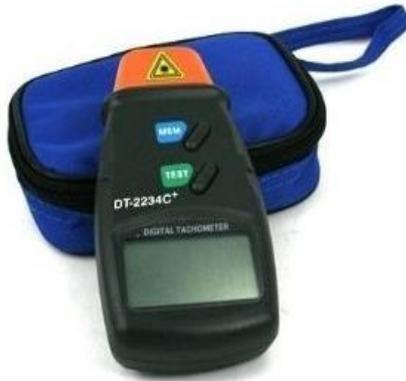


**Figura 2.2.4.** Secadora de grano laboratorio de Fundición EPN.

**Fuente:** [Propia].

#### **2.2.5 Tacómetro Digital**

El tacómetro digital se los puede observar en la figura 2.2.5, nos permitió medir la velocidad de rotación del eje de la máquina Stir Casting y de la máquina de colado centrífugo horizontal, dado que el controlador solo nos indicaba el valor en frecuencia, logrando obtener una tabla de valores de velocidad para los dos equipos lo que nos facilitará su uso.



**Figura 2.2.5.** Tacómetro digital.

**Fuente:** [Propia].

### **2.2.6 Termocupla**

La termocupla como se indica en la figura 2.2.6 nos permite medir la temperatura del interior de la colada dado que es de gran importancia para lograr mantener la temperatura de la colada de fundición ya que es uno de los parámetros para la fabricación de material funcionalmente graduado.



**Figura 2.2.6.** Termocupla del laboratorio de Fundición EPN.

**Fuente:** [Propia].

### **2.2.7 Pirómetro Digital**

El pirómetro nos permite medir la temperatura externa del molde de la máquina coladora centrífuga. Es de gran utilidad para el control de la temperatura de precalentado del molde y de esta manera se evitan los choques térmicos. El pirómetro que se utilizó es un Gm550 Indu, cómo se puede observar en la figura 2.2.7, con una capacidad de medición de -50°C hasta los 550°C.



**Figura 2.2.7.** Pirómetro Digital.

Fuente: [Propia].

### **2.2.8 Matriz de Aluminio**

Para la matriz de aluminio, para la fabricación del material funcionalmente graduado se la obtendrá de chatarra de pistones de motores de combustión interna que son aleaciones Al-Si de la serie ANSI AA 3xx.0, la cual es identificada a través de la norma ANSI H35.1 standards [11].



**Figura 2.2.7.** Pistones de aluminio para la fundición de la matriz.

Fuente: [Propia].

### **2.2.9 Partículas de refuerzo cerámicas de SiC**

Se utilizará como refuerzo partículas de SiC para la fabricación del material funcionalmente graduado. Debido a que son ampliamente utilizadas para la formación de materiales compuestos por mejorar las propiedades mecánicas y su resistencia al desgaste como menciona R.K. Verma [6].

### **2.2.10 Fundente**

Para este caso se utilizó como fundente el Alu Fundex Extra, como se puede observar en la figura 2.2.10, el cual es de uso común en el laboratorio de fundición de la Escuela Politécnica Nacional, según lo menciona A. Garrido [10], es de gran importancia para la

colada de aluminio fundido evitando los óxidos y la acumulación de gases como hidrógeno, dado que esos generan una gran cantidad de porosidades.



**Figura 2.2.10.** Fundente el Alu Fundex Extra.

**Fuente:** [Propia].

### **2.2.11 Desgasificante**

Se utilizó pastillas para desgasificar la colada de aluminio fundido conocido en el mercado como Apartagas se lo pude observar en la figura 2.2.11, es de gran ayuda en la eliminación de gases que se producen y quedan atrapados en el interior de la colada, es de uso común según A. Garrido [10].



**Figura 2.2.10.** Pastilla de Desgasificante Apartagas.

**Fuente:** [Propia].

### **2.2.12 Afinador (tabor)**

El afinador de grano permite disminuir el tamaño de grano cuando se encuentra el aluminio en proceso de solidificación, el afinador que se utilizó es KRM Al TIR 521 44595 01 00924 mtr, se lo puede observar en la figura 2.2.12.



**Figura 2.2.12.** Afinador de grano (tabor).

**Fuente:** [Propia].

## **2.3 Determinación de los parámetros**

Para poder determinar los parámetros de interés para la fabricación del material funcionalmente graduado se tomará en cuenta los trabajos realizados por L.G. Huilca [3], R.K. Verma [6] y A. Garrido [10], que nos brindan parámetros usados en procesos de formación de materiales funcionalmente graduados con excelentes resultados que permiten una selección de los más adecuados, tomando en cuenta que se pueden conseguir con los aparatos que se encuentran en el laboratorio de fundición de la EPN.

### 2.3.1 Matriz de aluminio

La matriz para la fabricación del material funcionalmente graduado la aleación ANSI AA 365.0 con un porcentaje 10,32% de Silicio, considerada según A. Garrido [10], con una composición química que se puede observar en la tabla 2.3.1, que se la puede encontrar en pistones de un motor de combustión interna que nos brinda una adición de silicio en su estructura. Tomando en cuenta que es igualmente accesibles y de bajo costo.

**Tabla 2.3.1.** Composición química de la matriz de aluminio ANSI AA 365.0.

Fuente: [10].

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

### 2.3.2 Tamaño de las partículas cerámicas de SiC

Las partículas cerámicas de refuerzo que se usarán son SiC malla #320 las cuales se puede apreciar en la figura 2.3.2, obtenidas del mismo proveedor de la referencia [10], son muy utilizadas para la formación de FGM, dado que provee de propiedades excepcionales, son de fácil accesibilidad y de bajo costo, previamente se realizó un análisis de granulometría para determinar el diámetro promedio de las partículas debido a que las partículas no presentan el mismo tamaño sino que varía como se puede observar en la tabla 2.3.2, se adjunta el informe de resultados en el Anexo II.



**Figura 2.3.2.** Partículas cerámicas de SiC malla #320.

Fuente: [Propia].

**Tabla 2.3.2.** Diámetros de las partículas de SiC mediante análisis de granulometría.

Fuente: [Propia].

Carburo de Silicio Malla #320			
Contenedor (ni)		Parámetros (di)	Diámetro de partículas (µm)
n10	0,1	d10	12,2
n50	0,5	d50	35,5
n60	0,6	d60	40,2
n80	0,8	d80	52,9
n90	0,9	d90	65,6

Para poder determinar el diámetro promedio de las partículas de SiC se lo realizará mediante la ecuación 5 obtenida de la referencia Vision Analytical Inc. [13], en la cual se ocupará los resultados del análisis de granulometría realizando de la siguiente manera:

Diámetro promedio de las partículas:

$$D = \frac{(\sum n_i d_i)}{N} \quad \text{Ec. 5}$$

$$N = \sum n_i$$

En donde D nos representa el diámetro promedio de las partículas,  $n_i$  es el tamaño del contenedor,  $d_i$  es el diámetro representativo de cada tamaño de la muestra y N es el recuento total del tamaño del contenedor.

$$D = \frac{(0,1)(12,2) + (0,5)(35,5) + (0,6)(40,2) + (0,8)(52,9) + (0,9)(65,6)}{0,1 + 0,5 + 0,6 + 0,8 + 0,9}$$

$$D = \frac{144,45}{2,9} = 49,81 \mu m$$

### 2.3.3 Temperatura de la matriz de Al-Si

La temperatura de la matriz de Al-Si es de 750°C tomada de la investigación realizada por L.G.Huilca [3], ya que en varios experimentos para la fabricación de materiales funcionalmente graduados se utiliza y resulta muy conveniente dado que si es posible mantener con el horno a gas del laboratorio de fundición de la EPN.

### 2.3.4 Porcentaje en peso de las partículas de refuerzo de SiC

Para el porcentaje en peso de las partículas de SiC se consideró los mejores resultados obtenidos de A. Garrido [10], que se dio a partir de un porcentaje en peso del 6% que es muy considerable para tener una mejor apreciación del gradiente en el material funcionalmente graduado.

### 2.3.5 Temperatura de precalentado del molde centrífugo

La temperatura de precalentamiento del molde de la máquina centrífuga es muy importante para evitar el choque térmico que tendrá por la temperatura de la colada, la que se consideró para este caso es de 240°C obtenida de [3], esta temperatura se la puede obtener con ayuda del mechero del laboratorio de fundición de la EPN.

### 2.3.6 Frecuencia-Velocidad del Stir Casting

Para poder mezclar las partículas de SiC de una forma adecuada y uniforme con la matriz de aluminio fundido se ocupará la máquina de Stir Casting, la cual debe girar a una velocidad de 500 RPM (18 Hz) agregar las partículas y aumentar progresivamente hasta 600 rpm (21.6 Hz) tomada de la investigación realizada por A. Garrido [10].

### 2.3.7 Frecuencia-Velocidad máquina centrífuga

La velocidad que se usará para la máquina de colado centrífugo será de 36.25 Hz (1000 rpm) que se encuentra dentro del rango óptimo para la fabricación un FGM [6].

### 2.3.8 Resumen de parámetros para la formación del FGM con partículas de SiC

Para la fabricación del material funcionalmente graduado con refuerzo de partículas cerámicas de SiC se usó los parámetros que se presentan en la tabla 2.3.8.

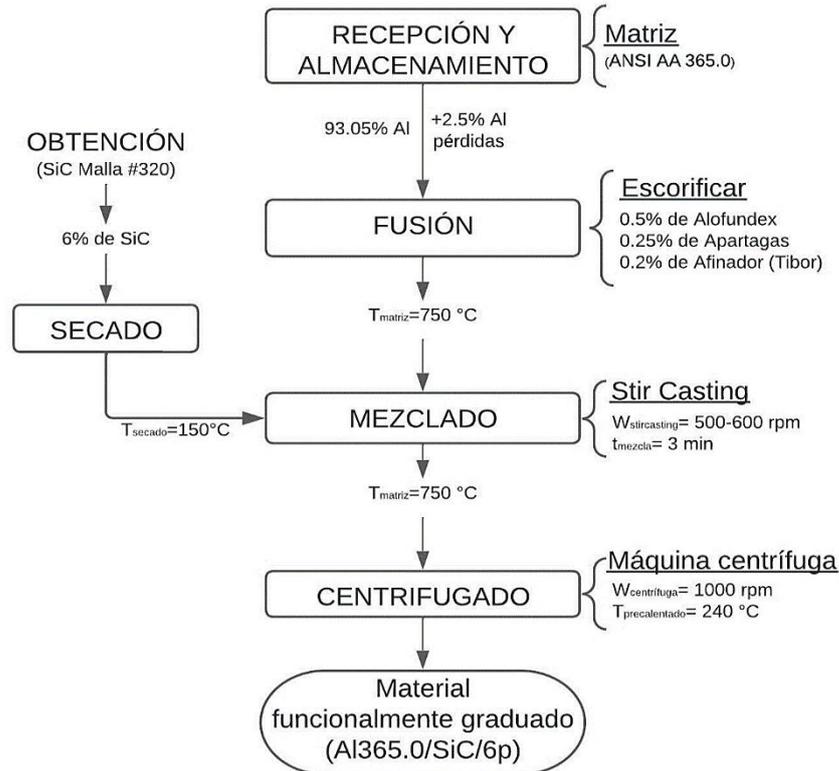
**Tabla 2.3.8.** Parámetros para la formación del FGM.

Fuente: [3,6,10].

<b>Parámetros para la formación del FGM</b>	
Matriz de Aluminio (Pistones)	ANSI AA 365.0
Partículas de SiC	Malla #320
Porcentaje en peso de las partículas de SiC	6%
Temperatura de la matriz de Al-Si	750 °C
Temperatura de precalentado del molde centrífugo	240 °C
Frecuencia-Velocidad del Stir Casting	18 Hz (500 rpm)-21.6 Hz (600 rpm)
Frecuencia-Velocidad máquina centrífuga	36.25 Hz (1000 rpm)

## 2.4 Proceso para la fabricación del FGM

El proceso que se llevará a cabo para la fabricación del material funcionalmente graduado se lo detalla a través del diagrama que se presenta en la figura 2.4.7, en donde se presenta secuencialmente el método de fabricación del FGM. La fundición que se va a realizar es de 5000 g en donde se incluye la matriz, las partículas de SiC, fundente, desgasificante y el afinador de grano. También se tomó en cuenta que va a existir pérdidas debido a la escoria que se va a producir para ellos se agregará un 2.5% en peso más de la matriz de aluminio-silicio de acuerdo criterio propio.



**Figura 2.2.7.** Diagrama del proceso para la fabricación de un FGM.

Fuente: [Propia].

Para poder determinar los porcentajes en peso que se agregarán de los insumos se tomarán las usadas según A. Garrido [10] detallados en la tabla 2.4, que tuvieron buenos resultados para la fundición en la eliminación de escoria y de los gases que se producen en el interior de la colada.

**Tabla 2.4.** Porcentaje en peso de cada insumo para la formación del FGM.

Fuente: [10].

Porcentaje de insumo para la formación del FGM	
Matriz ANSI AA 365.0	93.05%w
Partículas de SiC	6%w
Fundente	0.5%w
Gasificante	0.25%w
Afinador de grano	0.2%w

#### 2.4.1 Recepción y almacenamiento

En este proceso se realizará la recolección de los pistones que serán almacenados para su posterior uso cabe recalcar que es aluminio ANSI AA 365.0.

#### 2.4.2 Fusión

Antes del proceso de fundición se debe pesar 4777.5 g de aluminio de pistones (matriz), 300 g de partículas de SiC, 25 g de fundente, 12.5 g de gasificante y 10 g de afinador de grano.

Primero se debe encender el horno a gas, precalentarlo durante 15 minutos, después se debe ir agregando poco a poco los pistones como se puede apreciar en la figura 2.4.2, hasta que se funda en su totalidad, se debe eliminar la escoria que queda en las superficie de la colada antes de agregar el fundente el cual se lo recubre con papel periódico, se debe dejar actuar por un minuto, como siguiente paso se agrega el desgasificante y posterior a eso se añade el afinador tomando en cuenta que la temperatura debe mantenerse en 750°C.



**Figura 2.4.2.** Proceso de fundición de aluminio.

**Fuente:** [Propia].

### 2.4.3 Secado

Debido al ambiente las partículas pueden estar húmedas y esto puede afectar el proceso por lo que es necesario el secado con ayuda de la máquina secadora de grano a una temperatura de 150°C y durante 15 minutos se deja secar las partículas como se observa en la figura 2.4.3.



**Figura 2.4.3.** Proceso de secado de las partículas de SiC.

**Fuente:** [Propia].

#### 2.4.4 Mezclado

Se debe emparejar la máquina Stir Casting al horno a gas como se aprecia en la figura 2.4.4, la temperatura de la colada debe estar en los 750°C y se pone en marcha la máquina aumentando progresivamente hasta alcanzar una velocidad de 500 rpm (18 Hz) y se agregan las partículas de SiC solidariamente, una vez agregadas todas las partículas se aumenta la velocidad hasta una velocidad de 600 rpm (21.6 Hz) y se deja mezclar durante tres minutos.



**Figura 2.4.4.** Proceso de mezclado con la máquina Stir Casting.

**Fuente:** [Propia].

#### 2.4.5 Centrifugado

La máquina de colado por fuerza centrífuga horizontal debe ser precalentada previamente hasta una temperatura de 240°C y a una velocidad de 1000 rpm (36.25 Hz) como se puede observar en la figura 2.4.5. Se vierte la fundición en la máquina centrífuga de una manera progresiva y rápida para evitar la falta de fusión en el material funcionalmente graduado.



**Figura 2.4.5.** Proceso de centrifugado para la formación de un FGM.

**Fuente:** [Propia].

### 2.4.6 Material funcionalmente graduado con partículas de SiC

Finalmente se obtiene un tubo de material funcionalmente graduado con partículas cerámicas de SiC de denominación Al365.0/SiC/6p como se puede observar en la figura 2.4.6.



Figura 2.4.6. Tubo de FGM con partículas de SiC.

Fuente: [Propia].

## 2.5 Caracterización del FGM

### 2.5.1 Preparación de las probetas

#### 2.5.1.1 Corte

Una vez obtenido el tubo de FGM se cortará dos anillos de 1.5 cm a una distancia de 12.1 cm y 14.1 cm como se muestra en la figura 2.5.1, que son las zonas de interés que nos permitirá observar de qué forma se han ido distribuyendo las partículas de SiC a lo largo de la sección transversal del tubo funcionalmente graduado.

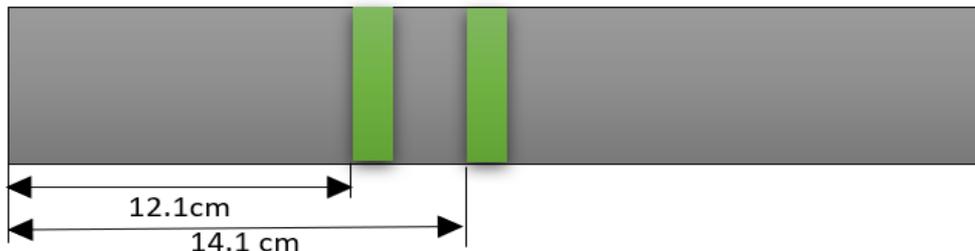


Figura 2.5.1. Distancia de corte del tubo de FGM.

Fuente: [Propia].

De los anillos se cortarán 16 probetas para análisis, como se puede observar en la figura 2.5.2, que serán empastilladas en resina poliéster para ser lijadas y pulidas en la máquina automática, esto nos ayudará a realizar el proceso más rápido y con mayor eficiencia que el método manual.



**Figura 2.5.2.** Probetas del FGM con partículas de SiC.

**Fuente:** [Propia].

### **2.5.1.2 Desbaste**

Desbaste con lija de lona N° 100 desbaste grueso de la probeta para acondicionar el tamaño para poder empastillar la probeta de forma adecuada.

### **2.5.1.3 Empastillado**

Para un correcto pulido de las probetas se deben empastillar mediante una mezcla de resina poliéster, mek y cobalto como se puede observar en la figura 2.5.3, de esta manera se facilita el proceso, ya que se puede ocupar la máquina automática.



**Figura 2.5.3.** Empastillado de las probetas.

**Fuente:** [Propia].

### **2.5.1.4 Desbaste Empastillado**

Una vez Empastillado se desbasta las probetas para que logren tener la medida adecuada para el molde de la máquina de pulido automática, esto se lo realiza con la lija de lona N° 100.

### **2.5.1.5 Lijado**

Se acoplan las probetas a la máquina automática y se le agregan lijas N° 150, 240, 320, 400, 600, 1200 y 2500 sucesivamente, el proceso se lo puede apreciar en la figura 2.5.4, una vez completado el proceso se lava con agua, se le agrega alcohol y son secadas con una secadora eléctrica para su posterior verificación, si se encuentran adecuadamente

lijadas se separan de las demás de no ser el caso se las vuelve a introducir en la máquina.



**Figura 2.5.4.** Proceso de lijado mediante la máquina automática Forcipol 2V con cabezal Forcimat.  
**Fuente:** [Propia].

### 2.5.1.6 Pulido

El pulido se lo realiza en la máquina automática como se puede observar en la figura 2.5.5, con paños de pulido de 3  $\mu\text{m}$ , 1  $\mu\text{m}$  y suspensión de diamante de 1  $\mu\text{m}$  como se puede apreciar en la figura 2.5.6, para obtener un pulido adecuado que permita una buena apreciación en el microscopio, una vez concluido se debe lavar las probetas con agua y un algodón solidariamente, se le agrega alcohol y se seca. El proceso se debe repetir hasta obtener una sección como espejo de no ser el caso se repite el proceso.



**Figura 2.5.5.** Proceso de pulido mediante la máquina automática Forcipol 2V con cabezal Forcimat.  
**Fuente:** [Propia].



**Figura 2.5.6.** Paño de pulido y suspensión de diamante de 1  $\mu\text{m}$ .

**Fuente:** [Propia].

## **2.5.2 Ensayo de Metalográfico**

### **2.5.2.1 Sin ataque químico**

Para el proceso de metalografía se lo realizo mediante un microscopio óptico Olympus GX41 del laboratorio de metalografía de la Escuela Politécnica Nacional como se puede observar en la figura 2.5.7, se pudo apreciar la microestructura del material formado en total de 16 probetas pulidas, tomando en consideración una misma línea de visualización para lograr apreciar el cambio que se produce en la microestructura a lo largo de su sección trasversal. Tomando en consideración que se realizó en secciones en donde se puede apreciar claramente y se logra distinguir la microestructura a un aumento de 100X y de 500X que nos permite observar gracias al software que incluye el microscopio, este proceso se lo realizo para cada una de las probetas.



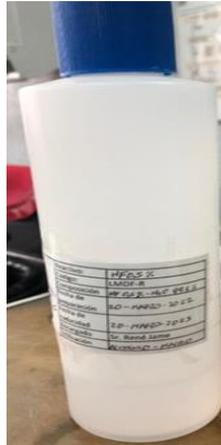
**Figura 2.5.7.** Microscopio óptico Olympus GX41.

**Fuente:** [Propia].

### **2.5.2.2 Con ataque químico**

Del total de las 16 probetas se seleccionó una por anillo con las mejores características y buena apreciación, se les realizó ataque químico con una solución de Acido fluorhídrico (HF) al 0.5%-H<sub>2</sub>O 99.95%, se la puede observar en la figura 2.5.8 se tomó de la referencia [13], cada una de las probetas es sumergida en la solución durante 10 segundos posterior se deben lavar con agua, agregar alcohol y secar. El ataque químico

mejora la apreciación de la metalografía para poder tener una mejor visualización de la microestructura.



**Figura 2.5.8.** Solución de HF 0.5%-H2O 99.95%.

**Fuente:** [Propia].

Una vez realizado el ataque químico se procede a realizar la metalografía mediante el microscopio óptico como se puede observar en la figura 2.5.9, en el proceso se tomó micrografías con un aumento de 100X y 500X, linealmente a lo largo de la sección transversal para apreciar los cambios que se han producido.



**Figura 2.5.9.** Visualización de la microestructura de las probetas ataque químico.

**Fuente:** [Propia].

### **2.5.3 Ensayo de Microdureza Vickers**

Para el proceso de microdureza Vickers se lo realiza con indentaciones muy pequeñas que para realizarla se debe usar el microscopio. El indentador que se uso es una pirámide de diámetro recto con una base cuadrada, con un ángulo entre las caras de 136°, para este ensayo la cara debe estar correctamente pulida ya que la visualización es

de mucha importancia. El procedimiento del ensayo se basó a partir de las normas ASTM E92-16 y ASTM E384-17 que es para ensayos de microdureza.

Los parámetros que se van a ocupar para el ensayo es una carga de 50 gf (el rango de valores que nos indica la norma es de 1 gf hasta 120 gf), con un tiempo de aplicación de 15 segundos (la norma nos indica un rango de valores de tiempo de entre 10 a 15 segundos). Determinados los parámetros se realizará el ensayo mediante un microdurómetro DUROLINE-M, marca METKON el cual se lo aprecia en la figura 2.5.10 del laboratorio de Metalografía, desgaste y falla de la Escuela Politécnica Nacional.



**Figura 2.5.10.** Equipo DUROLINE-M para el ensayo de microdureza Vickers.

Fuente: [Propia].

## 2.5.4 Costos de la fabricación del material funcionalmente graduado

### 2.5.4.1 Costos de reparación y reacondicionamiento de las máquinas

Para la máquina Stir Casting algunos elementos se reemplazaron por nuevos debido a que se encontraban oxidados, el costo y la cantidad de elementos ocupados se especifican en la tabla 2.5.4, sin considerar la mano de obra del mecanizado del eje y de la soldadura, dado que se realizó en los laboratorios de Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional.

**Tabla 2.5.4.** Costos de reparación y reacondicionamiento de las maquinas.

Fuente: [Propia].

Elemento	Cantidad	Costo unitario USD	Costo USD
Eje de acero inoxidable $\varnothing 1\frac{1}{2}$ "	1.00	5.00	5.00
Chumacera para eje de $\varnothing 1\frac{1}{2}$ "	1.00	1.00	15.00
Electrodos MG 629 E312 1/8"	0.50	20.60	10.30
Perno de acero inoxidable M10 1.50X45	2.00	0.61	1.22
Arandelas de acero inoxidable 3/8 (K-230 unid)	2.00	0.15	0.30
<b>TOTAL</b>			<b>31.82</b>

### 2.5.4.2 Costo de insumos

Para la fabricación del material funcionalmente graduado se requiere algunos insumos los cuales fueron adquiridos y se los representa en la tabla 2.5.5, la cantidad que se adquirió y el costo.

**Tabla 2.5.5.** Costos de los insumos.

Fuente: [Propia].

Elemento	Cantidad	Costo unitario USD	Costo USD
Pistones de Aluminio	15.00	1.21	18.15
Partículas cerámicas de SiC malla #320	5.00	6.00	30.00
Fundente para aluminio	2.00	4.96	4.96
Pastillas de Desgasificante	2.00	12.30	12.30
Tanque de gas de 40 kg	1.00	75.00	75.00
Paño azul 1 $\mu$ m	1.00	45.00	45.00
<b>TOTAL</b>			<b>185.41</b>

### 2.5.4.3 Costo Total

En la tabla 2.5.6, se presenta el costo total para la fabricación del material funcionalmente graduado, tomando en cuenta los costos de arreglo y acondicionamiento de las máquinas, además de la compra de los insumos.

**Tabla 2.5.6.** Costo total para la fabricación del material funcionalmente graduado.

Fuente: [Propia].

Costos	Valor USD
Costos de reparación y reacondicionamiento de las máquinas	31.82
Costos de insumos	185.41
<b>VALOR TOTAL</b>	<b>217.23</b>

## 3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 3.1 Resultados

Se analizará en tubo de material funcionalmente graduado obtenido por el proceso de colado por fuerza centrífuga con denominación Al 365.0/SiC/6p, de las 16 probetas obtenidas se seleccionó 2, una por cada anillo que se les realizó ataque químico para tener una mejor visualización de la microestructura del material y analizar su cambio. Además, se podrá comprar la microdureza a lo largo de la sección transversal que se obtendrá del ensayo.

### 3.1.1 Material funcionalmente graduado Al 365.0/SiC/6p

Se obtuvo un tubo de material funcionalmente graduado con denominación Al 365.0/SiC/6p con un diámetro exterior de 9.98 cm, un espesor de 0.86 cm y una longitud de aproximadamente 56.3 cm, de la cual 48.6 cm cuenta con una estructura adecuada como se puede observar en la figura 3.1.1. La sección restante del tubo tiene una fusión inadecuada debido a que los parámetros al momento de colar pudieron verse afectados por el ambiente y por la cantidad de aluminio fundido.



**Figura 3.1.1.** Tubo FGM con refuerzo de partículas de SiC malla #320.

**Fuente:** [Propia].

Al realizar el corte de los dos anillos a una distancia de 12.1 y 14.1 cm respectivamente, se pudo observar que la sección transversal cuenta con una cantidad excesiva de porosidades uniformemente distribuidas una vez pulidas se puede apreciar más el detalle cómo se puede observar en la figura 3.1.2, esto pudo ocurrir debido a reacciones químicas producidas en la colada o a una falta de limpieza y eliminación de gases. Las porosidades presentes pueden causar inconvenientes en la visualización de la microestructura del material.

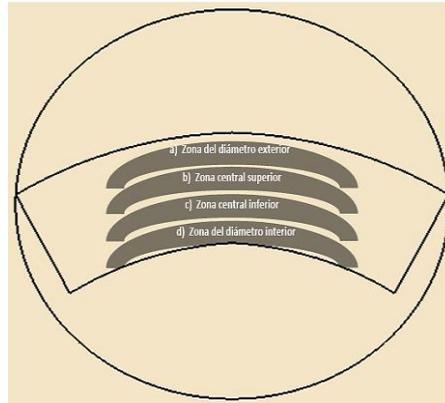


**Figura 3.1.2.** Porosidades en la sección transversal del tubo de FGM.

**Fuente:** [Propia].

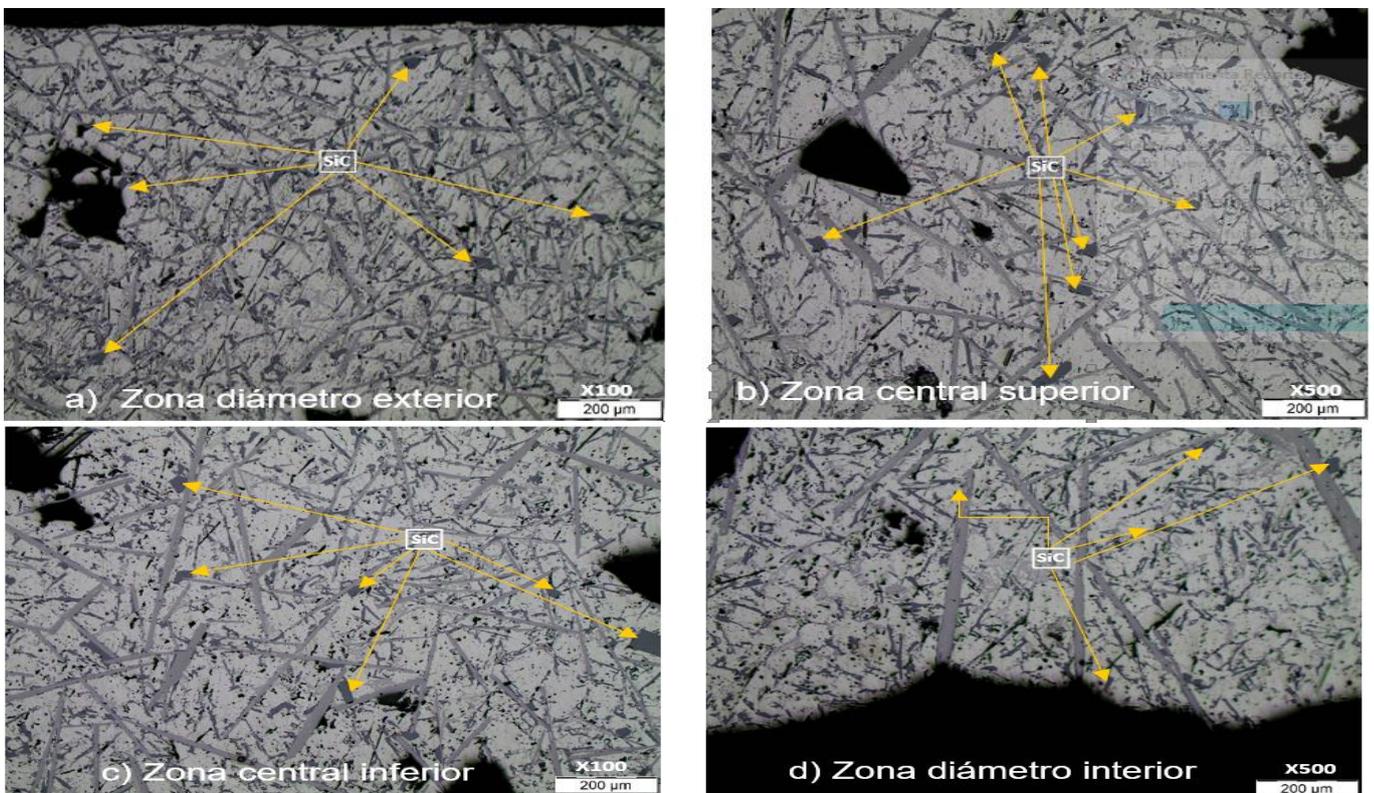
### 3.1.2 Metalografía

#### 3.1.2.1 Sin ataque químico



**Figura 3.1.3.** Zonas en la probeta de FGM.

Fuente: [Propia].

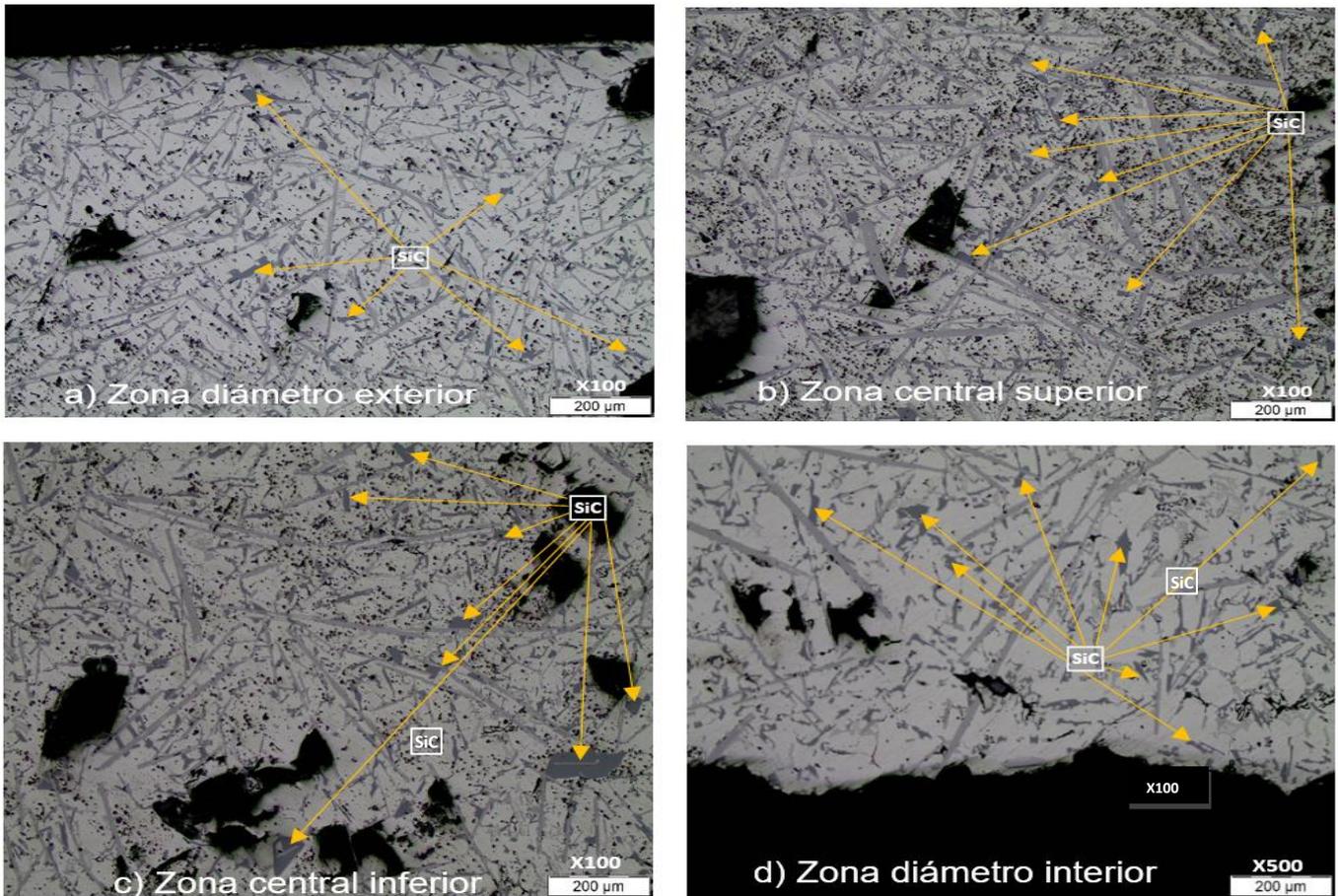


**Figura 3.1.4.** Metalografía a 100X del gradiente de distribución a lo largo de la sección transversal de la probeta de FGM anillo 1.

Fuente: [Propia].

Las metalografías sin ataque químico obtenidas fueron tomadas en las zonas representadas en la figura 3.1.3, las partículas de SiC tienen una forma de poliedro irregular de color gris oscuro, formando el gradiente de distribución característico de los FGMs a lo largo de la sección transversal como se puede observar en la figura 3.1.4. Desde la zona del diámetro exterior (figura 3.1.4a) hasta la zona central en donde se puede notar que existe una acumulación de partículas (figura 3.1.4b y figura 3.1.4c), los microconstituyentes incrementan a medida que nos acercamos a la zona del diámetro interior (figura 3.1.4d), tomando en cuenta que las partículas de SiC han reaccionado con

los elementos aleantes pertenecientes a la matriz formando constituyentes. La distribución de las partículas se dio debido a la fuerza centrífuga tomando en cuenta que fue menor a la óptima estipulada por el fabricante, debido a ello no se tuvo una distribución adecuada de las partículas a lo largo de la sección transversal del tubo funcionalmente graduado acumulándose en la zona central las partículas con mayor tamaño, en cambio en la zona del diámetro exterior se presenta una pequeña acumulación de partículas con un tamaño menor.



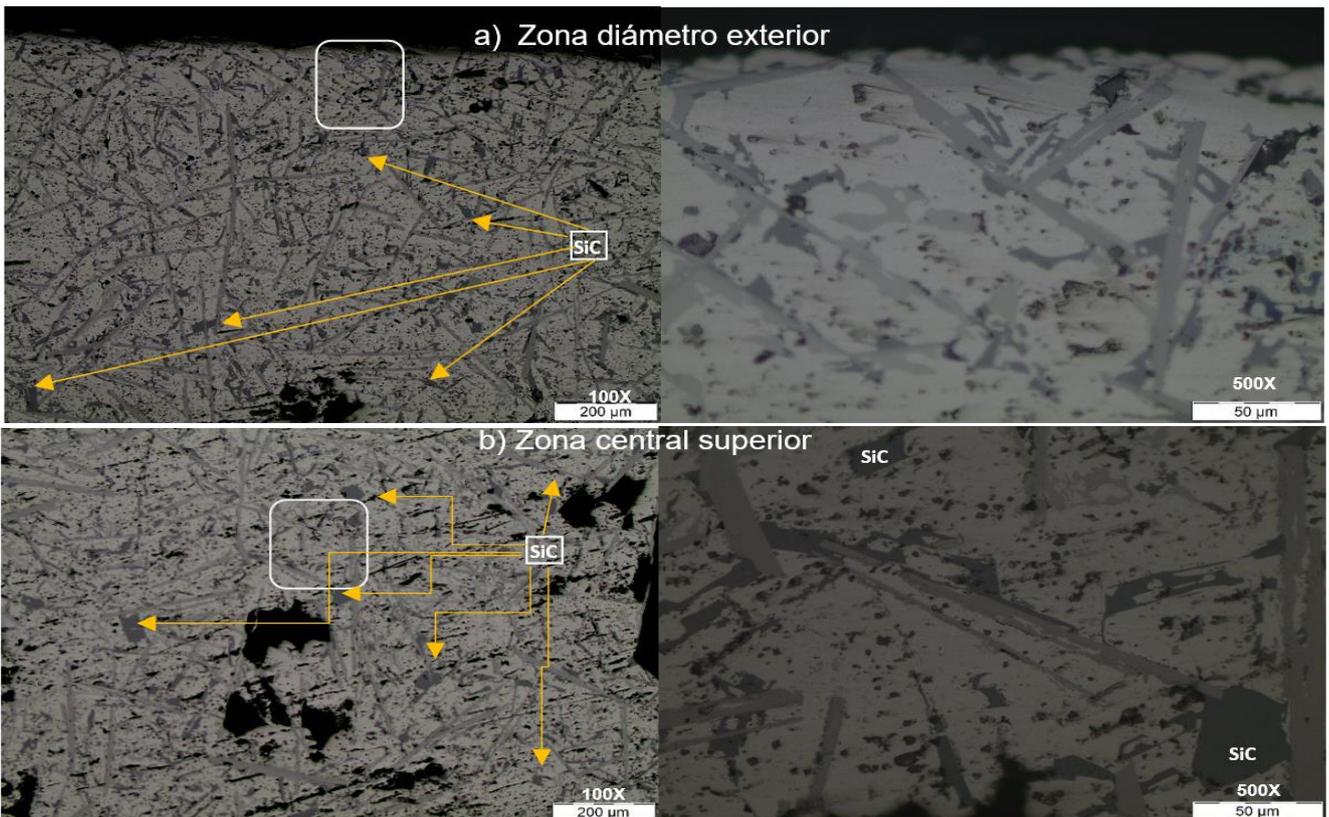
**Figura 3.1.5.** Metalografía a 100X del gradiente de distribución a lo largo de la sección transversal de la probeta de FGM anillo 2.

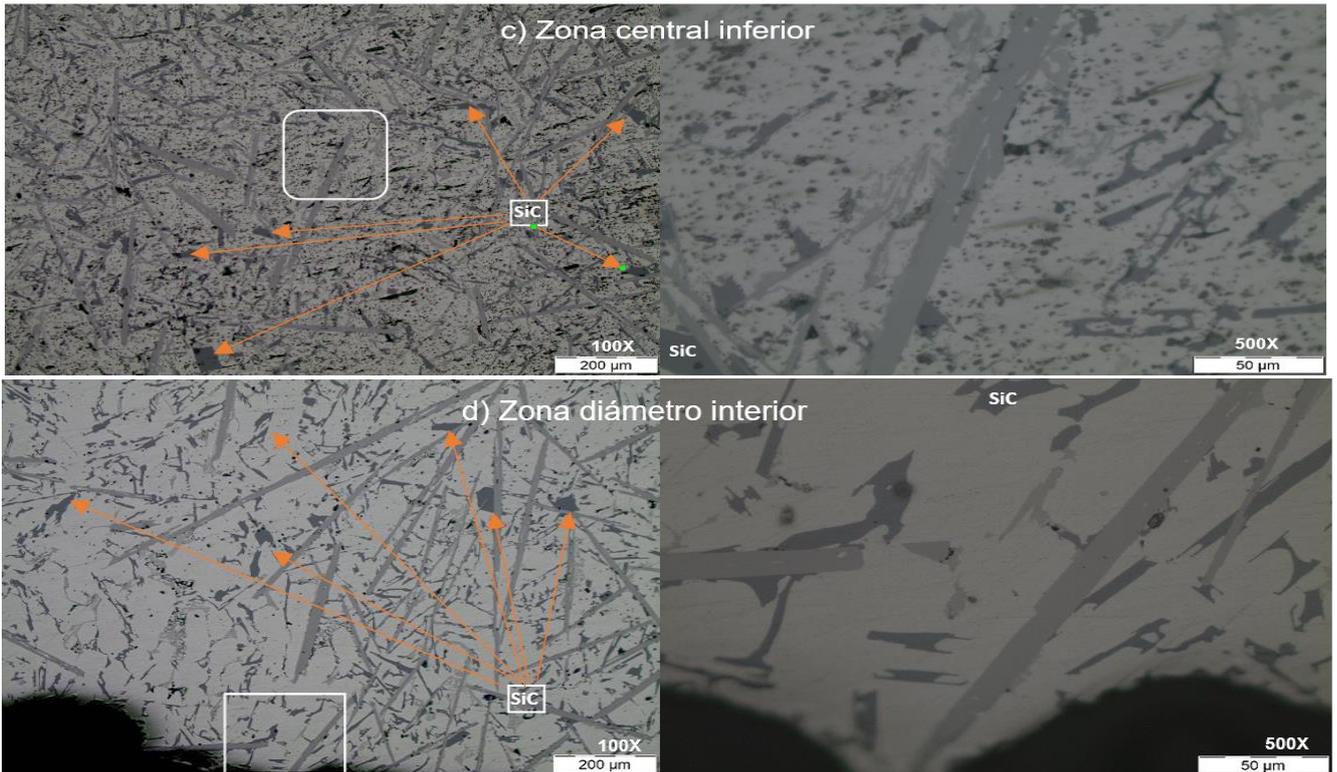
**Fuente:** [Propia].

Se puede notar en las metalografías del segundo anillo que las reacciones químicas se intensifican formando una gran cantidad de microconstituyentes, esto se lo puede apreciar en la figura 3.1.5, el gradiente de distribución se incrementa desde la zona del diámetro interior (figura 3.1.5d) hasta la zona central de la probeta (figura 3.1.5b y 3.1.5c), con una acumulación considerable de partículas y microconstituyentes en la zona del diámetro exterior (figura 3.1.5a), esto pudo ocurrir debido a la velocidad de rotación de la máquina de colado centrífuga, la fuerza centrífuga producida en el proceso no fue suficiente para formar un gradiente de distribución adecuado con una acumulación de las partículas de SiC en la zona del diámetro exterior. El tamaño no homogéneo de las

partículas de SiC también fue una causa de la distribución inadecuada a lo largo de la sección transversal del tubo de material funcionalmente graduado.

Las dos probetas nos presentan una distribución de las partículas de SiC a lo largo de la sección transversal tomando en cuenta que las partículas con menor tamaño han llegado a la zona central superior y zona de diámetro exterior, en cambio las de mayor tamaño se encuentran en la zona central inferior y del diámetro interior. Esto impide una adecuada visualización del gradiente de distribución debido al irregular tamaño que presentan las partículas. Además de presentar mayor cantidad de microconstituyentes en la zona del diámetro interior de la probeta del anillo 1.





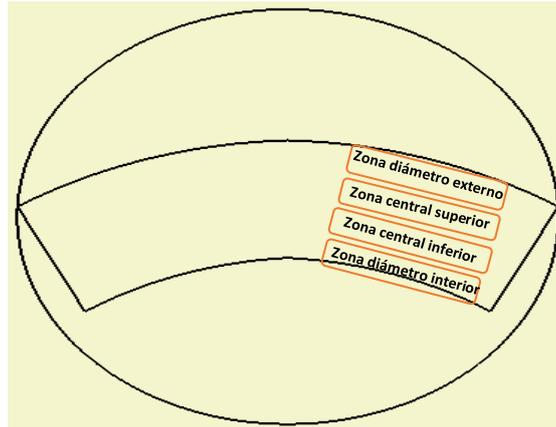
**Figura 3.1.6.** Metalografía a 100X y 500X del gradiente de distribución a lo largo de la sección transversal de la probeta de FGM anillo 2.

**Fuente:** [Propia].

Para tener una mejor apreciación se decidió realizar más metalografías tanto a 100X como a 500X, para una mejor visualización de la estructura de las probetas. En la figura 3.1.6 presenta la mayor cantidad de microconstituyentes y de partículas cerámicas en la parte central de la probeta (figura 3.1.6b y figura 3.1.6c), de igual forma en la zona del diámetro exterior que cuenta una distribución significativa de constituyentes y partículas como se puede observar en figura 3.1.6a. El resto de probetas que componen cada anillo cuentan con un gradiente de distribución similar a los presentados anteriormente.

### 3.1.2.2 Con ataque químico

El reactivo ocupado para el ataque químico a las probetas fue ácido fluorhídrico (HF al 0.5%-H<sub>2</sub>O 99.95%) obtenido de [14], lo que permite tener una mejor apreciación debido a que toman una coloración de los constituyentes en la microestructura, se podrá identificar mediante las micrografías y el reactivo ocupado que se presenta como 5m, que nos presenta el Metal HandBook Vol. 9 [15], de esta manera identificar la fase y los constituyentes presentes. Tomando en cuenta que la matriz de Al365.0 presenta constituyentes de fases presentes en la tabla 3.1.1.



**Figura 3.1.7.** Zonas de realización de las metalografías en las probetas con ataque químico de FGM.

Fuente: [Propia].

**Tabla 3.1.1.** Constituyentes de fase de la aleación 3xx.x.

Fuente: [15].

Aleación	Constituyentes de fase	
	Estado áspero	Estado tratado
3xx.x (Si + Cu/Mg), Al-Cu-Si, Al-Si-Cu-Mg-Ni, Al-Si-Cu-Mg, Al-Si-Mg, Al-Si-Mg-Fe, Al-Si-Mg-Ti, Al-Si-Mn-Mg-Cu	Si, Al <sub>2</sub> Cu, Al <sub>2</sub> CuMg, Al <sub>7</sub> Cu <sub>2</sub> Fe, Al <sub>5</sub> Cu <sub>2</sub> Mg <sub>8</sub> Si <sub>6</sub> , β-AlFeSi  α-Al(FeMnSi), AlCuFeNi, Al <sub>6</sub> Cu <sub>3</sub> Ni, Mg <sub>2</sub> Si, Al <sub>3</sub> Ni, Al <sub>9</sub> NiFe, Al <sub>8</sub> Mg <sub>3</sub> FeSi <sub>2</sub>	Si, Al <sub>2</sub> Cu, Al <sub>2</sub> CuMg, Al <sub>7</sub> Cu <sub>2</sub> Fe, AlCuFeNi, Al <sub>6</sub> Cu <sub>3</sub> Ni, Al <sub>20</sub> Cu <sub>2</sub> Mn <sub>3</sub> , Al <sub>3</sub> Ni, Al <sub>8</sub> Mg <sub>3</sub> FeSi <sub>2</sub> , Al <sub>5</sub> Cu <sub>2</sub> Mg <sub>8</sub> Si <sub>6</sub> , β-AlFeSi,  α-Al(FeMnSi)

Las metalografías del anillo 1 figura 3.1.8, nos presenta como constituyente de fase al α-Al de la matriz con una tonalidad gris blanquizca, el silicio se encuentra distribuido uniformemente a lo largo de toda la sección transversal de la probeta (figura 3.1.8 a, b, c y d) que se diferencia del SiC por presentar una forma irregular, alargada e indefinida con una tonalidad gris, la fase que se forma es β-AlFeSi (dendritas) que cuenta con una tonalidad marrón claro en forma de agujas se encuentra presenta en toda la microestructura (figura 3.1.8 a, b, c y d), los constituyentes de fase presentes son Al<sub>3</sub>Ni con una coloración marrón oscuro en formas irregulares y de escritura China (figura 3.1.8 a, b, c y d) con una mayor acumulación en la zona del diámetro interior como se puede observar en la figura 3.1.8d, Mg<sub>2</sub>Si con tonalidad oscura azulada en forma de escritura Chinas presentes en la zona central superior y zona del diámetro exterior (figura 3.1.8 a y b), finalmente Al<sub>8</sub>Mg<sub>3</sub>FeSi<sub>2</sub> con forma de escritura china con una tonalidad de gris claro (figura 3.1.8 a, b y c), validados a partir de [15], [16] y [17], esto se dio debido a los elementos presentes en la aleación de matriz Al365.0 produciendo reacciones químicas con las partículas debido a su tamaño no uniforme y la coquilla del crisol ocupado durante el proceso de fundición.

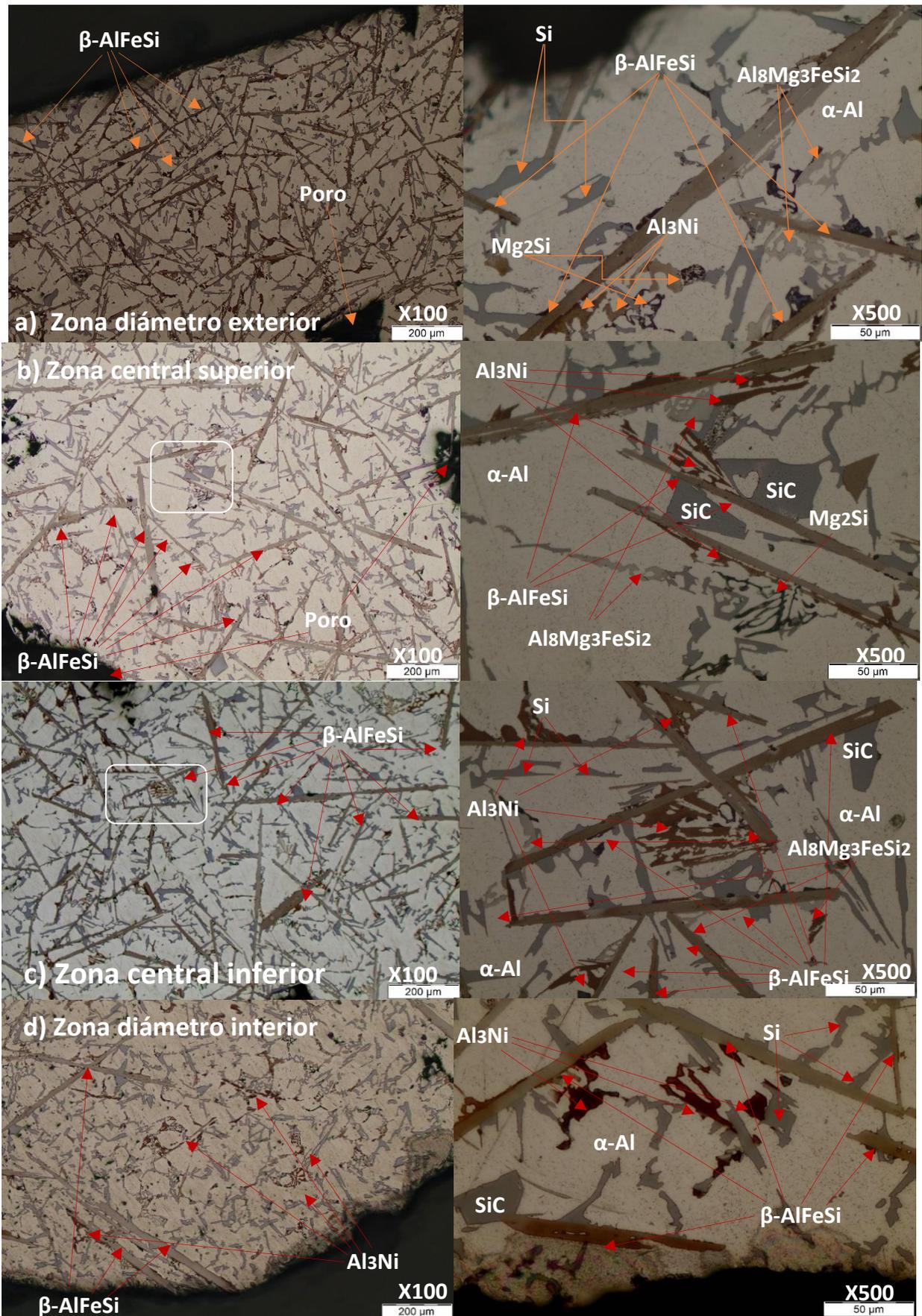


Figura 3.1.8. Metalografías de la probeta con ataque químico del anillo 1 de FGM.

Fuente: [Propia].

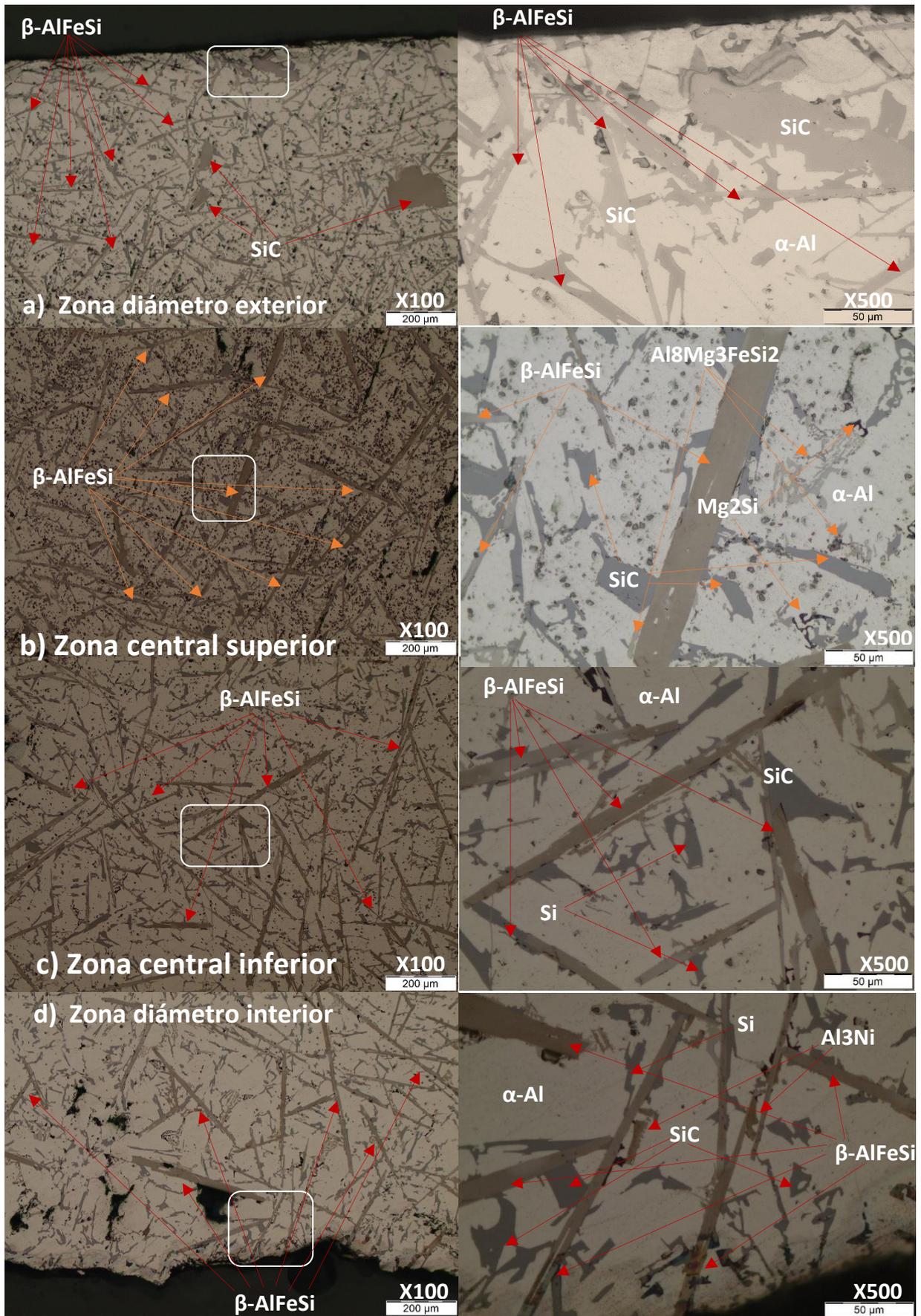


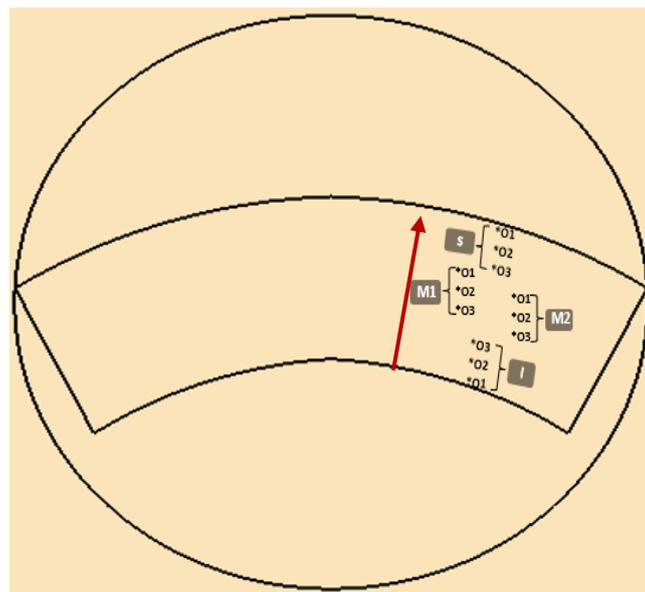
Figura 3.1.9. Metalografías de la probeta con ataque químico del anillo 2 de FGM.

Fuente: [Propia].

Las metalografías del anillo 2 figura 3.1.9, nos presenta como constituyente de fase al  $\alpha$ -Al de la matriz con una tonalidad gris blanquizca, el silicio está distribuido a lo largo de la sección transversal de la probeta (figura 3.1.9 a, b, c y d) que se diferencia del SiC (poliedros irregulares gris azulada) por presentar una forma irregular, alargada e indefinida con una tonalidad gris, la fase que se forma es  $\beta$ -AlFeSi (dendritas) con una tonalidad marrón claro en forma de agujas alargadas presentes en toda la microestructura (figura 3.1.9 a, b, c y d), los constituyentes de fase que se encuentran presentes son Al<sub>3</sub>Ni con una coloración marrón oscuro en formas irregulares y de escritura China (figura 3.1.9d), Mg<sub>2</sub>Si con tonalidad oscura azulada en forma de escritura Chinas presentes en la zona central superior y zona del diámetro exterior (figura 3.1.9b), finalmente Al<sub>8</sub>Mg<sub>3</sub>FeSi<sub>2</sub> con forma de escritura china con una tonalidad de gris claro (figura 3.1.9b), validados a partir de [15], [16] y [17], esto se dió debido a los elementos presentes en la aleación de matriz Al365.0 produciendo reacciones químicas con las partículas debido a su tamaño no uniforme y la coquilla del crisol ocupado durante el proceso de fundición. Se puede apreciar más acumulación de SiC en la zona central de la probeta, no se puede apreciar gran cantidad de reacciones en comparación con la probeta del anillo 1, solo en la zona del diámetro interior se presenta Al<sub>3</sub>Ni como constituyente de fase.

### 3.1.3 Ensayo de microdureza Vickers

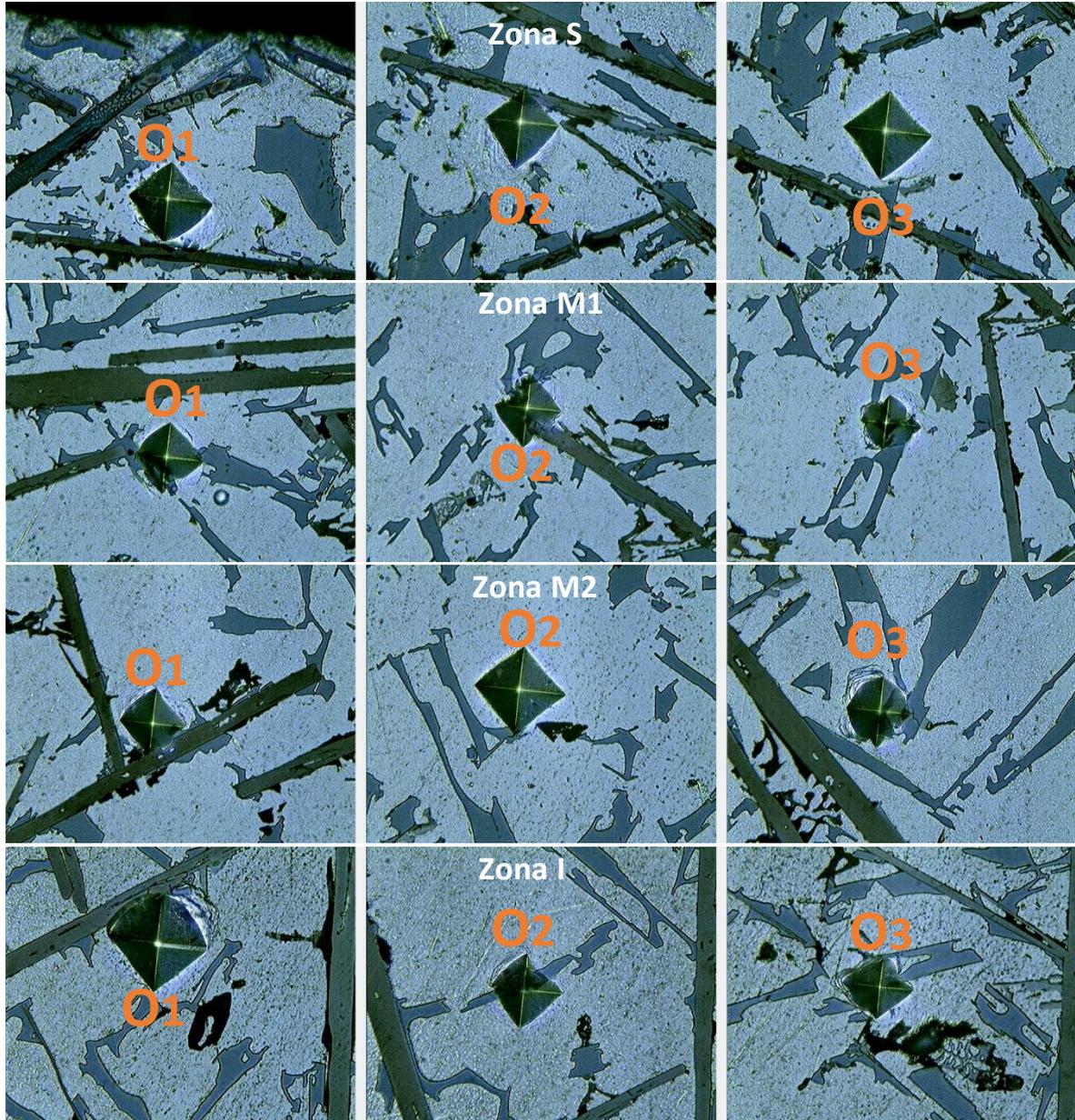
Se realizó un total de 12 indentaciones distribuidas como se presenta en la figura 3.1.10 en cada una de las probetas seleccionadas, aplicando una fuerza de 50 gf durante 15 segundos. El informe de resultados se adjunta en el Anexo III.



**Figura 3.1.10.** Zonas de indentaciones del ensayo de microdureza Vickers.

**Fuente:** [Propia].

Las indentaciones se las realizó en diferentes zonas a lo largo de la sección las cuales se las puede observar en las micrografías que se muestran en la figura 3.1.11 y figura 3.1.12, que nos dio como resultado los valores que se presentan en la tabla 3.1.2 y tabla 3.1.3, que son los resultados de la probeta del anillo 1 y del anillo 2 respectivamente.



**Figura 3.1.11.** Indentaciones en la microestructura de la probeta con ataque químico del anillo 1 de FGM.

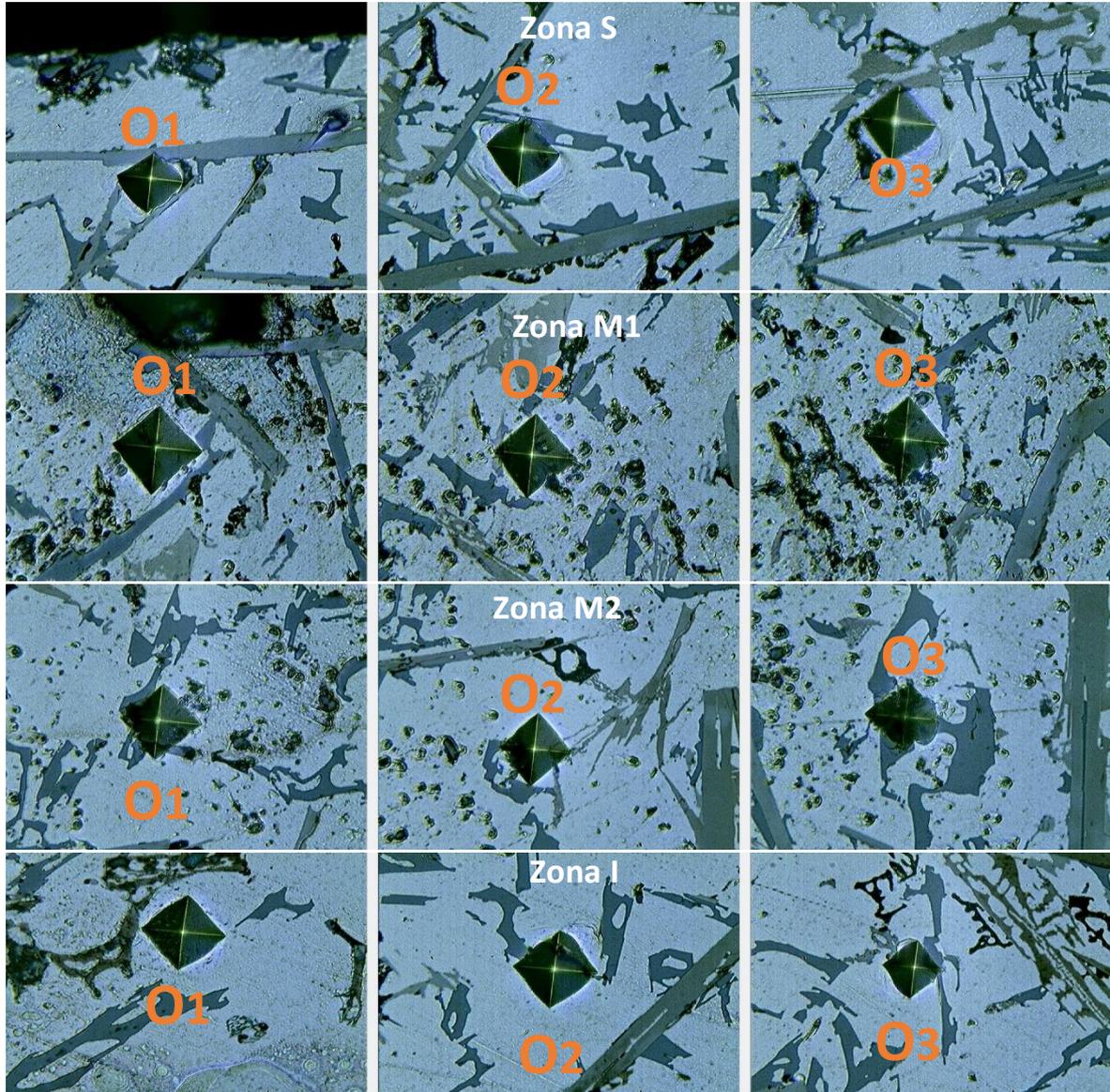
**Fuente:** [Propia].

**Tabla 3.1.2.** Valores de microdureza Vickers en las zonas de la probeta-anillo 1 de FGM.

**Fuente:** [Propia].

<b>Ensayo de microdureza Vickers probeta del anillo 1 del FGM</b>				
<b>Indentaciones</b>	<b>S (HV)</b>	<b>M1 (HV)</b>	<b>M2 (HV)</b>	<b>I (HV)</b>
<b>O1</b>	76,01	105,81	115,25	53,95
<b>O2</b>	84,45	104,31	65,31	98,45

<b>O3</b>	65,39	157,26	104,51	105,97
<b>Promedio</b>	75,28	122,45	95,02	89,46



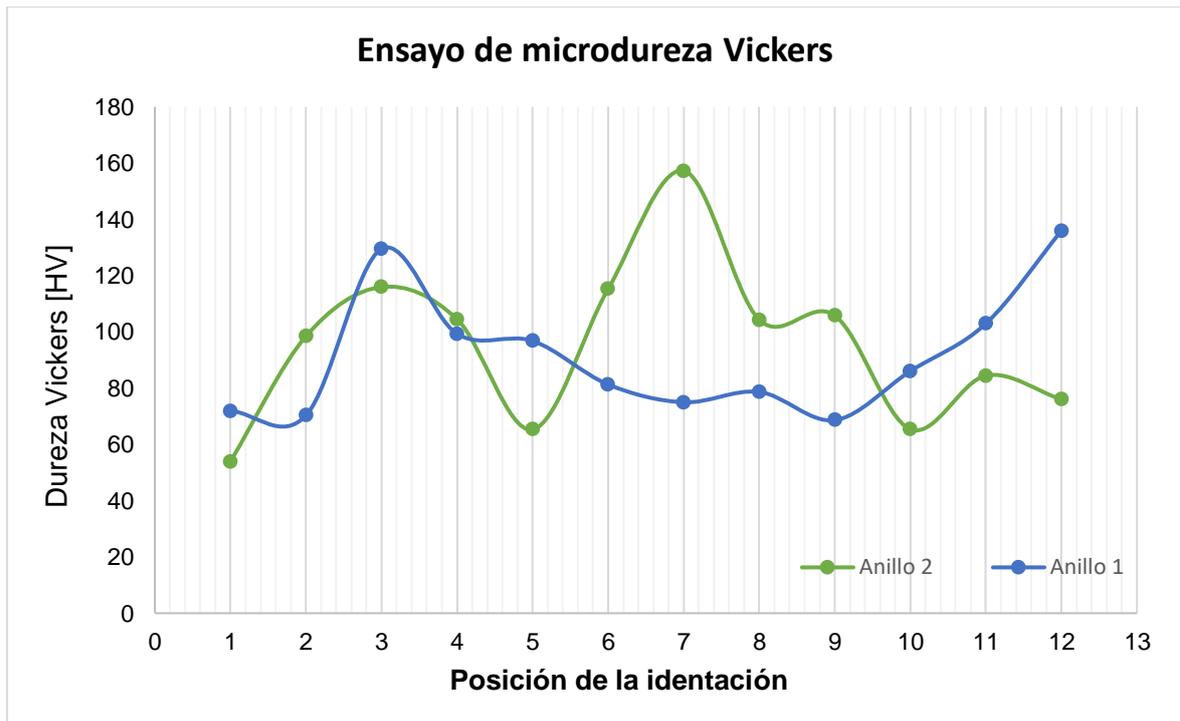
**Figura 3.1.12.** Indentaciones en la microestructura de la probeta con ataque químico del anillo 2 de FGM.

Fuente: [Propia].

**Tabla 3.1.3.** Valores de microdureza Vickers en las zonas de la probeta-anillo 2 de FGM.

Fuente: [Propia].

<b>Ensayo de microdureza Vickers probeta del anillo 1 del FGM</b>				
<b>Indentaciones</b>	<b>S (HV)</b>	<b>M1 (HV)</b>	<b>M2 (HV)</b>	<b>I (HV)</b>
<b>O1</b>	135,97	68,63	81,31	71,91
<b>O2</b>	102,94	78,67	96,79	70,31
<b>O3</b>	86,06	74,98	99,33	129,50
<b>Promedio</b>	108,32	74,09	92,48	90,57



**Figura 3.1.13.** Gráfica de Dureza Vickers.

**Fuente:** [Propia].

Como se puede observar en la figura 3.1.13, la dureza aumenta desde el diámetro interior hacia el centro de la probeta que es la parte en donde se acumula la mayor parte de las partículas de SiC, en cambio en la zona del diámetro exterior la dureza disminuye por falta de concentración de las partículas para la probeta del anillo 2, en cambio para la probeta del anillo 1 se ve un incremento de la dureza en tanto en la zona del diámetro interior y zona del diámetro exterior, esto se debe a que las indentaciones realizadas son en la fase y los constituyentes. Por lo tanto, para poder evidenciar con mayor claridad la variación de dureza se debería realizar un ensayo de dureza y no de microdureza. Tomar en cuenta que para poder graficar se ordenó las indentaciones desde el diámetro interior al exterior de la probeta como indica la flecha en la figura 3.1.9, de esta manera se puede tener una idea más clara de la variación que tiene la dureza en toda la sección de cada una de las probetas.

### 3.2 Conclusiones

- La literatura presente para la fabricación de materiales funcionalmente graduados con partículas de SiC mediante el proceso de colado centrífugo horizontal ex situ es limitada en cuanto a los parámetros y especificaciones de las máquinas que se ocuparon en las investigaciones relacionadas a este método, sin embargo en la práctica se notó la característica fundamental para poder identificar un FGM que es su gradiente de distribución característico y mediante este mejorar sus propiedades mecánicas y realizar investigaciones a futuro.

- El tubo funcionalmente graduado fabricado con denominación Al365.0/SiC/6p con una longitud aproximada de 56.3 cm, un diámetro exterior de 9.98 cm y un espesor de 0.86 cm, tomando en cuenta que solo 48.6 cm tiene una buena fusión y un diámetro constante el resto de tubo se encuentra incompleto con un variación progresiva del diámetro así como mal formaciones por fusión incompleta, esto se debe al tiempo de colado, velocidad de enfriamiento, temperatura ambiente, temperatura de precalentamiento del molde, distancia desde el horno hasta la máquina centrífuga, el tamaño de la sección de ingreso de la colada, entre otros factores a considerar.
- De las metalografías obtenidas de las 16 probetas realizadas sin ataque químico se puede observar el gradiente de distribución de las partículas de SiC para el anillo 1 (figura 3.1.4) presenta una distribución progresiva en la zona centro desde la zona del diámetro exterior, en cambio las probetas del anillo 2 (figura 3.1.5 y figura 3.1.6) evidencian una acumulación desde la zona del diámetro interior hacia la zona central de la sección transversal de las probetas, con una semejanza entre las probetas de acumulación de partículas en la zona central presente en los dos anillos. Se puede apreciar un gradiente de distribución incompleto esto se debe a la velocidad de rotación del molde la cual no fue adecuada para la fabricación del material funcionalmente graduado, esta velocidad se consideró debido al tamaño de las partículas ocupadas que son pequeñas y no uniformes, los resultados no fueron en su totalidad los esperados, además que las partículas reaccionaron formando microconstituyentes que se precipitaron en la zona del diámetro interior y parte de la zona central las probetas de ambos anillos.
- Las micrografías realizadas a las probetas con ataque químico nos muestran como constituyente principal de la matriz al  $\alpha$ -Al, la fase presente en la microestructura es  $\beta$ -AlFeSi en forma de agujas alargadas con una tonalidad marrón claro. Los constituyentes que se presentan son  $Al_3Ni$ ,  $Mg_2Si$  y  $Al_8Mg_3FeSi_2$  que varían en su concentración por las diferentes zonas de las probetas del anillo 1 y del anillo 2 (figura 3.1.8 y figura 3.1.9), esto se debe a las reacciones que se produjo en el proceso debido al tamaño de las partículas, los elementos que conforman la matriz y la coquilla del crisol.
- El ensayo de microdureza demostró que la mayor dureza está presente en la zona central de la probeta anillo 2, esto es debido a que en esta zona es donde se acumula la mayor cantidad de partículas de SiC (figura 3.1.13), en este caso lo que se buscaba era obtener mayor dureza en la zona del diámetro exterior pero debido al tamaño de las partículas y a la velocidad de la máquina de colado

centrífugo, no hubo una distribución adecuada de las partículas a lo largo de toda la sección transversal del tubo funcionalmente graduado. Tomando en cuenta que para la probeta 1 (figura 3.1.11), presento una inconsistencia en cuanto a los valores obtenidos debido a las indentaciones fueron hechas en la fase  $\beta$ -AlFeSi y en los constituyentes de fase.

### **3.3 Recomendaciones**

- Se recomienda el rediseño de la estructura de la máquina Stir Casting del laboratorio de fundición de la EPN, para una mejor funcionalidad y operabilidad. Facilitar el proceso de mezclado de la matriz de aluminio-silicio con las partículas de SiC.
- Se recomienda el uso de partículas de SiC de mayor tamaño y un diámetro uniforme para lograr minimizar las reacciones que se presentan. Para lograr un gradiente de distribución de las partículas uniforme. Además, se recomienda la fabricación de un crisol de acero que no reaccione con los elementos de la matriz y con las partículas, con mayor resistencia al desgaste trabajando a las altas temperaturas.
- Tener en cuenta la temperatura ambiente que resultó ser un factor que afecta el proceso de fabricación del tubo funcionalmente graduado debido a que no se tuvo un espacio totalmente cerrado impidiendo mantener una temperatura constante establecida de la matriz de 750°C, por lo que se realizó a una temperatura mayor para compensar este aspecto.
- El tamaño del molde de la máquina de colado centrífugo fue influyente en el proceso debido a que la cantidad ocupada de 5000 gramos de fundición no fue suficiente para llenarlo en su totalidad, lo que ocasionó una distribución deficiente tanto de la matriz como de las partículas de SiC dando como resultado un tubo funcionalmente graduado incompleto.
- Se recomienda calentar a las partículas a una temperatura mayor a 150°C debido a que es muy baja a comparación de la que presenta la matriz de aluminio fundida de 750°C. Para lograr una mejor distribución de las partículas en la matriz.
- Se recomienda la implementación de una cantidad adecuada de fundente y desgasificante, además es de gran importancia el uso de argón, para obtener una limpieza adecuada de los gases que se producen en la colada debido a suciedades o reacciones producidas por las partículas de SiC, la coquilla del crisol y los elementos aleantes en la matriz de aluminio-silicio. De esta manera se obtendrá una disminución considerable de las porosidades que se presentan durante el proceso de enfriamiento.

- Se recomienda el uso de una matriz con menor contenido de silicio y elementos aleantes en su estructura para evitar las reacciones químicas que alteran la microestructura. Para obtener un adecuado gradiente de distribución de partículas a lo largo de la sección transversal del tubo funcionalmente graduado.
- Se recomienda controlar los parámetros durante todo el proceso de fabricación debido a que una mínima alteración se ve reflejada en los resultados, el tiempo y la temperatura se deben controlar minuciosamente en el proceso de fabricación del tubo funcionalmente graduado. Se debe tomar en cuenta la distancia del horno a gas a la máquina de colado centrífugo debido a que la tempera de la matriz disminuye rápidamente se debe realizar el colado en el menor tiempo posible para evitar falta de fusión.
- Para obtener mejores resultados se recomienda realizar un ensayo de dureza en donde pueda abarcar la matriz, la fase y los constituyentes, para evidenciar la variación de la dureza debido al gradiente de distribución de las partículas de SiC.

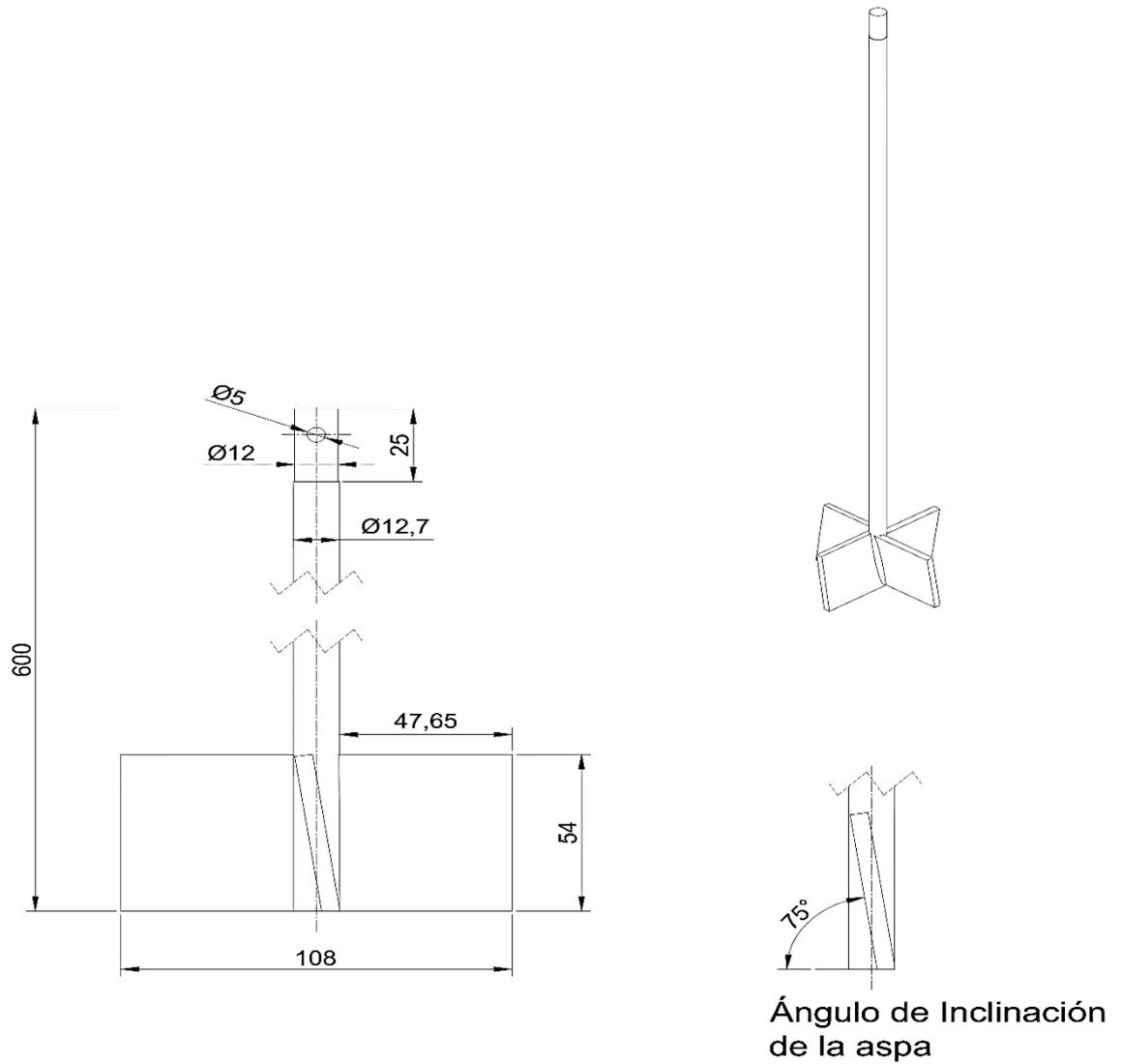
## 4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] B. Saleh et al., "30 Years of functionally graded materials: An overview of manufacturing methods, Applications and Future Challenges," *Composites Part B: Engineering*, vol. 201. Elsevier Ltd, Nov. 15, 2020. doi: 10.1016/j.compositesb.2020.108376.
- [2] A. Bedoya and J. Paúl, "Rediseño y construcción de la máquina de colado centrífugo horizontal," 2020.
- [3] L. G. Huilca Caisalitín, "Revisión de las características de gradientes microestructurales en compuestos metálicos de aluminio funcionalmente graduados y su mecanismo de formación," 2021.
- [4] G. E. Totten and D. Scott. MacKenzie, *Handbook of aluminum*. M. Dekker, 2003.
- [5] Małgorzata. Warmuzek, *Aluminum-silicon casting alloys: an atlas of microfractographs*. ASM International, 2004.
- [6] R. K. Verma, D. Parganiha, and M. Chopkar, "A review on fabrication and characteristics of functionally graded aluminum matrix composites fabricated by centrifugal casting method," *SN Applied Sciences*, vol. 3, no. 2. Springer Nature, Feb. 01, 2021. doi: 10.1007/s42452-021-04200-8.
- [7] W. Hufnagel, "Manual del Aluminio," Barcelona, Reverte, S. A., 2004.
- [8] Juval, "Productos para Aluminio," [En línea]. Available: Industria Auxiliar de Fundición, S.A.. [Último acceso: 10 Mayo 2022].
- [9] F. Oviedo and Oscar Sotomayor, "Introducción a los Procesos de Manufactura-Tecnología de Fundición Periodo. In Guía de Prácticas Laboratorio de Fundición: Vol. Ed 1 y 2," 2019.

- [10] A. Garrido and V. Sánchez, "Determinación de la Metodología para la Obtención de Aleaciones de Aluminio de Fundición Maquinables sin Porosidades," 2011.
- [11] J. Kaufman, "Introduction to Aluminum Alloys and Tempers," USA: ASM International, 2000.
- [12] G. A. Borona López and J. C. Guilcamaigua Padilla, "Determinación de la Metodología para la Obtención de Aleaciones de Aluminio de Fundición Maquinables sin Porosidades," 2018.
- [13] Vision Analytical Inc. (2022, January 05). "An Introduction to Particle Characterization," <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=18502> (accessed Aug. 09, 2022).
- [14] E. Fuentes, "Efecto de la microestructura en las propiedades de los materiales compuestos en base de aluminio," Universidad Politécnica de Catalunya, España. 2007.
- [15] M. Warmuzek, "Metallographic techniques for aluminum and its alloys, metallography and microstructures," vol. 9, ASTM international, 2007.
- [16] I.M. El-Galy, M.H. Ahmed and B.I. Bassiouny, "Characterization of Functionally Graded Al-SiCp Metal Matrix Composites Manufactured by Centrifugal Casting," 2017.
- [17] J. Marín de la Puente, "Identificación de microconstituyentes en aleaciones de aluminio mediante metalografía óptica en calor," Universidad Politecnica de Madrid. Febrero, 2019.

## 5 ANEXOS

### ANEXO I. PLANO DEL AGITADOR.



Nota:  
 Espesor Aspa: 5 mm  
 Material: Acero ASTM 4340

TRAT. TERMICO	N/A	<b>EPN</b>	FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA	
RECUBRIMIENTO	N/A		DIB.	Pozo Joffre
CANTIDAD DE PIEZAS	1		DIS.	Pozo Joffre
MATERIAL	ACERO AISI 304	TOL. GRAL.	REV.	Ing. Fausto Oviedo, M.Sc
		ESCALA		FECHA
		1:1		10/07/2022
<b>Agitador</b>		<b>MEC 001</b>		

## ANEXO II. ANÁLISIS GRANULOMETRÍA LÁSER.



### ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA



ANEXO 1: Tabla de resultados de granulometría láser muestra M - 320.

Muestra: Carburo de Silicio M-320							
Número	Diámetro de	Retenido	Pasado	Número	Diámetro de	Retenido	Pasado
(#)	Partícula	(%)	Acumulado	(#)	Partícula	(%)	Acumulado
	( $\mu\text{m}$ )		(%)		( $\mu\text{m}$ )		(%)
1	1,5	0,0	0,0	21	22,8	4,3	24,0
2	1,7	0,1	0,1	22	26,1	5,7	29,7
3	2,0	0,1	0,2	23	29,9	7,7	37,4
4	2,3	0,1	0,3	24	34,3	9,7	47,1
5	2,6	0,2	0,5	25	39,2	11,1	58,1
6	3,0	0,2	0,7	26	44,9	10,9	69,0
7	3,4	0,3	1,0	27	51,5	9,5	78,5
8	3,9	0,3	1,3	28	59,0	7,4	85,9
9	4,5	0,4	1,7	29	67,5	5,2	91,1
10	5,1	0,5	2,2	30	77,3	3,5	94,6
11	5,9	0,6	2,9	31	88,6	2,1	96,7
12	6,7	0,8	3,7	32	101,5	1,2	97,9
13	7,7	1,0	4,7	33	116,2	0,7	98,6
14	8,8	1,2	5,9	34	133,1	0,4	99,0
15	10,1	1,5	7,4	35	152,5	0,3	99,3
16	11,6	1,8	9,2	36	174,6	0,2	99,6
17	13,2	2,1	11,2	37	200,0	0,2	99,7
18	15,2	2,4	13,6	38	229,1	0,1	99,9
19	17,4	2,8	16,3	39	262,4	0,1	100,0
20	19,9	3,3	19,7				

## ANEXO III. INFORME DE RESULTADOS DEL ENSAYO DE MICRODUREZA VICKERS.

	ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla (LMDF)	Revisión:	000	
		Fecha:	22/09/2019	
		Página:	Pág. 1 de 3	
	INFORME DE RESULTADOS	RT-LMDF-0701		
	N° DT-OTI0065-22			

### INFORME DE RESULTADOS N° DT-OTI0065-22

#### Información General

<b>Cliente / Empresa/ Entidad:</b>	ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL		
<b>Persona de contacto:</b>	JOFFRE ANDRÉS POZO TRUJILLO		
<b>Teléfono:</b> 0987123451	<b>E-mail:</b>	joffre.pozo@epn.edu.ec	
<b>Muestras suministradas por:</b> 16	<b>Fecha de recepción de muestra:</b>	08-06-22	
<b>Fecha de emisión de Informe:</b> 26-07-22	<b>Fecha/ plan y método de muestreo:</b>	N/A	
<b>Fecha de inicio de ensayo:</b> 08-06-22	<b>Fecha de fin de ensayo:</b>	25-07-22	

#### 1. ANTECEDENTES.

Se recibe en el Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla de la Escuela Politécnica Nacional, unas probetas de aleación de aluminio, a someterse a ensayos complementarios para el desarrollo del proyecto integrador "FABRICACIÓN DE UN MATERIAL FUNCIONALMENTE GRADUADO MEDIANTE LA MÁQUINA DE COLADO CENTRÍFUGO DEL LABORATORIO DE FUNDICIÓN DE LA EPN" PARTE 2, detallados en el Memorando Nro. EPN-DMT-2022-0904-M.

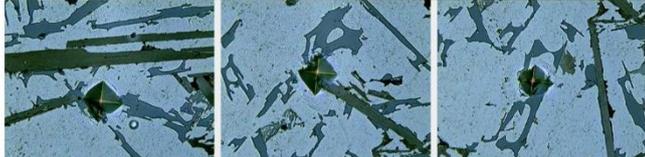
#### 2. MAPEO DE DUREZAS

El ensayo se realizó en el equipo DUROLINE-M, marca METKON, y se basa en la especificación de la norma ASTM E384 – 17. En donde:

- a. La superficie de las muestras son responsabilidad del cliente, el cual identifica el área para realizar la micro-indentación.
- b. La fuerza de ensayo aplicada corresponde a 50 gf, durante 15 s, a temperatura ambiente, en base a solicitud del cliente.
- c. Se utilizó un penetrador Vickers.
- d. Se realizó 12 indentaciones en el lado indicado por el cliente.
- e. Los resultados representativos del ensayo se despliegan a continuación y se entrega en CD el respaldo respectivo:

Sample		I1, I2, I3		Date		25/07/2022	
Material		22-021		Load		50	
Reported by		PP		Eht		1	
Label	HRC	HV	D1	D2	Mean Diagonal	Depth	
O1	-	53,95	41,55	41,35	41,45		
O2	-	98,46	30,42	30,95	30,68		
O3	-	115,97	29,91	26,64	28,27		
Mean		0,00	89,46	33,96	32,98	33,47	0,00
Signed by:			Unit		µm		
							

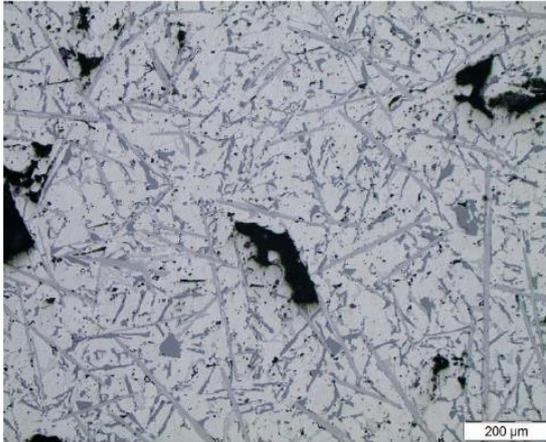
  

Sample		M1		Date		25/07/2022	
Material		22-021		Load		50	
Reported by		PP		Eht		1	
Label	HRC	HV	D1	D2	Mean Diagonal	Depth	
O1	-	105,81	29,51	29,69	29,60		
O2	-	104,31	28,95	30,68	29,81		
O3	-	157,26	26,13	22,43	24,28		
Mean		0,00	122,46	28,20	27,60	27,90	0,00
Signed by:			Unit		µm		
							

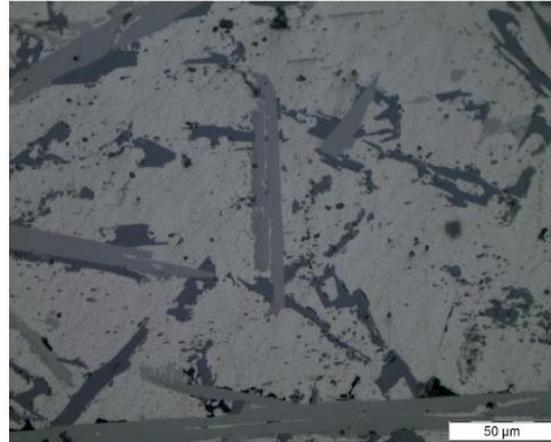
### 3. RESULTADO METALOGRAFICO

La preparación de las probetas para el ensayo metalográfico se realiza en base a la norma ASTM E3-11, las metalografías realizadas son en el sentido especificado por el cliente, a continuación, se presenta las fotografías más representativas del ensayo:

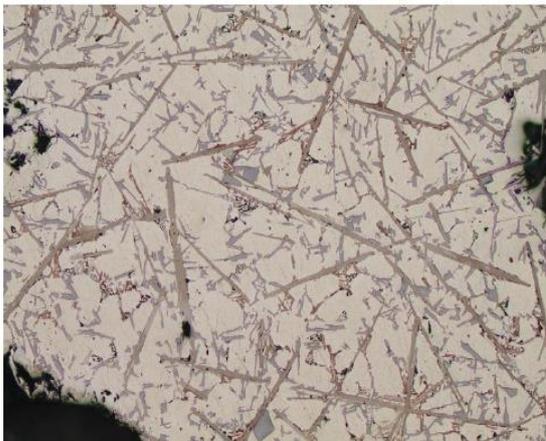
Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" -Calle Isabela Católica S/N y Alfredo Mena Caamaño - Edificio N°14 PB RUC: 1760005620001 - Tel. (593 - 2) 2 976 300 Ext. 3010/3011 E-mail: metalografia@epn.edu.ec Quito-Ecuador



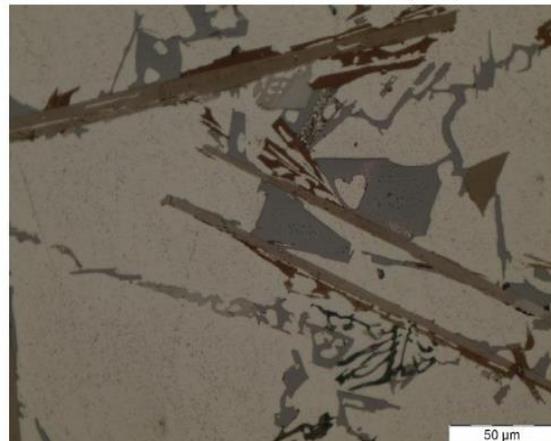
**Fotografía N° 1.** Aumento de 100X, probeta extraída del elemento 22-021. Sin ataque químico.



**Fotografía N° 2.** Aumento de 500X, probeta extraída del elemento 22-021. Sin ataque químico.



**Fotografía N° 3.** Aumento de 100X, probeta extraída del elemento 22-021. Con ataque químico.



**Fotografía N° 8.** Aumento de 500X, probeta extraída del elemento 22-021. Con ataque químico.

#### DECLARATORIA:

- *Los resultados de este informe, se aplican al objeto de ensayo como se recibió y son exclusivos del mismo.*
- *Este informe de resultados no debe ser reproducido parcialmente, excepto cuando se reproduzca en su totalidad y con aprobación escrita del LMDF.*
- *Los ensayos solicitados se han realizado en las instalaciones del LMDF.*

#### Atentamente:

Informe

Elaborado por:

Revisado por:



Firmado electrónicamente por:  
PATRICIA  
MARIANA PROAÑO  
SANCHEZ

Ing. Patricia Proaño  
**Especialista del Laboratorio de Metalografía,  
Desgaste y Falla.**



Firmado electrónicamente por:  
CARLOS WIME  
DIAZ  
CAMPOVERDE

Ing. Carlos Díaz  
**Jefe del Laboratorio de Metalografía,  
Desgaste y Falla.**