

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

### **FABRICACIÓN DE UN MATERIAL FUNCIONALMENTE GRADUADO MEDIANTE LA MÁQUINA DE COLADO CENTRIFUGO DEL LABORATORIO DE FUNDICIÓN DE LA EPN.**

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

**HENRY ANDRÉS BELTRÁN ORDOÑEZ**

**henry.beltran01@epn.edu.ec**

**DIRECTOR: FAUSTO HERNÁN OVIEDO FIERRO**

**fausto.oviedo@epn.edu.ec**

**DMQ, junio 2022**

## **CERTIFICACIONES**

Yo, HENRY ANDRÉS BELTRÁN ORDOÑEZ 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.



---

**HENRY ANDRÉS BELTRÁN ORDOÑEZ**

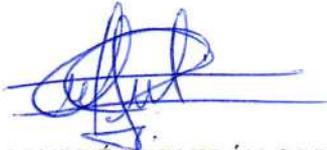
Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por HENRY ANDRÉS BELTRÁN ORDOÑEZ, bajo mi supervisión.



**FAUSTO HERNÁN OVIEDO FIERRO**

## 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 'Henry Andrés Beltrán Ordoñez', written over a horizontal line.

HENRY ANDRÉS BELTRÁN ORDOÑEZ

## DEDICATORIA

Este proyecto de Titulación se lo dedico con todo mi cariño y amor a Dios, por haberme dado esta vida tan maravillosa y al darme unos maravillosos padres.

A mis padres Segundo Beltrán y Diana Ordoñez, les dedico mi trabajo de titulación ya que sin ellos no hubiese logrado este sueño, su bendición todos los días a lo largo de mi vida me ha protegido y llevado por el camino del bien, han estado conmigo toda mi vida brindándome todo su apoyo, amor y fuerza cada instante, haciendo de mi un gran hombre con buenos sentimientos, valores y hábitos. Demostrando una parte del todo el cariño y amor que les tengo, les doy las gracias por haber confiado en mí y por hacerme un gran profesional, los amo papitos siempre estarán en mi corazón.

A mi maravilloso tío Luis Aníbal Beltrán Ordoñez, que Dios lo tiene en su santa gloria y ahora es un ángel en mi vida y que me cuida desde el cielo, le dedico mi trabajo de titulación al ser un apoyo en mi vida que la encaminó por un buen sendero, tío sé que estarás muy orgulloso de mi, muchas gracias por tus buenos consejos y sabias palabras siempre te llevare en mi corazón.

## AGRADECIMIENTO

Quiero Agradecer a Dios por cuidarme durante toda mi vida, por darme salud, fortaleza y un gran conocimiento para lograr cumplir este objetivo.

A mis tías Luz Beltrán y Nuri Ordoñez les agradezco el apoyo constante que me han dado durante mis momentos más difíciles en mi vida y además dándome el ánimo, fuerza y cariño para lograr esta gran meta, las quiero mucho.

A mis primos Erick, David, Fernando, Cristian, Diego, Cinthya y Daniela por haber sido un apoyo en momentos difíciles y además por sacarme una sonrisa cuando más la necesitaba, los aprecio y quiero mucho.

A mis padres y a una parte de mi familia que siempre me han apoyado y dadome ánimos para llegar a ser una gran ser humano, hijo y profesional.

A una mujer que fue, es y será mucho más que una amiga o novia, a ti Wendy Torres que has hecho de mí una gran persona de buen corazón, has estado a mi lado en cada segundo dándome tu cariño, compartiendo hermosos momentos a mi lado, dándome tu apoyo y ánimos para llegar a cumplir mis sueños, fue junto a ti que yo descubrí lo que significa querer y amar, recuerda que a donde vaya mientras tenga vida no te olvidaré, te amo Wendy.

A la Escuela Politécnica Nacional, sobre todo a los ingenieros Fausto Oviedo y Luis Huilca, por haberme compartido su gran conocimiento y por haber sido mis directores de este trabajo de titulación.

A mis amigos Juan Ambas y Brayan Galindo por brindarme una amistad sincera y apoyarme en mi vida personal y académica.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES .....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA .....	III
DEDICATORIA .....	IV
AGRADECIMIENTO .....	V
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS .....	X
RESUMEN .....	XI
ABSTRACT .....	XII
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO .....	1
1.1 Objetivo general .....	2
1.2 Objetivos específicos .....	2
1.3 Alcance .....	2
1.4 Marco teórico .....	3
1.4.1 Estado del arte .....	3
1.4.2 Materia Prima utilizada .....	3
1.4.3 Material funcionalmente graduado .....	5
1.4.4 Matrices metálicas más utilizadas en FGM .....	6
1.4.5 Características del proceso de fundición de aluminio .....	6
1.4.6 Propiedades del carburo de silicio .....	7
1.4.7 Tipos de desgasificantes y fundentes para colada de fundición .....	8
1.4.8 Características del molde de fuerza centrífuga .....	9
1.4.9 Procesos de colado por fuerza centrífuga .....	9
1.4.10 Aplicaciones de los materiales funcionalmente graduados .....	11
2 METODOLOGÍA .....	12
2.1 Equipos para la fabricación de FGM .....	13
2.1.1 Fundición en horno a gas .....	13
2.1.2 Máquina de colado por centrifugado horizontal (ex-situ) .....	14
2.1.3 Máquina mezcladora Stir Casting .....	17
2.2 Determinación de variables .....	23
2.2.1 Variables del horno a gas .....	23
2.2.2 Variables del equipo Stir Casting .....	24
2.2.3 Variables máquina de colado horizontal ex situ .....	25
2.3 Caracterización del FGM .....	27
2.3.1 Obtención de probetas .....	27

2.3.2	Desbaste, lijado y pulido .....	28
2.3.3	Ensayo metalográfico y ataque químico.....	32
3	RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	34
3.1	Resultados.....	34
3.1.1	Gradiente de distribución de partículas en probeta 4A .....	36
3.1.2	Microconstituyentes del FGM obtenido en probeta 4A .....	38
3.1.3	Ensayo de micro dureza a probetas atacadas químicamente .....	39
3.1.4	Análisis de gradiente de distribución de SiC en probeta 7.1 .....	42
3.2	Conclusiones.....	44
3.3	Recomendaciones.....	46
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	48
	ANEXOS.....	50
	ANEXO I. DIMENSIONES DE LAS PARTÍCULAS SIC PROPORCIONADAS POR EL DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA.....	51
	ANEXO II. FICHA TÉCNICA DEL FUNDENTE DESGASIFICANTE APARTAGAS H7-50 .....	53
	ANEXO III. FICHA TÉCNICA DEL FUNDENTE ESCORIFICANTE ALU FUNDEX EXTRA .....	55
	ANEXO IV. PLANO DE FABRICACIÓN AGITADOR .....	58
	ANEXO V. INFORME TÉCNICO DE ENSAYOS DE MICRO DUREZA .....	59

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Composición química de la matriz Al-Si 6.0 utilizada .....	4
Figura 1.2. Propiedades físicas de las partículas cerámicas SiC. ....	5
Figura 1.3. Partículas cerámicas #400 coloración negra. ....	5
Figura 1.4. Gradiente de distribución de un FGM [2] . ....	6
Figura 1.5. Desgasificante H7-50 coloración azul. ....	8
Figura 1.6. Fundente Alu Fundex coloración rosa. ....	9
Figura 1.7. Método de colado por centrifugado .....	10
Figura 1.8. Procesos existentes del colado por fuerza centrífuga .....	10
Figura 2.1. Diagrama metalúrgico para obtención del FGM. ....	13
Figura 2.2. Horno a gas utilizado para la fundición del material base (Al-365). ....	14
Figura 2.3. Máquina de colado horizontal por fuerza centrífuga. ....	15
Figura 2.4. Esquema de máquina de colado horizontal por fuerza centrífuga .....	15
Figura 2.5. Diseño final de la máquina centrifugadora horizontal .....	16
Figura 2.6. Elementos que conforman el equipo stir casting del Laboratorio de fundición de la EPN. ....	18
Figura 2.7. Características del variador de frecuencia del equipo stir casting. ....	19
Figura 2.8. Placa de datos del motor eléctrico de la máquina stir casting. ....	19
Figura 2.9. Dimensiones de agitador con geometría de aspas planas .....	20
Figura 2.10. Montaje del eje de acero con el agitador después de la obtención del FGM. ....	22
Figura 2.11. Eje y chumacera con superficie corroída. ....	23
Figura 2.12. Crisol de arcilla-grafito. ....	24
Figura 2.13. Equipo stir casting utilizado para la dispersión de las partículas en la colada de fundición. ....	25
Figura 2.14. Probetas obtenidas de cada sección del tubo. ....	28
Figura 2.15. Máquina pulidora del laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla. ....	29
Figura 2.16. Probetas que serán lijadas en la máquina .....	29
Figura 2.17. Empastillado de probetas. ....	30
Figura 2.18. Desbaste de las probetas ya empastilladas. ....	31
Figura 2.19. Máquina pulidora automática del Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla. ....	31
Figura 2.20. Aspecto reflectante final de las probetas de FGM. ....	32
Figura 2.21. Micrografía con aumento 100x sin ataque químico .....	33
Figura 2.22. Micrografía con aumento 100x con ataque químico .....	33
Figura 3.1. Tubo FGM obtenido mediante colado por fuerza centrífuga. ....	34
Figura 3.2. Vista frontal y trasera del tubo FGM. ....	34

Figura 3.3. Imperfecciones en el tubo FGM obtenido mediante colado por fuerza centrífuga .....	35
Figura 3.4. Probeta 4A escogida del primer anillo (izquierda). .....	36
Figura 3.5. Gradiente de distribución de partículas en probeta 4A SiC desde la zona del diámetro interno (izquierda) hasta la zona del diámetro externo (derecha). .....	37
.....	38
Figura 3.6. Micrografía 4A zona diámetro interno (a), zona central (b) y zona superior (c) atacada. ....	38
Figura 3.7. Gráfica de micro dureza de las dos probetas micro indentadas.....	41
Figura 3.8. Probeta 7.1 escogida del segundo anillo. ....	43
Figura 3.9. Probeta 7.1 desde la zona del diámetro interno (izquierda) hasta la zona del diámetro externo (derecha). ....	43

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Aplicaciones de los materiales funcionalmente graduados .....	11
Tabla 2.1. Dimensiones del molde (coquilla) de la máquina centrifugadora .....	16
Tabla 2.2. Propiedades del acero A-36 .....	17
Tabla 2.3. Parámetros de funcionamiento de la máquina centrifugadora .....	17
Tabla 2.4. Parámetros de diseño del agitador equipo stir casting .....	21
Tabla 2.5. Parámetros seleccionados en el horno de fundición y partículas SiC.....	24
Tabla 2.6. Parámetros seleccionados en el equipo stir casting. ....	25
Tabla 2.7. Parámetros de la máquina centrifugadora .....	26
<b>Tabla 3.1.</b> Resultados micro dureza zona inferior probeta 4A.....	39
<b>Tabla 3.2.</b> Resultados micro dureza zona central probeta 4A.....	40
<b>Tabla 3.3.</b> Resultados micro dureza zona superior probeta 4A.....	40
Tabla 3.4. Orden de indentaciones en las zonas de análisis con su respectiva dureza HV .....	41

## RESUMEN

El presente proyecto tiene como finalidad caracterizar un material funcionalmente graduado o Functionally Graded Material (FGM) con matriz de aluminio y 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 de la máquina de colado centrífugo, temperatura del material fundido, tamaño de las partículas de SiC (malla #400), porcentaje en peso de las partículas y temperatura del molde; una vez que se definan dichos parámetros, se procederá a fabricar el material mediante el método de colado por centrifugado horizontal, cabe mencionar que los equipos a utilizar son el equipo de Stir Casting, máquina con molde de colado por fuerza centrífuga y horno a gas, estos equipos se encuentran disponibles en el laboratorio de fundición de la Escuela Politécnica Nacional. Para el proceso de fabricación, se utilizará una aleación de Al 365 que se llegará a fundir en un horno a gas (GLP) de capacidad 5kg, durante el proceso de fundición se colocarán fundentes para eliminar cualquier tipo de impureza durante el proceso, a continuación se añadirán las partículas cerámicas de carburo de silicio y una vez que se tenga la colada bajo los parámetros requeridos se procederá a verter el material en el molde giratorio horizontal a una velocidad de 1200 rpm, previamente dicho molde debe ser precalentado a una temperatura de 400 °C para obtener un tubo con estructura funcionalmente graduada. Finalmente, se caracterizarán las probetas tomadas del tubo fabricado mediante análisis metalográficos y se medirán las micro durezas en las zonas que caracterizan a un material compuesto funcionalmente graduado.

**PALABRAS CLAVE:** Colado centrífugo ex situ, material funcionalmente graduado, carburo de silicio, micro dureza.

## ABSTRACT

The objective of this project is to characterize a functionally graded material or Functionally Graded Material (FGM) with an aluminum matrix and reinforcement of Silicon Carbide (SiC) particles. The manufacture of the FGM will be carried out considering specific parameters such as the speed of rotation of the mold of the centrifugal casting machine, temperature of the molten material, size of the SiC particles (#400 mesh), percentage by weight of the particles and mold temperature; Once these parameters are defined, the material will be manufactured using the horizontal centrifugal casting method. It is worth mentioning that the equipment to be used is the Stir Casting equipment, a machine with a centrifugal force casting mold and a gas oven. these equipment's are available in the foundry laboratory of the Escuela Politécnica Nacional. For the manufacturing process, an Al 365 alloy will be used that will be melted in a gas oven (LPG) with a capacity of 5kg, during the casting process fluxes will be placed to eliminate any type of impurity during the process, then the silicon carbide ceramic particles will be added and once the casting has the required parameters, the material will be poured into the horizontal rotating mold at a speed of 1200 rpm, previously said mold must be preheated to a temperature of 400 °C to obtain a tube with a functionally graded structure. Finally, the specimens taken from the manufactured tube will be characterized by metallographic analysis and the micro-hardness in the areas that characterize a functionally graded composite material will be measured.

**KEYWORDS:** Centrifugal casting ex situ, functionally graded material, silicon carbide, micro hardness.

## 1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

El presente proyecto tiene como finalidad caracterizar el gradiente de distribución de partículas cerámicas en un material funcionalmente graduado con matriz de aluminio mediante colado por centrifugado horizontal con molde permanente en el laboratorio de fundición de la Escuela Politécnica Nacional, la fabricación de este material permitirá observar mediante el método de metalografía las 3 fases que posee un material funcionalmente graduado y su cambio de estructura en la matriz de aluminio.

Para realizar la fabricación de este tipo de material se realizó una investigación sobre el estado del arte de los materiales funcionalmente graduados donde se abarca el tipo de fabricación, la clasificación, así como las condiciones más importantes para poder fabricarlo. Por lo general los materiales funcionalmente graduados trabajan con matriz de aluminio, cobre, titanio, magnesio y níquel. Para el presente proyecto se utilizó la matriz de aluminio que es la más utilizada a nivel de investigación como de industria, esto debido a que el aluminio posee propiedades como alta resistencia, alto módulo específico, buena resistencia al desgaste y bajo coeficiente de expansión térmica, en cuanto a las partículas cerámicas a nivel de investigación e industrial más utilizadas son SiC, CNT, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiB<sub>2</sub>, B<sub>4</sub>C, SiO<sub>2</sub> y ZrO<sub>2</sub> las partículas que se utilizaron para la fabricación del FGM son las de carburo de silicio debido a que son accesibles a nivel comercial y además brindan al material un adecuado incremento de propiedades mecánicas, el tamaño de estas partículas son de la malla #400, para obtener una colada de fundición con la mínima cantidad de escoria para una colada de aluminio se utilizó el fundente Alufundex y el desgasificante Apartagas H7 que la industria Juval recomienda para fundiciones de aluminio y sus aleaciones [1].

Para el proceso de fundición del aluminio se utilizó un horno a gas con un crisol cerámico y un equipo de Stir Casting, una vez se haya mezclado se procederá a verter el material a una altura de 10 cm mientras que previamente el molde de la máquina de colado centrifugo este precalentado a una temperatura de 300 a 400° C; esta máquina estará girando 1200 rpm para la obtención final del material funcionalmente graduado, se obtendrán las probetas respectivas para realizar la posterior caracterización del material mediante el método metalográfico en el laboratorio de metalografía donde se podrá evidenciar el gradiente de distribución, microconstituyentes y valores de micro dureza que tendrá el FGM.

## **1.1 Objetivo general**

Fabricar un material funcionalmente graduado mediante la máquina 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 mediante fuerza centrífuga.
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 de la EPN.

## **1.3 Alcance**

La obtención de un material funcionalmente graduado con matriz de aluminio y refuerzo de partículas cerámicas de carburo de silicio mediante colado por centrifugado horizontal permitirá fabricar tubos donde se tendrá una mejora en las propiedades mecánicas del mismo, la fabricación de este tipo de materiales debe ser accesible tanto para proyectos de investigación como para el sector industrial. La caracterización se la realiza mediante el método metalográfico utilizando el microscopio triocular marca Olympus GX41 que posee una iluminación del tipo halógena, utiliza probetas del tipo redondas y además puede alcanzar objetivos oculares con acercamiento de 5x, 10x, 20x y 50x, con la micrografía a aumentos de 10x y 50x (objetivos de acercamiento utilizados) se podrá evidenciar el gradiente de distribución de las partículas cerámicas en el material, este análisis (de los varios que se pueden realizar en este tipo de materiales) determinará las diversas aplicaciones donde se podrá implementar. Cabe mencionar que algunos aspectos como la selección del tipo de matriz, así como tipo de partículas cerámicas utilizadas son en base a otros trabajos de titulación ya realizados por lo cual no se especificará a profundidad dichos aspectos ya que lo mandatorio es obtener los parámetros mencionados en el apartado 1.

## **1.4 Marco teórico**

### **1.4.1 Estado del arte**

La historia de los FGM empieza en el año 1972, con una idea de crear materiales con gradiente estructural que inicialmente fue propuesto para materiales poliméricos debido a su gran aplicación en campos como la industria aeroespacial, los materiales funcionalmente graduados tuvieron su primer diseño en el año 1983 como una solución para poder reducir el esfuerzo térmico producido por las altas temperaturas en los ensayos de la construcción de un transbordador espacial japonés [2]. Los materiales funcionalmente graduados fueron creados únicamente para reducir las altas temperaturas que se daban entre la interfaz metálica y cerámica del transbordador, pero con el paso del tiempo se fue enfocando no solo para resistir a altas temperaturas sino también para controlar la presión, deformación, desgaste y corrosión en el material, estas nuevas características que deben tener los FGM son debido a las exigencias que requieren los materiales para cumplir tareas específicas en diversos campos como ingeniería, el tema automotriz, aviación, industria biomédica y en su pionero la aeroespacial [2].

Como el primer diseño en los años 80 de los FGM la comunidad científica empezó a mejorar estos primeros ejemplares para lanzar su primer lanzamiento oficial en el año 1990, donde empezaron a surgir diversos artículos científicos sobre los FGM hasta la actualidad, en aquel tiempo los FGM se clasificaron según la mezcla de componentes del que estuvieran fabricados, estos eran cerámico/cerámico, metal/metal, metal/cerámico y cerámico/polímero, con el avance tecnológico en el área de los materiales así como de sus procesos de manufactura actualmente los materiales funcionalmente graduados se los llega a clasificar por sus métodos de producción como, por estado, tipo de gradiente, tipo de estructura, tipo de escala y dimensiones, control de gradiente, costos de proceso, consumo energético e impacto ambiental [2], [3].

### **1.4.2 Materia Prima utilizada**

Para la fabricación del FGM se utilizó una matriz de aluminio que se encuentra dentro de la serie de aleaciones 3xx.x (ANSI AA 365.0) del tipo Al-Si-Mg, cuyos parámetros se encuentran analizados con mayor profundidad en el trabajo de titulación 'Caracterización de un material compuesto de matriz aleación de aluminio-silicio reforzada con partículas de carburo de silicio' la matriz seleccionada debe cumplir 3 aspectos para su selección:

- Ser una matriz que sea utilizada en ambientes industriales sea del sector automotriz o del sector de manufactura, según la norma ANSI las matrices de mayor uso en selección de aleaciones son las 3xx.x, 4xx.x y la 4xxx esto por tener unas excelentes propiedades mecánicas tales como: resistencia a la corrosión, alta tenacidad y ductilidad, buena conductividad térmica, baja densidad y alta resistencia[4].
- La adquisición y precio deben estar al alcance, el valor económico no debe ser muy elevado, el valor puede variar en cuanto al país donde se quiera realizar la investigación[5].
- El proceso de manufactura por el cual se llevará a cabo la fabricación del FGM se conoce que es mediante el uso de maquinaria de Stir Casting y máquina de colado centrífugo horizontal, las cuales representan un proceso de fundición de valor económico bajo en comparación a otros tipos de procesos de manufactura, en el laboratorio de Fundición de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la EPN se puede acceder a este tipo de proceso de manufactura[5].

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	

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

Figura 1.1. Composición química de la matriz Al-Si 6.0 utilizada [5].

Por otro lado, la selección de las partículas cerámicas SiC #400 deben también cumplir ciertos parámetros para su selección, para ello se consiguió las partículas cerámicas de SiC #400 con promedio de 28,46µm. fabricadas por la industria FERVIMAG Cía. Ltda., ubicada en la ciudad de Guayaquil, el tamaño de las partículas SiC se encuentra más detalladamente en el ANEXO 1. A continuación se indican los aspectos de selección:

- Las partículas de refuerzo deben dar una aportación de mejora de propiedades mecánicas a la matriz como, por ejemplo: una mejor resistencia a la corrosión, resistencia a la tracción y compresión, disminuir su densidad, resistencia al choque y estabilidad térmica.

- La adquisición y economía de las partículas cerámicas existen de diversos tipos entre ellas tipo fibras, laminas y en forma de polvo, estas últimas son las que se encuentran más disponibles en el país.
- En cuanto a morfología las partículas cerámicas en el país las distribuyen en forma de polvo y además varias empresas las suministran en comparación a otros tipos de partículas como el TiC o el B<sub>4</sub>C que son de escasa distribución, la morfología en si de las partículas las empresas no las especifican sino las comercializan en base a su número de malla[5].

Propiedades físicas del SiC malla #400	Magnitud
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	3,21
Punto de fusión (°C)	2500
Conductividad térmica (W/m°C)	19,4 (a 500 °C) / 15,8 (a 900 °C)
Expansión térmica (K <sup>-1</sup> )	4,7x10 <sup>-6</sup>
Dureza (Mohs)	9,5-9,75
Color	Negro

Figura 1.2. Propiedades físicas de las partículas cerámicas SiC.

[Fuente: Industria FERVIMAG CIA. LTDA]



Figura 1.3. Partículas cerámicas #400 coloración negra.

[Fuente: propia].

### 1.4.3 Material funcionalmente graduado

Los materiales funcionalmente graduados (FGM) son un tipo de material compuesto con matriz metálica y con un refuerzo cerámico, este tipo de material de ingeniería avanzada tiene la capacidad de resistir en ambientes de trabajo extremo debido a sus elevadas propiedades mecánicas, durante su operación no pierde sus propiedades y además una característica del FGM es el cambio de gradiente de composición de una fase a otra, al poseer elevadas propiedades mecánicas en comparación con otro tipo de materiales el

desempeño del FGM no muestra pérdidas en sus propiedades debido a que posee un gradiente de composición en su estructura [2], [6].

Los materiales FGM deben cumplir una condición que es la más importante para poder fabricarlo, esta condición desempeña un papel importante ya que permitirá que el material adquiera elevadas propiedades mecánicas, esta condición es; el tener una buena mojabilidad, es decir los materiales deben estar en un rango soluble de condiciones de mezcla y de composición química, en otras palabras, la matriz y el refuerzo deben hidrofóbicos o hidrofílicos.[2], [6].

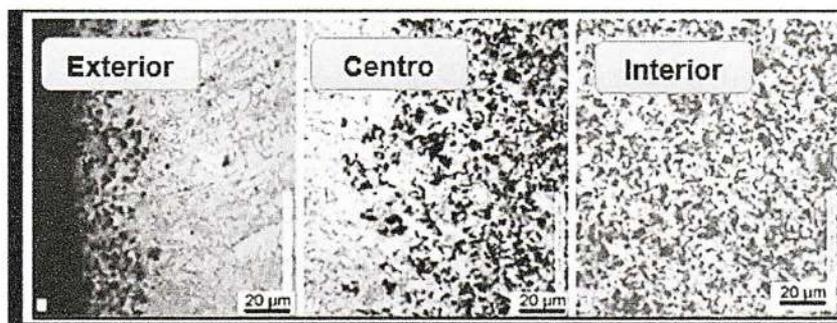


Figura 1.4. Gradiente de distribución de un FGM [2] .

#### 1.4.4 Matrices metálicas más utilizadas en FGM

Las matrices metálicas más utilizadas en la fabricación de FGM son las siguientes: Aluminio, bronce, titanio, magnesio, cobalto.

Dentro de este grupo de materiales el más utilizado es el Aluminio debido a sus excelentes propiedades mecánicas como dureza, módulo específico, resistencia al desgaste y bajo coeficiente de expansión térmica. Con el aluminio como matriz y con el uso de un material cerámico como refuerzo el producto final tendrá podrá resistir ambientes de alta temperatura además de tener un adecuado módulo de Young, resistencia a la tracción y resistencia al desgaste, lo que permitirá que la funcionalidad gradual que posea el material sea usada en diversos campos importantes de investigación, así como en diversas áreas de aplicación [1], [2].

#### 1.4.5 Características del proceso de fundición de aluminio

Como cualquier proceso de fundición se tiene en cuenta las propiedades más destacadas del elemento a fundir en este caso del aluminio, estas se muestran a continuación:

- La fundición de aluminio en comparación con la fundición gris poseerá un ahorro de masa de aproximadamente un 50% debido a que el aluminio posee una alta resistencia a la fatiga.
- Reducción de costos de mecanizado debido a la alta calidad y precisión que poseen las piezas fundidas en aluminio.
- El producto final fundido tiene muchas posibilidades de poder realizar un tratamiento superficial.

Estos aspectos se verán afectados por parámetros como, forma, dimensiones, cantidad de aluminio a fundir, aleación y características mecánicas a cumplir [7], [8].

Por otra parte, el horno de fundición para la fundición de aluminio debe poseer las siguientes características:

- El crisol dentro del horno deberá soportar una temperatura de 600° C que son los necesarios para fundir aluminio.
- El crisol debe ser de un material refractario o a su vez de un material que soporte una temperatura mayor a la del material fundido (aluminio).
- El acabo superficial del crisol deberá poseer un excelente acabado superficial para evitar que partículas del crisol se adhieran a la colada fundida [7], [8].

#### **1.4.6 Propiedades del carburo de silicio**

El carburo de silicio (SiC) es un conjunto de partículas que poseen excelentes propiedades químicas, físicas y mecánicas, esto debido a que este tipo de partículas poseen características de resistencia mecánica, alta dureza, resistencia al desgaste como resistencia a la corrosión y oxidación así como estabilidad térmica, estas características mencionadas se deben a la presencia de enlaces covalentes que existen entre el silicio y el carbón así como a su arreglo atómico de forma tetraédrica [5], [8].

El tamaño de las partículas de carburo de silicio es una de las variables más importantes en la fabricación de un FGM, ya que en base a su tamaño las propiedades del material fabricado aumentaran en un valor significativo, las partículas de carburo de silicio pueden oscilar en un rango de 12,89 a 500  $\mu\text{m}$  y una fracción de 2,5 a 20 por ciento en peso [6].

### 1.4.7 Tipos de desgasificantes y fundentes para colada de fundición.

#### Desgasificante

El desgasificante permite reducir las porosidades que se lleguen a generar durante la colada de fundición debido a la presencia de hidrogeno que se encuentra mezclado con el material fundido, el hidrogeno puede encontrarse en piezas de la chatarra utilizada para la fundición del material o incluso por malas condiciones de horno utilizado [5]. Entre algunos tipos de desgasificantes se encuentran los de la empresa Infusa: DEGASAL, DEGASAL R, DEGASAL F [8].

Para la obtención del FGM se utilizó el apartagas H7-50 proporcionado por la empresa INDUSTRIAL JUVAL LTDA, en donde el ANEXO 2 menciona las características del uso de este tipo de desgasificante [14].



Figura 1.5. Desgasificante H7-50 coloración azul.

[Fuente: propia].

#### Fundente

El fundente es el encargado de proteger y limpiar el material que se llegue a fundir durante el proceso de fusión, el fundente crea una capa de protección sobre el material lo cual permite una reducción en la oxidación y además llega a minimizar la cantidad de hidrógeno absorbido durante el proceso de fusión [7]. Entre algunos tipos de fundentes se encuentran los de la empresa Infusa son: ITALPURO EXTRA, ITALPURO STD-M, ITALPURO STD y ITALPURO TRL [14].

Para la obtención de FGM se utilizó el fundente Alu Fundex 110 proporcionado por la empresa INDUSTRIAL JUVAL LTDA, en donde el ANEXO 3 menciona las características del uso de este tipo de desgasificante.



Figura 1.6. Fundente Alu Fundex coloración rosa.

[Fuente: propia].

#### **1.4.8 Características del molde de fuerza centrífuga**

El molde utilizado en la máquina de colado por fuerza centrífuga ex situ del laboratorio de Fundición de la Escuela Politécnica Nacional es una coquilla de acero A36 que fue proporcionado por parte de la empresa Petroecuador, este consta de una longitud de 60,96 cm, un diámetro exterior de 12,54 cm y un diámetro interior de 9,98 cm. Al ser un tubo de oleoducto este tipo de acero A36 cuenta con características de llegar a soportar altas temperaturas y presiones [6], [9].

#### **1.4.9 Procesos de colado por fuerza centrífuga.**

##### **Método de fuerza centrífuga**

El método de fundición por fuerza centrífuga permite que las partículas cerámicas se distribuyan por el espesor del material a obtener, el gradiente de distribución en el FGM, así como de la dirección de la fuerza centrífuga que sigue la ley de Stokes, el proceso de colado por fuerza centrífuga es adecuado especialmente para piezas cilíndricas largas. Por otra parte, los parámetros que se deben tener en consideración para el colado por fuerza centrífuga son: velocidad de giro del molde, altura de colada de fundición, temperatura de precalentamiento del molde, tamaño del refuerzo y porcentaje en peso de partículas, así como desgasificantes y fundentes, estas últimas son las encargadas de eliminar la escoria producida por la fundición lo que reducirá el peso del FGM [1], [2].

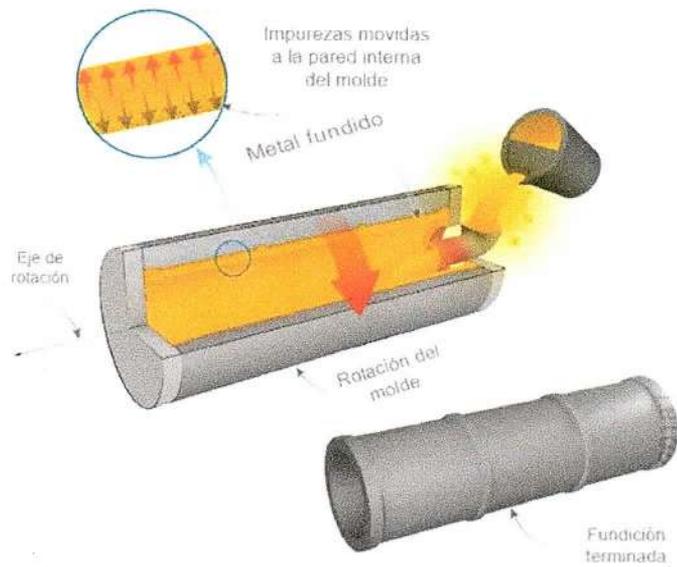


Figura 1.7. Método de colado por centrifugado [2].

Los procesos de colado por fuerza centrífuga se los dividen de la siguiente manera:

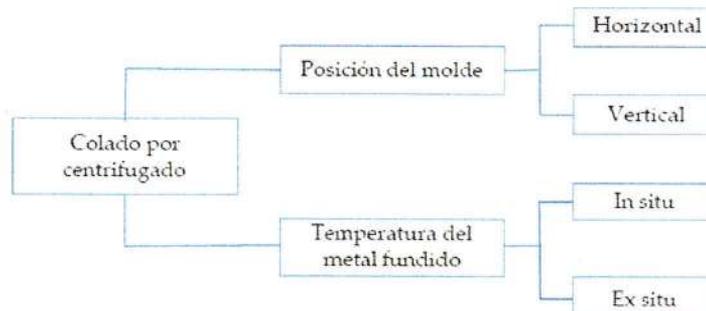


Figura 1.8. Procesos existentes del colado por fuerza centrífuga [1].

### Proceso de colado por fuerza centrífuga in situ

El proceso de colado por fuerza centrífuga in situ utiliza la velocidad del molde para generar una fuerza centrífuga que mientras el material fundido se solidifica se procede a insertar las partículas de refuerzo que tienen una temperatura de fusión menor en comparación de material base (material fundido), debido a la diferencia de densidad que llega a existir entre la matriz y el refuerzo se llega a formar el gradiente de distribución de las partículas en el material, esto antes de que el material entre en proceso de cristalización, lo que generará el gradiente característico de los FGM [1],[6].

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

A diferencia del método in situ en este caso se utiliza partículas de refuerzo que poseen una temperatura de fusión mayor a la del material fundido (matriz), las partículas se colocan

durante el proceso de fusión mientras las mismas permanecen en estado sólido y se llegan a distribuir por la región radial debido a la fuerza centrífuga generada, debido a la diferencia de densidades entre matriz y refuerzo las partículas se desplazarán entre las superficies exterior e interior [3]. Para el proceso de obtención del FGM se utilizó este método, debido a que para el método ex situ las principales matrices utilizadas son las siguientes: aluminio (Al), cobre (Cu) y magnesio (Mg) además de que las partículas de refuerzo que poseen una mayor temperatura de fusión para este método son: carburo de silicio (SiC) y óxido de aluminio (alúmina  $Al_2O_3$ ).

#### 1.4.10 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 1.4.1 [1], [5], [6], [10].

Tabla 1.1. Aplicaciones de los materiales funcionalmente graduados [1], [5], [6], [10].

<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, ruedas de turbinas y partes 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>• Volates</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 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

El presente trabajo de titulación tiene como finalidad fabricar un material funcionalmente graduado mediante el uso de la máquina de colado horizontal por fuerza centrífuga del laboratorio de fundición de la Escuela Politécnica Nacional, cabe mencionar que al producto final se le realizaran análisis metalográficos, análisis de microestructura así como un ensayo de micro dureza, el trabajo es del tipo experimental ya que se busca obtener un gradiente de composición en el material, utilizando como partida el trabajo de titulación 'Caracterización de un material compuesto de matriz de aleación de aluminio-silicio reforzada con partículas de carburo de silicio'[5] la recolección de información para tener conocimiento más profundo sobre el trabajo a realizar fue mediante trabajos de investigación (papers), estos documentos permitieron escoger las variables que se conoce llegarían a afectar las propiedades del FGM e incluso dificultarían su fabricación, los materiales utilizados fueron el aluminio de pistones de un vehículo Honda Civic (Al 365), este elemento fue seleccionado debido a su fácil obtención y economía, partículas cerámicas de carburo de silicio (SiC) de la malla 400 con un diámetro promedio  $28,46\mu\text{m}$ , también se usaron desgasificantes y fundentes para poder tener una colada de fundición con la menor cantidad de escoria posible para una mejor dispersión de las partículas durante el colado por fuerza centrífuga, además, del trabajo de titulación citado en [5] se seleccionará los diseños ya realizados de la máquina de stir casting así como los porcentajes en peso que tendrán las partículas de refuerzo como la cantidad de desgasificante y fundente, cabe mencionar que no se utilizó un afinador de grano (TiBor) y que los parámetros para este trabajo de titulación fueron una velocidad de 1200 rpm, temperatura de precalentamiento tomadas del trabajo de titulación citado en [9] y 497 rpm tomadas del equipo stir casting del tema utilizado como punto de partida.

Finalizado la selección de parámetros se procede a realizar los cálculos de porcentajes en peso de cada uno de los elementos que conformarán el FGM, posteriormente se realizará el proceso de secado de partículas, fundición del material base, colocación de las partículas en la colada de fundición, mezcla de partículas con la colada fundida, precalentamiento de la máquina de colado horizontal, enfriamiento del tubo, selección de probetas para ensayos (16 en total). Una vez se pueda extraer el FGM se proceden con los ensayos de metalografía para evidenciar el gradiente de composición de las partículas en la matriz, micro dureza para evidenciar de forma cuantitativa el aumento en de esta propiedad en diferentes regiones del material y finalmente un ensayo de microestructura para evidenciar el cambio de la morfología del material funcionalmente graduado.

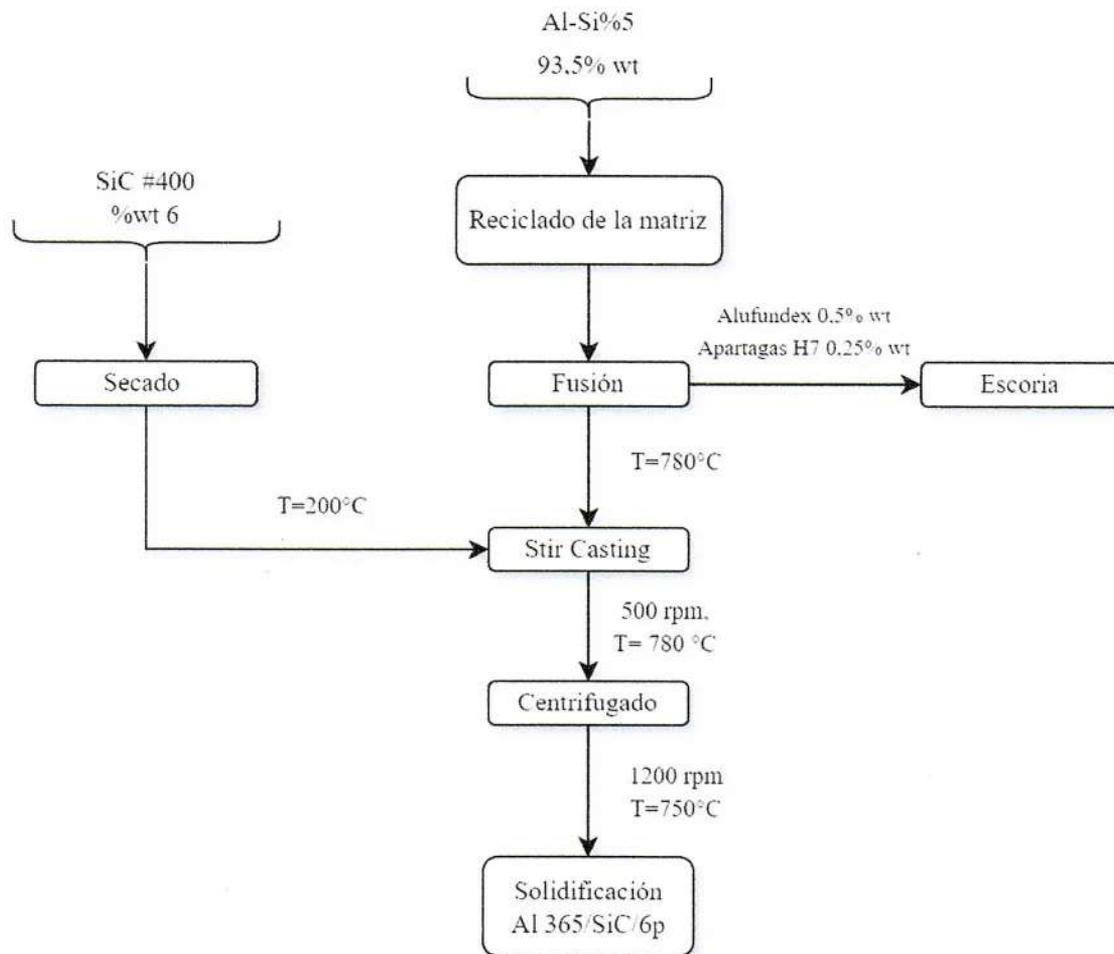


Figura 2.1. Diagrama metalúrgico para obtención del FGM.  
[Fuente: propia].

## 2.1 Equipos para la fabricación de FGM

### 2.1.1 Fundición en horno a gas

Actualmente el laboratorio de fundición de la Escuela Politécnica Nacional posee 5 tipos de hornos de fundición con diversas capacidades, entre ellos se encuentran el horno basculante, el fijo, el de cubilote, el de inducción de alta frecuencia y el horno a gas. Para la fundición del material base (matriz) se necesita conocer el estado inicial del equipo esto con el fin de evitar pérdidas de calor durante el proceso de fundición, se revisó el estado del material refractario así como el hogar del crisol y el propio crisol, que también es material refractario, para ello se realizó un primer ensayo en todos los equipos sin tener en cuenta los parámetros para la obtención de FGM, este ensayo se lo hizo para saber el

tiempo en el que el horno a gas llega a fundir la cantidad de aluminio (5kg) utilizada para el FGM, el tiempo en el cual se llega a obtener la colada de aluminio es de 40 minutos [11].

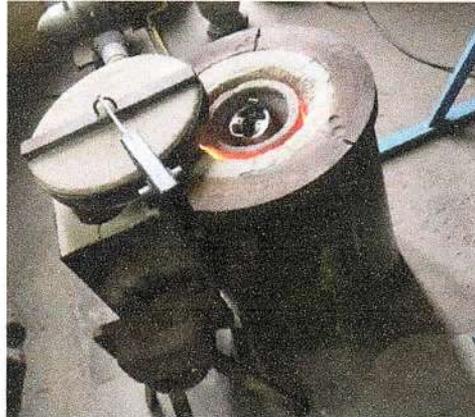


Figura 2.2. Horno a gas utilizado para la fundición del material base (Al-365).

[Fuente: propia].

Se seleccionó el horno a gas ya que no se requiere una gran cantidad de material base (Al-Si 365) la masa que se ha utilizado como matriz fue 5 kg, la cantidad de matriz de aluminio se irá agregando conforme se vaya fundiendo el material, este tipo de horno tiene la característica de utilizar un crisol intercambiable en base a la cantidad de material que se llegue a fundir, además este tipo de horno cuenta con un sistema de alimentación mediante GLP de encendido manual que inyecta aire a la cámara donde se encuentra el crisol, la temperatura máxima que llega a alcanzar el horno es de 1200°C, finalmente para evitar pérdidas de calor hacia el ambiente el horno a gas cuenta con una tapa del mismo material refractario del horno [11].

Las características del horno a gas son las siguientes:

- Tipo de combustible gas GLP
- Capacidad 18 kg
- Temperatura máxima 1200°C
- Funde aluminio y cobre
- Posee un crisol móvil

### **2.1.2 Máquina de colado por centrifugado horizontal (ex-situ)**

La máquina de colado utilizada para la obtención de los tubos funcionalmente graduados fue la diseñada y construida en [6], [9].



Figura 2.3. Máquina de colado horizontal por fuerza centrífuga.  
[Fuente: propia].

A continuación, se muestra un diagrama esquemático del equipo de fundición mediante fuerza centrífuga horizontal:

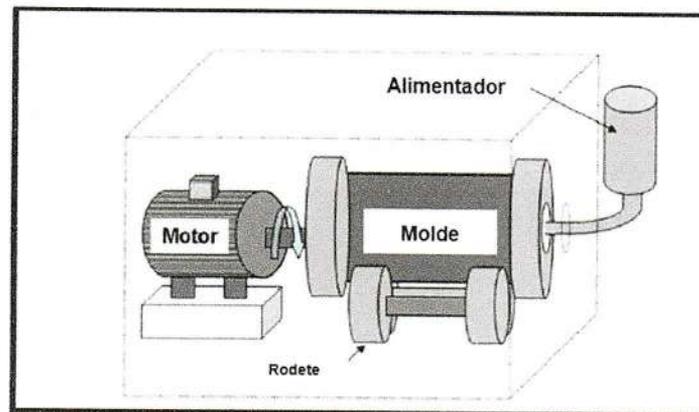


Figura 2.4. Esquema de máquina de colado horizontal por fuerza centrífuga [12].

La construcción de este tipo de máquina fue siguiendo normas como ASME, AISI, AWS, ISO con el fin de poder dar a la máquina una larga vida útil, así como un correcto ensamble y además para que las juntas soldadas de elementos no lleguen a fallar durante la operación de la máquina ya que estas deberán soportar las vibraciones generadas por la máquina en diferentes revoluciones.

Características dimensionales de la máquina de colado horizontal mediante fuerza centrífuga:

Alto: 76.2 cm

Ancho 50.8 cm

Largo: 121.92 cm

Cabe mencionar que los elementos de máquina mencionados son del primer diseño de la máquina centrifugadora, para optimizar su funcionamiento, simplificando y facilitando su el ensamble en el trabajo de titulación [6] se agregaron nuevos mecanismos que facilitan el movimiento de la máquina de centrifugadora.

Se agregaron elementos de máquina como: polea, tres chumaceras, tornillos prisioneros, sistema guiador, rodets conductores, rodets conducidos y un seguidor quedando un diseño final como se indica a continuación:

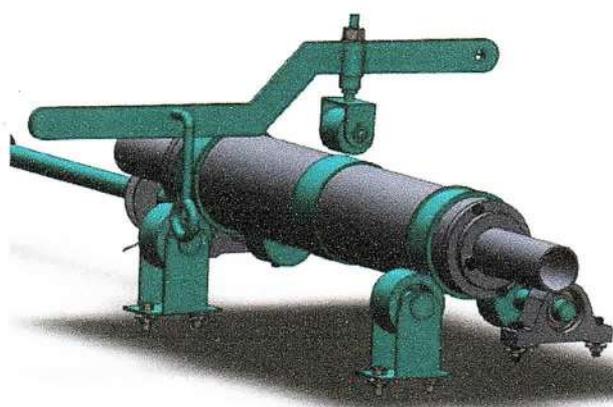


Figura 2.5. Diseño final de la máquina centrifugadora horizontal [9].

La dimensión global que posee la máquina se debe tener en cuenta que el elemento fundamental de la misma es su molde, esta debe poseer características tales como soportar altas temperaturas que la matriz, que su rugosidad interna sea de alta calidad para que el material no se quede adherido a las paredes del molde y debe soportar una alta presión. En base a estas características mencionadas la máquina posee el siguiente molde:

Tabla 2.1. Dimensiones del molde (coquilla) de la máquina centrifugadora [6], [9]

Características	Dimensión	Magnitud
Peso	15,591	Kgf
Diámetro mayor	12,548	cm
Diámetro menor	9,982	cm
Largo	60,960	cm
Área	4055,282	cm <sup>2</sup>
Volumen	2190,950	cm <sup>3</sup>
Material	Acero A-36	

Fuente: Norma API para tuberías de oleoducto.

Tabla 2.2. Propiedades del acero A-36 [12].

Propiedades físicas y mecánicas del Acero – A36		
Propiedad	Valor	Magnitud
Límite de fluencia	250	Mpa
Resistencia a la rotura	410	Mpa
Resistencia de la tracción	450	Mpa
Dureza	120-125	HB
Densidad	7850	Kg/m <sup>3</sup>

Este trabajo de titulación como se mencionó se apoya del trabajo especificado en [6] donde se utilizan los parámetros óptimos para el funcionamiento de la máquina que ya fueron utilizados para llevar a cabo el trabajo mencionado, en este caso se tomará como referencia los siguientes valores donde más adelante se mencionará los valores específicos de la máquina utilizados para llegar a fabricar el material funcionalmente graduado.

Tabla 2.3. Parámetros de funcionamiento de la máquina centrifugadora [6], [9].

Parámetros de funcionamiento	
Parámetros	Unidades y magnitud
Temperatura de precalentamiento	165 °C
Temperatura de colado	801°C
Temperatura promedio del molde	165°C – 500°C
Velocidad de rotación del molde	1200 rpm

### 2.1.3 Máquina mezcladora Stir Casting

Como se conoce este proyecto de investigación tiene como finalidad fabricar materiales funcionalmente graduados de baja densidad, el material a obtenerse será mediante la dispersión de partículas cerámicas de carburo de silicio (SiC) de malla #400 con un tamaño de partícula promedio de 28,46µm, en una matriz metálica de Al-365, este material posteriormente se solidificará en un molde permanente de acero A36. El proceso de dispersión para poder tener una distribución correcta de las partículas de refuerzo cerámico con el material base será mediante el uso de la máquina mezcladora stir casting, este proceso de mezcla se lo realizará una temperatura superior a la temperatura de fusión del material base (método ex situ), donde la colada de fundición debe estar lo más limpia posible, es decir antes de realizar la dispersión de las partículas se colocará en la colada

de fundición el apartagas H7 y el desgasificante Alufundex, la reducción de escoria permitirá que las partículas al momento de ser dispersadas por las aspas del equipo stir casting puedan llegar a toda la colada de fundición para finalmente tener como resultado el FGM [5].

En esta sección se dará a conocer el funcionamiento y características de la máquina stir casting que fue diseñada en el trabajo de titulación especificado en [5], cabe mencionar que parámetros como dimensión y material de las aspas del equipo, longitud y material del eje de rotación, velocidad de rotación de la máquina fueron escogidos en base a las diversas pruebas realizadas en el trabajo mencionado.

El equipo stir casting es una máquina que permite distribuir homogéneamente todas las partículas cerámicas en el material generando de esta manera un material compuesto, el proceso stir casting generalmente es utilizado por materiales de matriz metálica, donde el refuerzo generalmente es un material cerámico con un punto de fusión mayor al de la matriz.

A continuación, se muestra los elementos principales que conforman el equipo stir casting:

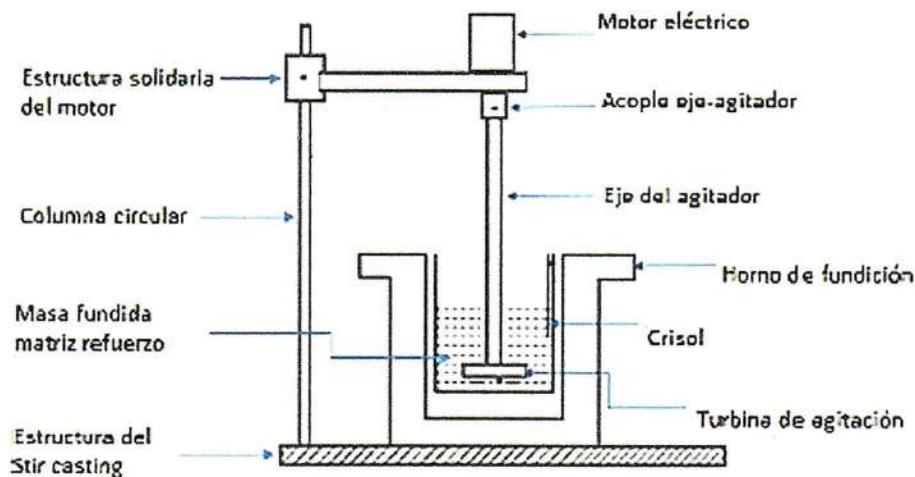


Figura 2.6. Elementos que conforman el equipo stir casting del Laboratorio de fundición de la EPN [5].

El equipo stir casting también cuenta con un panel de control electrónico donde se puede variar la frecuencia de giro de las aspas de agitación de la máquina, este variador de frecuencia tiene la capacidad de poder controlar motores eléctricos de hasta 1,5 kW, su manipulación es sencilla ya que posee un display digital donde se puede seleccionar el valor exacto de frecuencia que permitirá una mayor velocidad del agitador.



Figura 2.7. Características del variador de frecuencia del equipo stir casting [5].

Por otra parte, el motor eléctrico utilizado para impulsar este tipo de máquina es el siguiente que se observa en la imagen con su respectiva placa de datos técnicos:



Figura 2.8. Placa de datos del motor eléctrico de la máquina stir casting.

[Fuente: propia].

En cuanto a la geometría del agitador se utilizó el siguiente modelo matemático el cual en base a la cantidad de material a fundir permitirá determinar las dimensiones ideales para que el agitador pueda dispersar de forma homogénea las partículas cerámicas en la colada de fundición.

$$m = \delta * V$$

Donde:

m= masa total de la matriz a utilizar

D= diámetro del crisol.

$\delta$ = valor de densidad aproximado de la matriz Al-Si 365.

V= volumen total de la colada de fundición.

$$m = \delta * V = \delta * \pi * r^2 * h \quad \text{Ec. 1.}$$

$$5000 \text{ g} = 2,7 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} * \pi * \left(\frac{18}{2} \text{ cm}\right)^2 * h$$

$$h = 22,86 \text{ cm} \approx 228,6 \text{ mm}$$

Una vez se tenga el valor de la altura que ocupará la colada de fundición en el crisol seleccionado se procederá a determinar las dimensiones del agitador en base a conceptos científicos que fueron desarrollados por Hashim [13] apoyado de la teoría de suspensión de partículas sólidas en líquidos que fue estudiado por Nagata [14] como se mencionó anteriormente, este proyecto utiliza directamente el diseño idóneo del agitador después de varios ensayos y errores que fueron realizados en el trabajo de titulación en el que se basa este proyecto, una vez mencionado en la siguiente figura se indican las dimensiones recomendadas para un agitador de geometría de aspas planas.

Tipo de crisol	Dimensiones referenciales para un agitador tipo paletas planas						Observaciones
	O	b	C	θ	n	Ref.	
Crisol cilíndrico de fondo cóncavo	0.4D	0.1 a 0.2D	0.1H	90°	2	[61]	Debe encontrarse un O óptimo para que las partículas sean fluidizadas, a ciertos valores de velocidad del agitador
Crisol cilíndrico de fondo cóncavo	0,3 a 0,6D	0,2 a 0,5O	0,8 a 0,4H	30° a 90°	4	[62]	Mientras menor sea el diámetro O mejor eficiencia en la suspensión La suspensión se logra con distancias C no muy grandes
Crisol cilíndrico de fondo plano	0.45 a 0.5D	0.1 a 0.2D	0.1H	45°	4	[61]	Debe encontrarse un O óptimo para que las partículas sean fluidizadas, a ciertos valores de velocidad del agitador
Crisol cilíndrico de fondo plano	0.7D	0.1D	0.1 a 0.2H	90°	2	[41]	La simulación FEA para suspensión de partículas, indica que a esos rangos de C se obtienen los mejores resultados La velocidad de rotación tiene gran impacto en las características de la suspensión

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

Figura 2.9. Dimensiones de agitador con geometría de aspas planas [5], [13], [14].

Las ecuaciones por utilizar son las siguientes en base a la investigación realizada por G. Alfredo, B. López, J. Carlos, and G. Padilla [5]

$$\phi = 0,6 * D$$

$$b = 0,3 * D \quad \text{Ec. 2.}$$

$$C = 0,2 * h$$

Donde:

D= diámetro del crisol en mm.

Φ= diámetro de las aspas del agitador (de lado a lado) en mm.

b= altura de las aspas del agitador en mm.

h= altura de la colada de fundición en estado líquido en mm.

C= distancia entre las bases del crisol y las aspas.

$$\phi = 0,6 * 180mm = 108mm$$

$$b = 0,3 * 180mm = 54 mm$$

Ec 3.

$$C = 0,2 * 228,6 mm = 45,72 mm \approx 46 mm$$

Finalmente, una vez se tengan las dimensiones que tendrán las aspas del agitador se procede a diseñar el mismo con las siguientes especificaciones mostradas en la siguiente tabla:

Tabla 2.4. Parámetros de diseño del agitador equipo stir casting.

[Fuente: propia].

Parámetros	Dimensiones y/o especificaciones	Significado
h	231 mm	Altura que tendrá la colada de fundición en el interior del crisol.
n	4	Numero de aspas.
$\Phi$	108 mm	Diámetro de las aspas de punta a punta.
b	57 mm	Altura de las aspas.
C	46 mm	Distancia de la base del crisol hasta la base de las aspas.
$\theta$	75°	Ángulo de inclinación de las aspas.
V	497 rpm	Velocidad de rotación del agitador.
Material aspas	Acero 9620	Material utilizado para elaboración de las aspas.
Diámetro del eje de las aspas	12,7 mm	Con el valor de punta a punta de las aspas hay que agregar el valor del diámetro del eje donde van soldadas las aspas.
Longitud del eje de las aspas	600 mm	Este valor no es uno fijo ya que puede variar debido a que el equipo stir casting puede permitir un desplazamiento vertical para definir el valor del parámetro C.

Material del eje de las aspas	Acero inoxidable poner codificación	En este caso se seleccionó este tipo de acero debido a que posee una mayor resistencia a altas temperaturas en comparación del acero 4340 utilizado en el trabajo que se basa este trabajo de titulación.
-------------------------------	---	---

En la siguiente figura se indica el montaje del eje de acero inoxidable con las aspas del agitador, así como una pequeña representación de las dimensiones de las aspas, en el ANEXO 4 se indica en un plano de fabricación:



Figura 2.10. Montaje del eje de acero con el agitador después de la obtención del FGM.  
[Fuente: propia].

Como se mencionó el eje de acero utilizado previamente era de acero ASTM 4340, pero debido las diversas pruebas que se realizaron para obtener el material final estas quedaron deterioradas por su excesivo uso ya que está expuesto a contacto directo con la colada de fundición, además del eje que se sustituyó también se cambió la chumacera la cual esta debido al exceso de calor quedó prácticamente soldada al eje ASTM 4340, cabe mencionar que las superficies de ambos elementos mecánicos estaban cubiertas de corrosión y oxidación.



Figura 2.11. Eje y chumacera con superficie corroída.

[Fuente: propia].

## 2.2 Determinación de variables

En esta sección se dará a conocer la selección de variables para llevar a cabo la elaboración del material funcionalmente graduado con matriz Al 365 y partículas cerámicas SiC de la malla #400.

Para la elaboración del material funcionalmente graduado se requirió de la ayuda de instrumentos mecánicos como eléctricos, instrumentos de medición, revisión de estados de los equipos disponibles en el laboratorio así como materiales secundarios como fundentes, desgasificantes, elementos de máquina que conjuntamente permitirán cumplir de forma correcta los pasos para llegar a producir el FGM, estos elementos así como la descripción del proceso y cálculo de cantidades de material a utilizar se describirán en este apartado con el fin de poder replicar este trabajo en un futuro para nuevas investigaciones.

### 2.2.1 Variables del horno a gas

Para la elaboración del FGM se mencionará primero el horno de fundición, en la sección 2.1.1 Horno a gas se menciona las características del equipo a utilizar así como la capacidad y el tipo de combustible a utilizar para la fundición de la matriz de Al-Si 365, en este caso se menciona que se realizó un encendido previo del honor para verificar que no existan fugas de GLP por la sección tuberías, también se hizo una revisión de fugas de aire en los accesorios del horno así como una revisión del estado del refractario que cubre todo el hogar del crisol. Una vez realizado esta inspección del equipo se procede a seleccionar el crisol que pueda fundir la cantidad de 5 kg de aluminio que son los utilizados para fabricar el material funcionalmente graduado, el tipo de crisol que se selección fue el crisol arcilla-grafito #18 marca diamant, este crisol tiene la capacidad de poder llegar a fundir hasta una cantidad de 7 Kg de aluminio, en la siguiente figura se indica tanto las dimensiones del crisol como sus dimensiones:

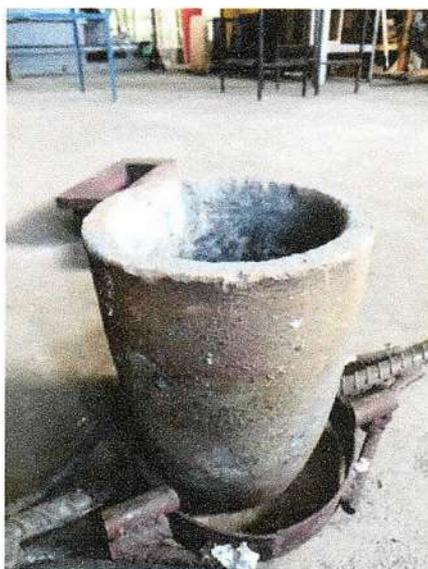


Figura 2.12. Crisol de arcilla-grafito.

[Fuente: propia].

En este primer apartado las variables de temperatura seleccionados fueron:

Tabla 2.5. Parámetros seleccionados en el horno de fundición y partículas SiC.

[Fuente: propia].

Tiempo de calentamiento conjunto horno crisol, matriz.	15 minutos
Temperatura de precalentamiento	248°C
Temperatura del ambiente	20°C
Tiempo de fundición de matriz Al 365 (5kg)	67 minutos
Temperatura de fusión completa de la matriz	780°C
Temperatura de secado de partículas SiC	150 °C
Tiempo de secado de partículas	15 minutos

### 2.2.2 Variables del equipo Stir Casting

El equipo stir casting, en este caso se pudo evidenciar a simple vista el mal estado del equipo en su eje de transmisión de movimiento, chumacera y su agitador, el eje de transmisión de movimiento debido al excesivo calor que se genera durante la dispersión de las partículas del equipo género que se llegará a soldar con la chumacera impidiendo que esta pueda girar, por otro lado, las aspas del agitador debido a las varias pruebas pre eliminares que se realizaron previamente en el trabajo de titulación especificado en [5] esas esos son los defectos que poseía la máquina stir casting. Cabe mencionar que el equipo

stir casting posee un rango de valores de frecuencia que van desde 10 (280,4 rpm) hasta 44 (1216 rpm)



Figura 2.13. Equipo stir casting utilizado para la dispersión de las partículas en la colada de fundición.

[Fuente: propia].

Tabla 2.6. Parámetros seleccionados en el equipo stir casting.

[Fuente: propia].

Tiempo de colocación de Apartagas y desgasificante.	7 minutos después de la matriz fundida en su totalidad
Tiempo de obtención de escoria.	3 minutos
Tiempo de colocación partículas.	4 minutos después de obtención de escoria
Velocidad de rotación stir casting	497 rpm
Frecuencia del stir casting	18

Para este tipo de máquina el valor del parámetro seleccionado para dispersar las partículas de carburo de silicio en la colada de fundición es de 497 rpm con una frecuencia de 18, este valor es apto para mezclar las partículas cerámicas, este valor es tomado en base a el trabajo de titulación especificado en [5].

### 2.2.3 Variables máquina de colado horizontal ex situ

En este caso se revisó todos los elementos de máquina (rodamientos) que permiten le movimiento rotacional, con el fin de poder evidenciar una correcta rotación y además se

revisó el sistema de calentamiento del molde, así como las tuberías por donde circula el gas GLP con el fin de poder evidenciar alguna fuga y para evidenciar que el molde se calentará de forma adecuada. La velocidad rotacional del molde se la ira controlando mediante un variador de frecuencia, el embudo por donde se colará el material fundido también debe ser precalentado hasta cierta temperatura para evitar que la colada de fundición se quede adherida a sus paredes.

Los parámetros seleccionados para el molde de fuerza centrífuga fueron los siguientes:

Tabla 2.7. Parámetros de la máquina centrifugadora  
[Fuente: propia].

Temperatura del colado de matriz.	780°C
Temperatura de precalentamiento del molde.	248°C
Temperatura precalentamiento del alimentador.	248°C
Velocidad de rotación del molde.	1200 rpm
Tiempo de colado.	8 minutos
Enfriamiento.	Convección natural

Finalmente se indicarán los valores seleccionados en cuanto a cantidad de partículas cerámicas así como de desgasificante y fundente, estos valores fueron tomados de las diversas pruebas que fueron realizados en el trabajo indicado en [5] en este trabajo se realizaron 13 pruebas pre eliminares en donde se pudo evidenciar que en la prueba N°13 se utilizaron las cantidades ideales de SiC #400 como de desgasificante y fundente, en ese trabajo de titulación el objetivo era obtener una mejora en propiedades mecánicas del material compuesto a fabricar lo que implicaba un uso control más minucioso en cuanto a parámetros; en este trabajo de titulación como se mencionó en el alcance del trabajo es poder evidenciar el gradiente de distribución de las partículas cerámicas mediante metalografía así como realizar un ensayo de micro dureza en la zona del gradiente de distribución y un ensayo de microestructura para saber de qué forma la microestructura del material fue modificada.

## **2.3 Caracterización del FGM**

Para caracterizar el FGM obtenido se utilizará el método de caracterización mediante metalografías, esta técnica permite estudiar las características microestructurales que posee el material con el objetivo de poder relacionarlas con las propiedades del material.

Para poder obtener la información adecuada del material se debe realizar un análisis microscópico donde se tendrá información de las probetas, en el caso de que la superficie de las probetas analizadas no esté preparada de la mejor manera el microscopio no podrá aportar la información adecuada para su respectivo análisis, para ello se requiere realizar de forma correcta la preparación metalográfica siguiendo una secuencia lógica de diversas operaciones donde cada una de estas secuencias son variables que variaran dependiendo del material a analizar en este caso como se conoce se realizara el análisis de un material funcionalmente graduado con matriz de Al 365 y refuerzo de partículas cerámicas de SiC de malla #400, las operaciones utilizadas para llevar cada una de las 16 probetas a metalografía fueron, corte, desbaste, lijado, pulido y ataque químico, si cada una de estas operaciones mencionadas se lo realiza de una forma incorrecta provocaría imperfecciones como destrucción de bordes de grano, aparición de inclusiones o incluso en muchos casos obtener una superficie de estudio totalmente diferente a la esperada lo que implicaría que los resultados no sean lo esperado [15], [16].

La preparación de las probetas es básicamente someter al FGM a un proceso de desbaste manual con sierra para metal, lijado, desbaste, pulido, empastillado y ataque químico, cada uno de estos procesos se los detallaran en este apartado, con el fin de dar a conocer los materiales utilizados y como poder manipularlos.

### **2.3.1 Obtención de probetas**

Es la primera fase para llevar las probetas a análisis metalográfico, en este primer punto se tiene que realizar dos cortes de forma transversal (anillos) al tubo obtenido de la máquina de colado centrifugado, estos dos cortes se lo realizarán a una distancia de 50 mm del inicio de la tubo con un ancho de 15 mm para las primeras 8 probetas, para el segundo grupo de 8 probetas se escogido una distancia de 100 mm desde el inicio del tubo de igual manera con un ancho de 15 mm, el corte se lo realizo de forma manual con una sierra de corte de metal, debido a su baja dureza el aluminio puede ser cortado mediante métodos manuales, además es beneficioso en el sentido de que no se puede llegar a alterar la microestructura de la superficie a examinar. A las probetas se les asigno una codificación

con el fin de poder identificar la superficie a estudiar y además para diferenciar las probetas de una sección con las de la otra sección.



Figura 2.14. Probetas obtenidas de cada sección del tubo.

[Fuente: propia].

### 2.3.2 Desbaste, lijado y pulido

En la segunda fase que es la de desbaste o también conocido como lijado, cada una de las probetas obtenidas del proceso anterior se las lijarán en la máquina de desbaste , en este proceso las probetas deben tener como finalidad superficie plana con un acabado semi pulido en la zona donde se realizará el respectivo análisis metalográfico, a la máquina se le cambio la lija que poseía ya que estaba desgastada y se le colocó una nueva, se utilizó una única lija de grano número 100 para el desbaste grueso, para este primer lijado de la superficie, este procedimiento es con el fin de tener una superficie final plana y además que se encuentre libre de formas irregulares producidas por la herramienta manual de corte, para este caso el lijado se lo realiza en un ambiente con lubricación (agua) para evitar posibles excesos de temperatura provocados por la fricción producida por la máquina, al momento de colocar la probeta en la máquina pulidora se debe presionar la probeta de una forma no excesiva ya que se llegaría a producir rayaduras en la superficie provocando que nuevamente se vuelva a repetir el procedimiento.

En las siguientes figuras se indica la máquina pulidora, así como la superficie donde se ira lijando cada una de las probetas:



Figura 2.15. Máquina pulidora del laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla.

[Fuente: propia].



Figura 2.16. Probetas que serán lijadas en la máquina

[Fuente: propia].

Una vez que se tenga completa la fase anterior en todas las probetas se sabe que cada una de estas puede llegar a poseer bordes irregulares que dificultarían su manipulación para los siguientes procesos de lijado y pulido, para ello se realiza el proceso de empastillado de probetas con el fin de tener una mejor manipulación y puede aumentar la seguridad del transporte de las muestras. Se debe tener en cuenta que los materiales utilizados para el proceso de empastillado no deben dañar físicamente a las probetas lo que provocaría que alteren los resultados finales y dificulte su análisis.

Para empezar con el proceso de empastillado se realiza una previa limpieza a las probetas que ya han sido desgastadas en la segunda fase, esto con el fin de eliminar impurezas

existentes que hayan podido quedarse en las probetas, para ello se utilizó agua conjunta con alcohol.

Las características que debe cumplir la resina utilizada para empastillar las probetas son las siguientes:

Buena adhesión, alta resistencia mecánica, resistencia a ataques químicos.

Para empastillar cada una de las muestras del FGM se utilizó resina poliéster, esta resina se obtenida de la mezcla de los líquidos MEK (Peróxido de Metil Etil cetona) y cobalto, cada una de las probetas utilizo una cantidad de 40 ml de la resina y se las dejo secar durante un periodo de 15 minutos.



Figura 2.17. Empastillado de probetas.

[Fuente: propia].

En la cuarta se volvió a realizar el proceso de desbaste de cada una de las probetas ya empastilladas, como se sabe el objetivo del desbaste es obtener una superficie lo más plana y casi pulida en su totalidad en la zona de análisis, en este caso se utilizó nuevamente la lija de lona número 100, obteniendo el siguiente acabado en las probetas:



Figura 2.18. Desbaste de las probetas ya empastilladas.

[Fuente: propia].

Finalmente, en la quinta y última fase se realizó el pulido final o también conocido como pulido especular, este proceso es el paso final antes de llevar cada una de las probetas a metalografía, el objetivo de esta fase es eliminar rayaduras en la superficie de análisis y conseguir además una superficie reflectante para la observación mediante microscopio.

Para este tipo de pulido se utilizaron dos tipos de paños de  $3\mu\text{m}$  y  $1\mu\text{m}$  conjuntamente con una suspensión de partículas de diamante de  $1\mu\text{m}$ , el proceso de esta fase es empezar el pulido con una lija número 150 en la máquina desbastadora y posteriormente llevar a las probetas a la máquina pulidora automática Forcipol con cabezal Forcimat donde se hará una pasada a las probetas con el paño de  $3\mu\text{m}$  y otra con el paño de  $1\mu\text{m}$ , posteriormente se utilizarán lijas 240, 320, 400, 600, 1200 y 2500 en la máquina mencionada, cabe mencionar que para tener una mejor eficiencia en el pulido la probeta o probetas que estén en la máquina pulidora automática giren en dirección contraria al sentido del plato de pulido.

A continuación, se indica en las figuras la máquina pulidora automática, así como el acabado final de las probetas para serán llevadas a metalografía, donde se seleccionará las dos mejores probetas para un análisis a profundo, así como dos probetas con mayor cantidad de porosidades para un análisis superficial, las dos mejores probetas serán atacadas químicamente con HF al 0,5 % que permitirá evidenciar la microestructura del FGM [4].



Figura 2.19. Máquina pulidora automática del Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla.

[Fuente: propia].



Figura 2.20. Aspecto reflectante final de las probetas de FGM.

[Fuente: propia].

### 2.3.3 Ensayo metalográfico y ataque químico

Una vez obtenidas las micrografías de cada una de las probetas de las secciones se procede a seleccionar las dos probetas ( una de cada sección circular), estas probetas que poseerán una mejor evidencia del gradiente de composición serán atacadas químicamente con el fin de poder evidenciar cada uno de los microconstituyentes que se llegaron a formar durante el proceso de obtención del FGM, para ello en base al ASM HandBook volumen 9 seleccionó el químico con el cual se atacara cada una de las probetas así como el tiempo que deberán ser atacadas, para este caso se utilizó el compuesto químico ácido fluorhídrico (HF) al 0.5% que ataco a las probetas durante el tiempo de 15 s [4].

El procedimiento para obtener la probeta finalmente atacada es el siguiente:

En un recipiente colocar el compuesto químico HF al 0,5%, después de sumergir la superficie de la probeta que será atacada sin tocar el fondo del recipiente durante 15 s. Una vez atacada la superficie de la probeta se procede a retirar con agua los restos del químico en la superficie con ayuda de un algodón, luego se coloca alcohol en la superficie para eliminar cualquier tipo de impureza. Finalmente se procede a secar la superficie de la probeta con una secadora eliminando así los restos de alcohol que llegasen a quedar.

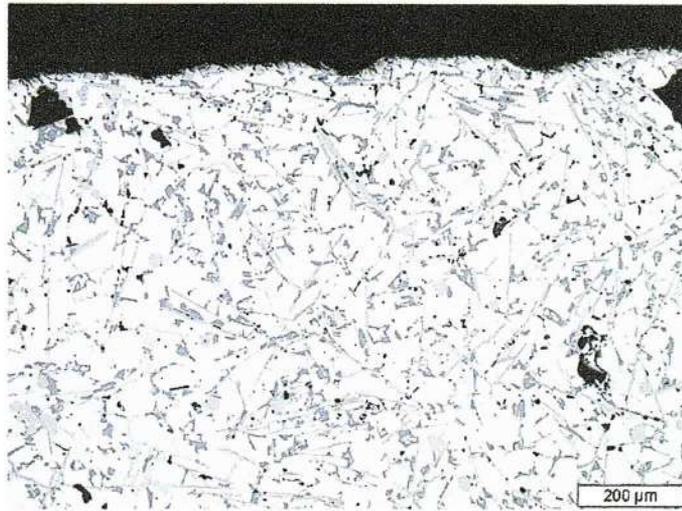


Figura 2.21. Micrografía con aumento 100x sin ataque químico.  
[Fuente: propia].

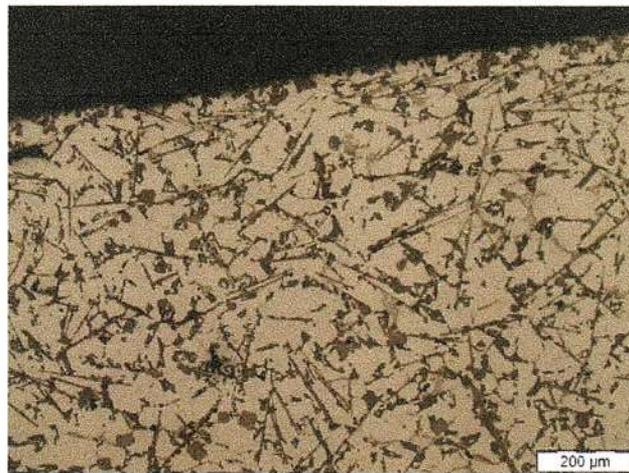


Figura 2.22. Micrografía con aumento 100x con ataque químico.  
[Fuente: propia].

### 3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 3.1 Resultados

Como se conoce el material matriz seleccionado es la aleación ANSI AA 365.0 que permitió la obtención de los tubos del FGM de MC 365.0/SiC/%p, el material matriz fue utilizado en el trabajo de titulación especificado en [5] donde ya se realizó su respectivo estudio al igual de la selección de las partículas cerámicas SiC #400, a continuación se indica, el tubo FGM así como la sección de donde se obtuvieron las probetas del tubo FGM al igual que el cuadrante o cuadrantes seleccionados para la caracterización del material:



Figura 3.1. Tubo FGM obtenido mediante colado por fuerza centrífuga.  
[[Fuente: propia].



Figura 3.2. Vista frontal y trasera del tubo FGM.

[Fuente: propia].

Estableciendo las dimensiones del tubo graduado obtenido, se puede mencionar que este tiene una longitud total de 472 mm con un espesor variable, en la primera sección desde la parte frontal el tubo tiene un espesor de 14 mm hasta una longitud de 222 mm, después su espesor cambia a 5 mm y terminando en la parte final del tubo con un espesor de 3mm.

Como se observa en la figura 3.1 existen varias imperfecciones una vez obtenido el tubo funcionalmente graduado entre ellas existen defectos de fundición como porosidades (A)

en su superficie, esto se da debido a la contracción por la solidificación de la cantidad del último material fundido o incluso también al tiempo de enfriamiento que tienen las aleaciones que posee el tubo funcionalmente graduado por otra parte existen también juntas frías (B) producidas por la falta de fusión o a un enfriamiento prematuro, estas juntas frías también son originadas por una temperatura de vaciado muy baja y por una baja fluidez del material fundido. En la figura 3.2 se observa que el material tiene un espesor menor en cuanto a la parte frontal del tubo figura 3.3 esto es debido a que se utilizó únicamente 5kg de material lo que no llegó a abastecer todo el molde de la máquina centrífugadora horizontal.



Figura 3.3. Imperfecciones en el tubo FGM obtenido mediante colado por fuerza centrífuga.

[Fuente: propia].

Las probetas se la extrajeron de la sección ubicada a 142 mm de la parte frontal con un espesor de 15 mm (probeta 4A), para la otra se extrajo un segundo anillo a una distancia de 207 mm desde la parte frontal (probeta 7.1) con el mismo espesor que la primera, esta última probeta no se la atacó químicamente, el análisis correspondiente a esta probeta es únicamente para centrarse en el gradiente de distribución y la cantidad de microporosidades que llegó a presentar, a continuación, se muestra mediante un esquema en SolidWorks la ubicación de las probetas seleccionadas para la caracterización:

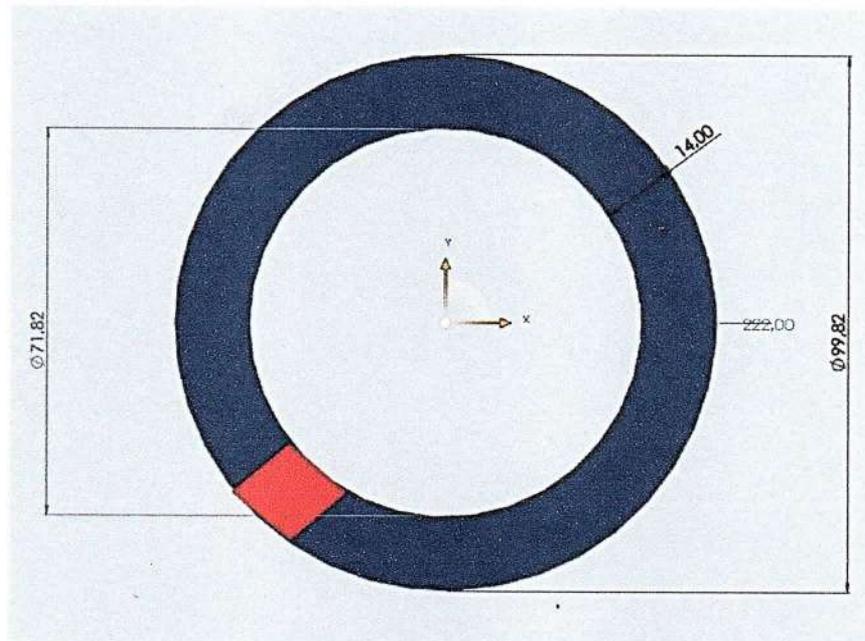


Figura 3.4. Probeta 4A escogida del primer anillo (izquierda).

[Fuente: propia].

### 3.1.1 Gradiente de distribución de partículas en probeta 4A

Las codificaciones para la probeta de la izquierda será 4A, esta probeta es la que menor cantidad de imperfecciones (poros) poseen en cuanto a visualización en el microscopio y además es en la que se evidencia de mejor manera el gradiente de distribución de las partículas cerámicas y eso se evidenciara de cierta forma también en el ensayo de micro dureza.

A continuación, se observan el gradiente de distribución de las partículas de SiC en la probeta 4A sin ser atacada químicamente a una escala de 200  $\mu\text{m}$  y aumento de 100x:

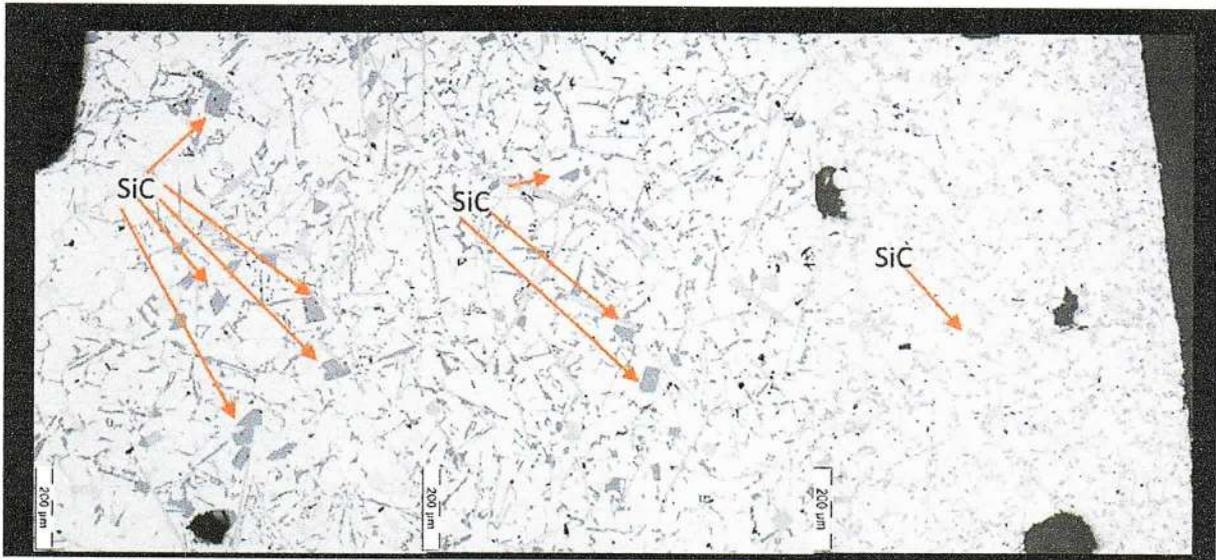


Figura 3.5. Gradiente de distribución de partículas en probeta 4A SiC desde la zona del diámetro interno (izquierda) hasta la zona del diámetro externo (derecha).

[Fuente: propia].

Como se observa en la figura 3.5 las flechas de color naranja indican las partículas de SiC (color gris azulado) con una geometría poliédrica irregular, el gradiente de distribución de las partículas SiC se lo estudia en la dirección radial y va en el orden de menor cantidad desde la zona del diámetro interior del tubo hasta una mayor cantidad en la zona del diámetro externo del tubo, a simple vista se puede observar que las partículas cerámicas tienen un mayor tamaño en el diámetro interno, pero mientras se va avanzado a la zona central como a la zona superior el tamaño de estas se reduce pero hay una mayor cantidad, esto se evidencia en las zonas central y superior ya que las partículas de SiC conservan la morfología poliédrica irregular pero distribuida en mayor cantidad, hay que diferenciar el silicio que también se evidencia de la misma coloración pero este tiene morfologías diferentes como por ejemplo tipo aguja, plaquetas y escritura china, esta cantidad de silicio es propia del material pero también existe la posibilidad de que las partículas cerámicas hayan reaccionado formando una mayor cantidad de esta fase a lo largo de la superficie de análisis. Las zonas interior y central de la superficie de análisis poseen una acumulación de partículas con una distribución no tan homogénea en comparación con la zona superior que posee mayor cantidad de partículas de SiC distribuidas de forma homogénea y con una geometría similar, esta acumulación de partículas cerámicas tanto en el interior como en el centro se deben a las fuerzas radiales que son generadas por la fuerza centrífuga lo que provoca que las partículas se lleguen a segregar en dichas zonas. También se observan ciertas microporosidades que llegan a ser producidas por temperaturas de solidificación que poseen cada uno de los microconstituyentes del FGM. Con esto se puede

determinar que existe un gradiente de partículas lo que indica que el tubo obtenido es un material funcionalmente graduado con una distribución de partículas de menor a mayor cantidad. La tonalidad que tienen las partículas y morfología de las partículas SiC se las identificaron en base a la siguiente investigación [17].

### 3.1.2 Microconstituyentes del FGM obtenido en probeta 4A

Los microconstituyentes que se evidenciaran en las siguientes micrografías fueron atacados químicamente por el 5M del libro ASM Handbook V9, esta sustancia es el ácido fluorhídrico al 0,5% en volumen sumergido durante 15s, las micrografías fueron tomadas a una escala de 50  $\mu\text{m}$  con un aumento de 500x.

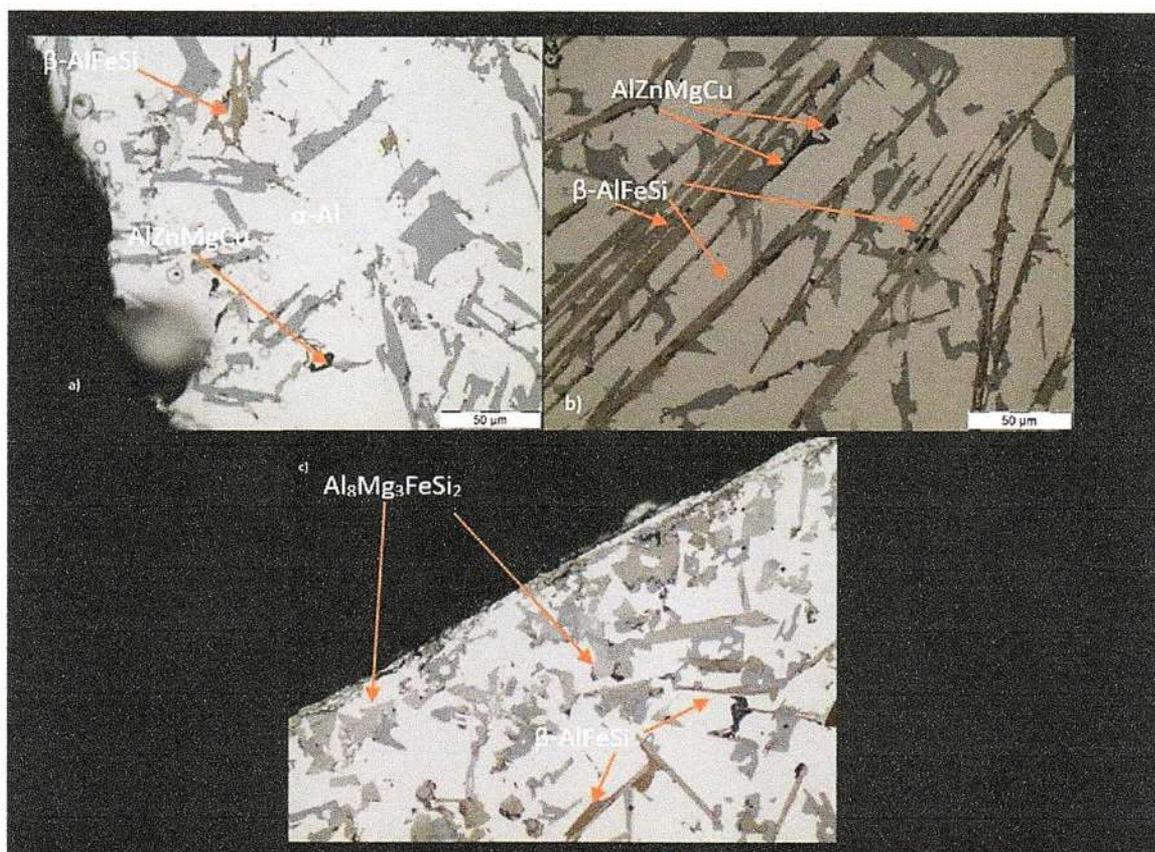


Figura 3.6. Micrografía 4A zona diámetro interno (a), zona central (b) y zona superior (c) atacada.

[Fuente: propia].

Como se observa en la figura 3.6 en las micrografías existen diversos microconstituyentes, la principal es la matriz de color blanco cuyo constituyente es  $\alpha$ -Al, debido al bajo porcentaje de ácido HF utilizado y al tiempo de ataque de 15s esta fase no se segregó, los poliedros irregulares que se observan son fases de silicio, existe poca acumulación en (a) pero va aumentando conforme se avanza a las zonas superiores hasta que en (c) existe una

distribución homogénea de silicio, por otra parte, al tener el material constituyentes como Fe, Cu, Mn, Mg, Cr, Zn y Ti llegan aparecer diversas fases entre ellas una de tonalidad marrón claro en las figuras (a) y (c) que viene a ser  $\beta$ -AlFeSi, este mismo constituyente aparece en la zona (b) pero en forma de agujas con una tonalidad de marrón claro, por otra parte, el microconstituyente que aparece en las tres micrografías cuya tonalidad es de color azul oscuro que en algunas zonas aparece tipo escritura china es el AlZnMgCu, finalmente en la figura (c) es donde únicamente existe este constituyente el  $Al_8Mg_3FeSi_2$ , este aparece en forma de escritura china en algunas zonas de la figura y en otras aparece como poliedros con una coloración gris claro, todos estos microconstituyentes se verifican en base a lo consultado en la referencia [4] donde se debe tener en cuenta que el reactivo utilizado es el HF al 0,5% y en base a esto se comprueba las tonalidades de los microconstituyentes y se realiza a verificar las fases existentes[4], [15], [18].

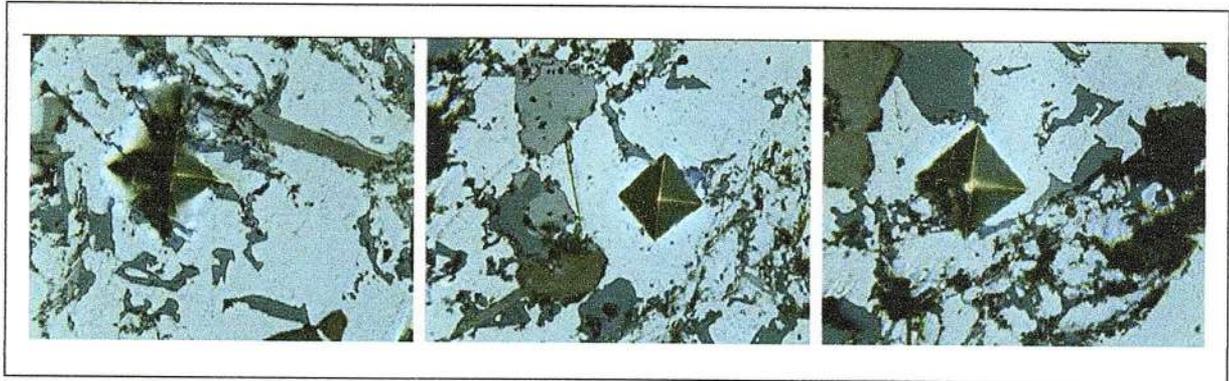
### 3.1.3 Ensayo de micro dureza a probetas atacadas químicamente

La medición de la micro dureza se la realizó en base a la especificación de la norma ASTM E384-17 sobre ensayos de micro dureza donde el valor de carga para matriz de aluminio es de 50 gf durante un tiempo de 15s. Los valores de micro dureza permiten tener una mejor percepción de como influyen cada uno de los microconstituyentes del FGM en cada una de las zonas del material, centrándose sobre todo en la influencia del gradiente de composición generado por el SiC. Los valores de micro dureza que se muestran a continuación son en zonas, inferior, centro y superior de la probeta 4A teniendo en cuenta que se realizaron 3 indentaciones por cada zona obteniendo de cada una un valor promedio.

**Tabla 3.1.** Resultados micro dureza zona inferior probeta 4A.

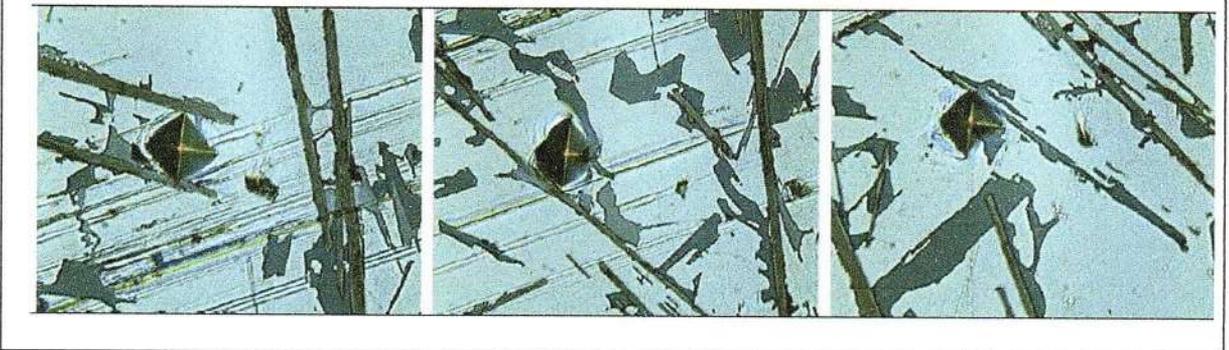
[Fuente: propia].

No. Prueba	Zona	Tiempo [s]	Dureza Vickers promedio (50gf)
1	Inferior	15	62,96



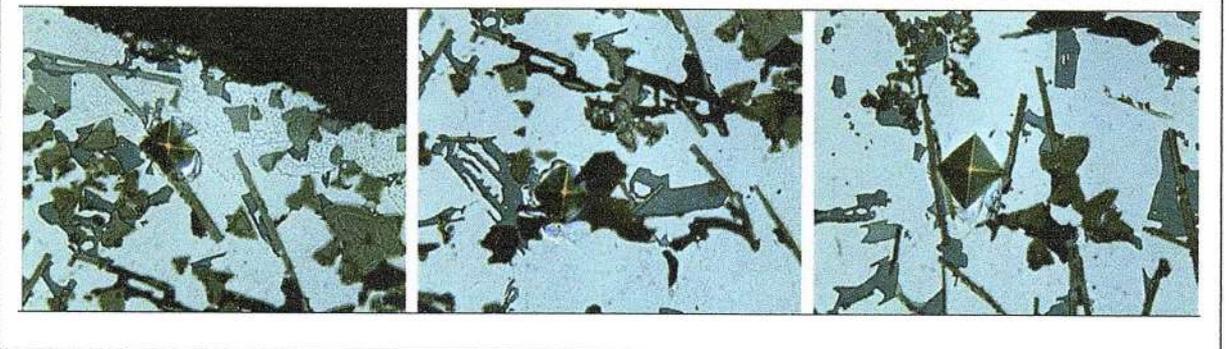
**Tabla 3.2.** Resultados micro dureza zona central probeta 4A.  
[Fuente: propia].

No. Prueba	Zona	Tiempo [s]	Dureza Vickers promedio (50gf)
1	Central	15	130,16



**Tabla 3.3.** Resultados micro dureza zona superior probeta 4A  
[Fuente: propia].

No. Prueba	Zona	Tiempo [s]	Dureza Vickers promedio (50gf)
1	Superior	15	163,91



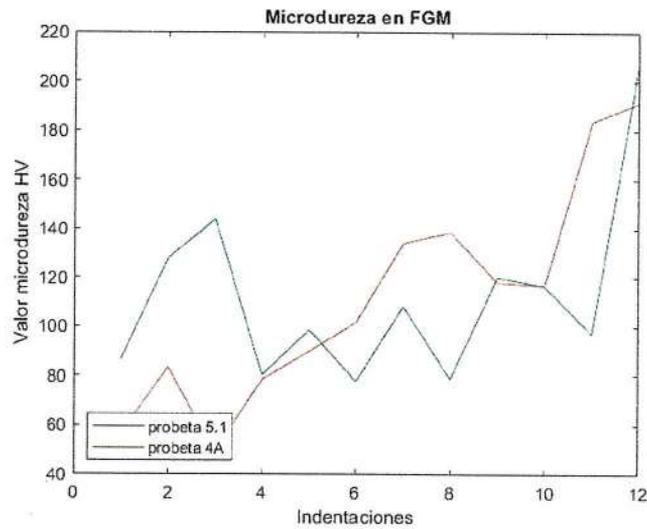


Figura 3.7. Gráfica de micro dureza de las dos probetas micro indentadas.

Fuente: [propia].

Tabla 3.4. Orden de indentaciones en las zonas de análisis con su respectiva dureza HV

[Fuente: propia].

Posición	HV
1	86,56
2	127,9
3	143,85
4	80,23
5	98,58
6	77,75
7	108,13
8	78,82
9	120,18
10	116,46
11	97,06
12	207,95

El orden en cómo se realizaron las micro indentaciones se las indica en el ANEXO 5 donde estas se las realizaron desde el diámetro interior hacia el exterior, en cuanto a la figura 3.7 se puede observar que el gradiente de distribución de las partículas cerámicas llega a afectar a la micro dureza sobre todo en la probeta 4A, que claramente se observa que es un FGM como se mencionó en la 3.1.1 Gradiente de distribución de partículas, las partículas cerámicas se distribuyen de menor a mayor cantidad teniendo un valor de dureza máximo en la zona superior de 191,35 HV y un valor de 56,42 HV en la zona interior, la

probeta 5.1 si posee de igual manera un incremento de dureza pero con la diferencia de que el valor de micro dureza en la zona interna es elevado en comparación con la zona central e incluso mayor que ciertas parte de la zona superior, por este motivo e escogió la probeta 4A ya que representa de mejor forma el comportamiento de un FGM.

Como se mencionó anteriormente el propósito de la micro indentación es conocer la influencia que provocan las partículas de SiC #400 en el FGM, el gradiente de composición de partículas que van desde un valor de bajo contenido en la zona interior de la probeta que va aumentando conforme se avanza a la zona superior, los valores de micro dureza van en el mismo sentido que la cantidad de partículas de SiC, como se observan en las figuras de cada zona micro indentada el penetrador Vickers es colocado en zonas donde se encuentra el silicio, en la zona interior existen varias imperfecciones se evidencia que el penetrador no marco completamente las zonas y además como no se pudo tener una buena distribución de partículas SiC el valor de micro dureza es bajo, en las zonas central y superior el valor de micro dureza es mayor, como se observa la cantidad de SiC es mayor que en la zona inferior y demás es libre de imperfecciones, el penetrador tiene una incrustación completa en esas zonas.

Con esto se puede decir que se llegó a caracterizar al material como uno del tipo FGM debido a que existe un gradiente de distribución de partículas cerámicas SiC que se observa en las micrografías y además con el ensayo de micro dureza se comprobó lo mismo, los valores de micro dureza que van aumentando conforme se avanza a las zonas externas de las probetas debido a que las partículas de SiC se llegaron a distribuir de forma homogénea, pero con la misma morfología.

#### **3.1.4 Análisis de gradiente de distribución de SiC en probeta 7.1**

Para este segundo análisis se tomó en cuenta el segundo anillo mencionado en el apartado 3.1 resultados, la diferencia con la probeta 4A es que presenta una gran cantidad de microporosidades provocadas por las mismas razones que se mencionaron en el apartado, en este caso se analizará como se encuentra distribuido el gradiente de distribución de partículas cerámicas SiC a lo largo de las zonas interior, centro y superior de las probeta con codificación 7.1, a estas probeta no se le realizó un ataque químico debido a que la gran cantidad de micro porosidades impedirían observar los microconstituyentes en las superficies de análisis.

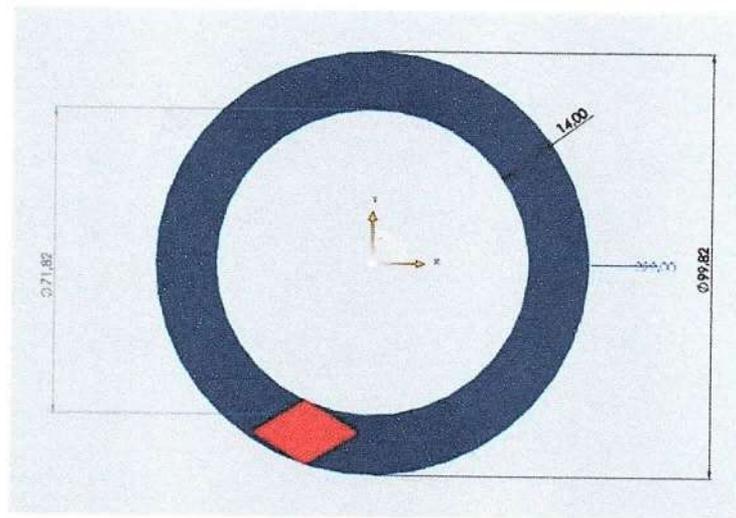


Figura 3.8. Probeta 7.1 escogida del segundo anillo.

[Fuente: propia].

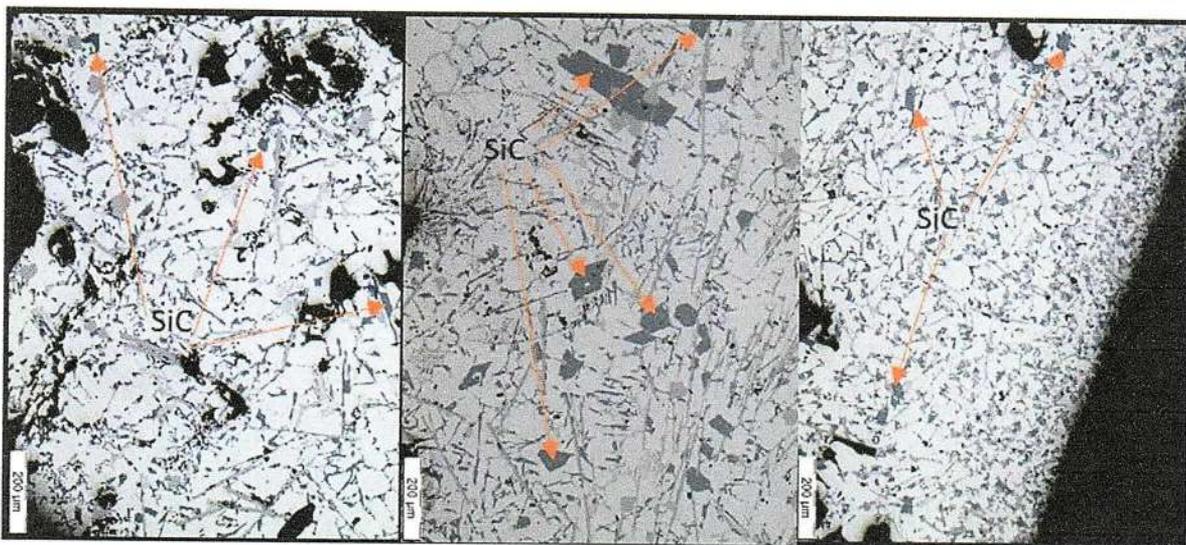


Figura 3.9. Probeta 7.1 desde la zona del diámetro interno (izquierda) hasta la zona del diámetro externo (derecha).

[Fuente: propia].

En la probeta 7.1 en la zona inferior se llega a observar que existe una cantidad considerablemente grande de microporosidades que son las de tonalidad oscura, cabe mencionar que con el uso de ataque químico se podría observar si todos los elementos de tonalidad oscura llegan a ser microporosidades, ya que en apartados anteriores hay microconstituyentes que son de esa misma tonalidad, de todas formas se llega a observar que el silicio existente se encuentra cerca de las microporosidades, las partículas de SiC existen en poca cantidad en la zona interior, en comparación con la probeta 4A que tuvo un tamaño de partículas SiC mayor en la zona interior, en la probeta 7.1 pasa lo contrario, la zona central posee un tamaño de partículas SiC sumamente grande que se reduce en

tamaño pero aumenta en distribución en la zona superior, las partículas SiC existen en las tres zonas de análisis pero con una mayor cantidad en la zona superior provocada por una velocidad de rotación que fue elevada pero no se mantuvo durante mucho tiempo haciendo que las partículas de SiC con mayor densidad se queden almacenadas en la zona interior, en la zona superior existe grandes microporosidades pero cerca de estas no existe una gran acumulación de silicio ni de partículas SiC, en la zona superior existe mucha más cantidad de SiC que las otras dos zonas con morfología similar pero distribuido homogéneamente con tamaños no tan pronunciados.

### 3.2 Conclusiones

- Se realizó el estudio de la influencia de las partículas de SiC en una matriz de aluminio 365.0, la matriz originalmente tiene una cantidad de 10,32% en peso de silicio, al momento de aumentar las partículas cerámicas de SiC mencionadas, la cantidad de silicio aumentó debido a que las partículas SiC llegaron a reaccionar aumentando este constituyente a lo largo de las zonas de análisis, no hay que confundir la cantidad de silicio con la cantidad de partículas SiC ya que estas poseen únicamente la morfología poliédrica irregular mientras que el silicio como componente químico tiene una morfología de escritura china, plaquetas y agujas, se pudo evidenciar que las partículas de SiC aumentan en forma de gradiente en cada una de las micrografías mostradas (probeta 4A).
- El silicio se llegó a presentar más comúnmente en lugares donde se encuentran la mayor cantidad de porosidades, una de las causas por lo que sucede lo mencionado es el no haber utilizado un afinador de grano, este permitiría reducir en primera instancia las microporosidades en las superficies de las muestras y poder tener una mejor distribución de los granos tanto de aluminio como de sus aleaciones.
- Con el ataque químico se pueden llegar a observar los diversos microconstituyentes que llegan a existir una vez se haya hecho la mezcla de la matriz Al 365.0 con las partículas SiC, en la probeta 4A existen micro constituyentes que tienen una nomenclatura de acorde a la composición química del material utilizado como matriz, utilizando otro tipo de ácido para el ataque químico y con un tiempo de duración mayor se llegarán a observar otros tipos de micro constituyentes que reaccionaron con las partículas SiC dando una nueva composición al FGM.

- Las fuentes de información para obtener un FGM mediante el método experimentado son limitadas y sobre todo para reconocer la tonalidad y morfología de las partículas de SiC, al ser una nueva tecnología de fabricación de este tipo de materiales, sin mencionar que en la mayoría de datos hallados en la literatura técnica se han realizado investigaciones con máquinas centrifugadoras in situ, además no se tiene información específica de las dimensiones de las máquinas, tipo de molde utilizado y parámetros importantes para la fabricación de FGM.
- Como se indica en el ANEXO 1 la dimensión de las partículas cerámicas no es constante varía de una forma no uniforme lo que provoca que cuando sean mezcladas con la matriz para formar el FGM, las partículas de SiC con mayor tamaño se quedarán acumuladas en las zonas internas del tubo mientras que las de menor tamaño irán a la zona exterior esto claramente se evidencia en las micrográficas de la probeta 4A.
- Los parámetros seleccionados en base al análisis de ensayos pre eliminados realizados por otros trabajos de titulación, permitieron lograr que el tubo obtenido logre tener un gradiente de distribución de partículas característico de un FGM, pero al no controlar de mejor manera diversas variables ocasionó que las partículas de SiC se lleguen a acumularse en las zonas donde existen una gran cantidad de micro porosidades especialmente en la probeta 7.1 se puede evidenciar esto, en esta probeta al tener una cierta cantidad de aire dentro del metal fundido que se queda acumulado en zonas específicas dentro del tubo provoca que las partículas SiC lleguen a acumularse y no puedan avanzar de forma homogénea a las zonas exteriores del tubo.
- Se logró la caracterización del FGM realizando un único ensayo en donde se puede decir que las variables escogidas en cada uno de los subprocesos para obtener el FGM fueron los correctos, mediante la visualización de micrográficas con diversos aumentos y con el ensayo de micro dureza, se pudo evidenciar existe un aumento de partículas de SiC en forma de gradiente desde la zona interior a la zona superior y eso se evidencia también con los valores de micro dureza que van en aumento en ese mismo orden.

- La probeta 4A seleccionada es un ejemplo de cómo deberían ser los demás componentes que se encuentren formando el tubo FGM, al presentar menor cantidad de porosidades, buena distribución de partículas SiC hace que la fabricación de este nuevo material tenga un buen desempeño y sobre todo tenga menor coste de inversión para el sector industrial.
- La aglomeración de partículas de SiC en el tubo FGM además de darse por los diversos tamaños existentes de las partículas así como de la velocidad de rotación del molde, también se debe a la forma de colocación de estas en la masa fundida al ser colocadas las partículas en gran cantidad a la colada de fundición llega a ocasionar dos fenómenos, el primero que debido a la temperatura de la colada de fundición estas llegan a reaccionar formando carburo de aluminio quedando así una capa de este nuevo material sobre la colada de fundición provocando que se pierdan ciertas cantidades de partículas SiC que no podrán distribuirse en el material, como segundo punto se llegaría a provocar que la acumulación de partículas de SiC dentro del material se encuentre en los límites de grano provocando de igual manera que las partículas SiC no se distribuyan de forma homogénea en el tubo FGM.

### 3.3 Recomendaciones

- Para reducir la cantidad de microporosidades que se llegan a generar en las probetas sobre todo en las zonas de diámetro interno se recomienda controlar de mejor forma las variables del proceso de colado, incluso utilizar gases nobles como el Argón para reducir la formación de esas imperfecciones.
- Para mejorar la distribución de partículas de SiC se debe tener en cuenta dos parámetros principales, la velocidad de rotación de la máquina centrifugadora así como el tamaño de las partículas a utilizar, en este último parámetro es recomendable escoger partículas cuyo tamaño sea menor a la de la malla #400 debido a que estas poseen diámetros que varían de forma irregular provocando que las de mayor tamaño se queden acumuladas en las zonas internas del material, pero al tener partículas con un tamaño no tan variable entre ellas se distribuirán de una mejor forma en el material dando así una mejor visualización del gradiente de distribución que es característico de un FGM.
- Se recomienda utilizar materiales como acero inoxidable o inclusive fundición gris para la fabricación de las aspas del agitador del equipo stir casting ya que evitará

que estas lleguen a desgastarse por las elevadas temperaturas que se experimentan cuando se mezclan las partículas SiC con la colada de fundición, así como utilizar un crisol con la menor rugosidad posible para que las partículas de SiC no se lleguen a adherir, lo que reduciría el porcentaje de este en el material a fabricar.

- Para poder evidenciar como influyen conjuntamente los microconstituyentes con las partículas de SiC se recomienda que para trabajos futuros se realice un ensayo de dureza en las diversas zonas de análisis correspondientes, ya que al realizar este tipo de ensayo se mostrara la influencia de las partículas de SiC con los microconstituyentes a lo largo de la zona del gradiente de distribución y además permitirá que el material obtenido sea utilizado en áreas industriales específicas.
- Para mejorar la cantidad de partículas SiC en el FGM se recomienda colocar estas de forma constante al momento de agitarlas con la matriz fundida, si no se llega a agregar estas partículas de esta manera se creará una capa de carburo de aluminio en la colada de fundición lo que implicaría que la cantidad de partículas en el FGM no sean las esperadas.
- Utilizar velocidades altas, así como tamaños de partículas cerámicas de gran tamaño, al tener estos dos parámetros seleccionados de mejor forma la cantidad de partículas cerámicas utilizadas se evidenciará de mejor forma a lo largo de las superficies de análisis teniendo así una mejor percepción del gradiente de distribución de partículas características de los FGM.
- Seleccionar una matriz en donde se tenga una menor cantidad de silicio ya que al utilizar partículas SiC estas podrán llegarse a confundir con el silicio que contiene la matriz utilizada, la selección de este tipo de matriz se la puede realizar utilizando el Metal Handbook V9 donde se encuentran todos los tipos de aluminio y donde se indica la cantidad de silicio y diversos componentes que posee cada una de las aleaciones además para poder evidenciar esto sería también recomendable realizar un análisis de espectrometría por chispa donde indicara la cantidad de silicio que posee dicho elemento que se utilizará como matriz.
- Las muestras analizadas del FGM obtenido con adición de partículas cerámicas de SiC, presentaron la formación de una cantidad elevada de microporosidades en el diámetro interno de las probetas, esto puede ser provocado por la presencia de microconstituyentes que poseen diferentes temperaturas de solidificación y por la velocidad de enfriamiento del tubo, para estudios futuros el poder controlar

parámetros como temperatura de colado, temperatura de precalentamiento del molde y canal de alimentación así como cantidad de oxígeno en la fundición permitirá reducir las microporosidades ya que estos defectos llegarían a actuar como concentradores de esfuerzos que para estudios futuros llegaría a afectar de forma negativa a las propiedades mecánicas de la aleación del FGM.

#### 4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] L. G. Huilca Caisalitín, "Revisión de las características de gradientes microestructurales en compuestos metálicos de aluminio funcionalmente graduados y su mecanismo de formación," *ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL*, 2021.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] ASM INTERNATIONAL, "ASM HANDBOOK VOLUME 9," 2004.
- [5] G. Alfredo, B. López, J. Carlos, and G. Padilla, "ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA CARACTERIZACIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO DE MATRIZ ALEACIÓN DE ALUMINIO-SILICIO REFORZADA CON PARTÍCULAS DE CARBURO DE SILICIO," 2018.
- [6] A. Bedoya and J. Paúl, "ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA REDISEÑO Y CONTRUCCIÓN DE LA MÁQUINA DE COLADO CENTRÍFUGO HORIZONTAL TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO," 2020.
- [7] G. E. Totten and D. Scott. MacKenzie, *Handbook of aluminum*. M. Dekker, 2003.
- [8] Małgorzata. Warmuzek, *Aluminum-silicon casting alloys : an atlas of microfractographs*. ASM International, 2004.
- [9] L. Gustavo, H. Caisalitín, É. Fernando, and A. Domínguez, "ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA 'OBTENCIÓN DE TUBOS SIN COSTURA POR EL PROCESO DE COLADO POR CENTRIFUGADO HORIZONTAL' PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO," 2012.
- [10] P. Ramírez and W. Antonio, "ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ESTUDIO DEL EFECTO DEL HIERRO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UNA ALEACIÓN DE ALUMINIO-SILICIO (A356) TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO," 2018.

- [11] Oscar Sotomayor and Fausto Oviedo, "ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Introducción a los Procesos de Manufactura-Tecnología de Fundición Periodo 2019-B," 2019.
- [12] R. Ambigai and S. Prabhu, "Characterization and Mechanical Analysis of Functionally Graded Al-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Composites through Centrifugal Process," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 30, no. 10, pp. 7328–7342, Oct. 2021, doi: 10.1007/s11665-021-05963-2.
- [13] J. Hashim and B. Sc, "THE PRDUCTION OF METAL MATRIX COMPOSITES USING THE STIR CASTING TECHNIQUE," Aug. 1999.
- [14] Shinji Nagata, "Mixing-Principles-And-Applications," *Kodasha LTD*, 1975.
- [15] JAVIER MARÍN DE LA PUENTE, "TRABAJO DE FIN DE GRADO," MADRID, Feb. 2019.
- [16] B. Suárez-Peña, J. Asensio-Lozano, and G. F. Vander-Voort, "Metalografíaacolor enaleaciones Al-Si comerciales. Optimización de las técnicas de caracterización microestructural mediante microscopía óptica de reflexión," *Revista de Metalurgia (Madrid)*, vol. 46, no. 5, pp. 469–476, Sep. 2010, doi: 10.3989/revmetalm.1013.
- [17] I. Milosan *et al.*, "Characterization of aluminum alloy-silicon carbide functionally graded materials developed by centrifugal casting process," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 4, pp. 1–14, Feb. 2021, doi: 10.3390/app11041625.
- [18] P. Ramírez and W. Antonio, "ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ESTUDIO DEL EFECTO DEL HIERRO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UNA ALEACIÓN DE ALUMINIO-SILICIO (A356) TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIÉRO MECÁNICO," 2018.

## **ANEXOS**

# ANEXO I. DIMENSIONES DE LAS PARTÍCULAS SIC PROPORCIONADAS POR EL DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA

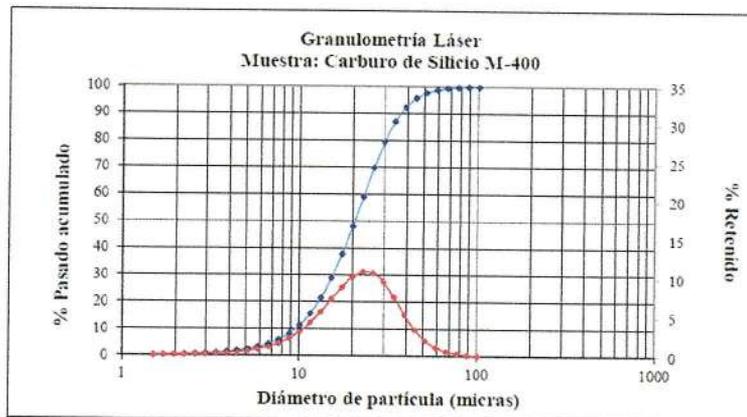


### Resultados Análisis de Granulometría Láser

Solicitante : Ing. Luis Huilca.  
 No. Referencia : RM - 10367  
 Fecha : 08 - 08 - 2022  
 Muestras recibidas : Dos muestras.

El análisis de granulometría láser se lo realizó empleando el equipo LASER SCATTERING PARTICLE SIZE DISTRIBUTION ANALYZER LA-950V2, marca HORIBA. El equipo utiliza la teoría de Mie para evaluar las mediciones, (dispersión de ondas electromagnéticas en partículas esféricas). A continuación, se detallan los resultados obtenidos del análisis.

Carburo de Silicio M-400	
Parámetros	Díámetro de Partícula
	( $\mu\text{m}$ )
d10	9.5
d50	20.4
d60	23.1
d80	30.3
d90	37.0



El análisis se realizó utilizando el índice de refracción para el carburo de silicio de 2.6553.  
 Nota: Esta técnica de análisis es adecuada para partículas esféricas inferiores a 38 micras, que no se pueden determinar su tamaño por tamizado.



EDDY FERNANDO  
PAZMINO IBARRA

Ing. Eddy Pazmiño PhD.  
Jefe de Departamento (S)



EVELYN PAMELA  
CRIOLLO TIRADO

MSc Evelyn Criollo  
Jefa de Laboratorio



ANEXO 2: Tabla de resultados de granulometría láser muestra M - 400.

Muestra: Carburo de Silicio M-400							
Número	Diametro de	Retenido	Pasado	Numero	Diametro de	Retenido	Pasado
(#)	Particula	(%)	Acumulado	(#)	Particula	(%)	Acumulado
	( $\mu\text{m}$ )		(%)		( $\mu\text{m}$ )		(%)
1	1.5	0.1	0.1	17	10.0	5.7	21.5
2	1.7	0.1	0.2	18	15.2	7.4	28.9
3	2.0	0.1	0.3	19	17.4	8.9	37.8
4	2.3	0.1	0.4	20	19.9	10.2	48.0
5	2.6	0.2	0.6	21	22.8	10.9	59.0
6	3.0	0.2	0.8	22	26.1	10.7	69.7
7	3.4	0.3	1.1	23	29.9	9.6	79.3
8	3.9	0.3	1.4	24	34.3	7.6	86.9
9	4.5	0.4	1.9	25	39.2	5.4	92.3
10	5.1	0.6	2.4	26	44.9	3.4	95.8
11	5.9	0.8	3.3	27	51.5	2.0	97.8
12	6.7	1.1	4.4	28	59.0	1.1	98.9
13	7.7	1.6	6.0	29	67.5	0.6	99.5
14	8.8	2.3	8.3	30	77.3	0.3	99.8
15	10.1	3.1	11.5	31	88.6	0.2	100.0
16	11.6	4.3	15.8	32	101.5	0.0	100.0

Cálculo diámetro promedio de partículas:

$$\bar{D} = \frac{\sum n_i * d_i}{N}$$

$$N = \sum n_i = 0,1 + 0,5 + 0,6 + 0,8 + 0,9 = 2,9$$

$$\bar{D} = \frac{(0,1) * (9,5) + (0,5) * (20,4) + (0,6) * (23,1) + (0,8) * (30,3) + (0,9) * (37)}{2,9}$$

$$\bar{D} = 28,46 \mu\text{m}$$

## ANEXO II. FICHA TÉCNICA DEL FUNDENTE DESGASIFICANTE APARTAGAS H7-50

INDUSTRIAL JUVAL LTDA.



### APARTAGAS

Es un rápido y efectivo desgasificante para aluminio y sus aleaciones, evitando así la porosidad en la pieza fundida.

#### CAUSA Y EFECTO DE LA POROSIDAD GASEOSA

La porosidad que se presenta en las piezas coladas y conocida con el nombre de "picado de aguja", es siempre debido al hidrógeno disuelto en el metal fundido, cuyo gas es expulsado en pequeñas burbujas a través de la pieza mientras esta se solidifica. La presencia de hidrógeno se debe en primer lugar a condiciones defectuosas del horno, herramientas húmedas, chatarra oxidada y prolongado mantenimiento del metal a excesiva temperatura. Piezas de aluminio porosas, significan piezas rechazables, con baja resistencia mecánica, ausencia de compacidad y mal acabado superficial.

#### DESGASIFICACION:

Con el objeto de eliminar la porosidad, se ha desarrollado el APARTAGAS que proporciona una rápida y cómoda desgasificación, del baño, a la vez que es más efectiva que cualquier otro tipo de desgasificación, por las siguientes razones:

- Se sumerge en el baño.
- No requiere destreza en su manejo.
- No necesita equipo complicado ni costoso.
- No es tóxico.
- Es extraordinariamente eficaz, dada la descomposición de sus moléculas, ya que se producen elementos en estado activo que reaccionan químicamente con el hidrógeno.
- Refine el grano.
- No ofrece peligro ni para el operario ni para el metal.

#### TIPOS DE APARTAGAS

**APARTAGAS H7:** Energico desgasificante con reacción rápida, para hornos de crisol y de reverbero pequeños.

##### Empaque:

Caja x 760 unid. (Pastilla x 50 grs.).  
Caja x 36 kilos (Pastilla x 1 kilo)

**APARTAGS H4:** Desgasificante de acción controlada especialmente diseñado para hornos de reverbero grandes. Su reacción toma aproximadamente 10 minutos.

##### Empaque:

Caja de cartón x 36 kilos.

**PRESENTACIÓN DEL PRODUCTO:**

APARTAGAS se presenta en dos formas -Pastillas y Polvo-, ambos tienen la misma finalidad y efecto. Las pastillas vienen en un tamaño de 50, 200, 500 y 1000 gramos.

**CANTIDADES RECOMENDADAS:**

Para coladas a base de lingotes se recomienda el 0.15 % de APARTAGAS con respecto al metal. Si las coladas son hechas a base de desperdicios o chatarras, se deberá utilizar un 0.25%.

**MODO DE EMPLEO**

**APLICACION EN HORNO DE CRISOL:**

Cuando la temperatura alcance 700°C, apagar el quemador o sacar el crisol del horno. El calor residual eleva la temperatura de la carga hasta unos 750°C. Debe evitarse la excesiva temperatura, de lo contrario aumenta la absorción de gas y las pérdidas por oxidación.

Cuando la temperatura comienza a descender, se sumergen por medio de una campana perforada, las tabletas o el polvo necesario para desgasificar el metal fundido. Mantenga la campana en el fondo del crisol hasta que cese el desprendimiento de burbujas. La eficacia del APARTAGAS radica en su suave y prolongado desprendimiento de pequeñas burbujas sin verter el metal fuera del crisol.

Se hace énfasis en que la desgasificación debe hacerse con una temperatura descendente. Si la temperatura aún está subiendo, la desgasificación no va a ser igual de efectiva.

**APLICACION EN HORNO REVERBERO:**

De acuerdo al tamaño del horno, calcular la cantidad a adicionar y hacer dos aplicaciones, cada una con la mitad del total de APARTAGAS a emplear. Las pastillas se deben sumergir al fondo mediante una bandeja invertida perforada, para que permita la salida de gases en la medida en que se van generando. Una vez sumergida la bandeja, ésta debe ser movida por todas las zonas del horno.

**APLICACION EN HORNO DE INDUCCION:**

La aplicación es igual a la del horno de crisol.

NOTA: Pinte las herramientas con la pintura de protección INJEMAQ AL 397

## ANEXO III. FICHA TÉCNICA DEL FUNDENTE ESCORIFICANTE ALU FUNDEX EXTRA

INDUSTRIAL JUVAL LTDA.



---

### ALU FUNDEX

Son una serie de fundentes que protegen, cubren y limpian las aleaciones de aluminio durante la fusión. Estos productos forman una capa protectora sobre el metal fundido, la cual reduce la oxidación y minimiza la absorción de hidrógeno.

#### VENTAJAS QUE SE OBTIENEN CON EL USO DE ALU FUNDEX:

1. Reducción de la oxidación y las pérdidas de aluminio con un consiguiente incremento de la fluidez.
2. Absorción de materias no metálicas o inclusiones es otro de los problemas que resuelve el ALU FUNDEX, con la consiguiente mejora en las propiedades mecánicas.
3. Formación de una capa protectora que conlleva a una menor facilidad de absorción de gases.
4. Reducción del contenido metálico en las escorias, por lo tanto mayor rendimiento de fusión.
5. Seguridad. Actuación siempre idéntica. Suministro del fundente libre de humedad.

#### TIPOS DE ALU FUNDEX

- **ALU FUNDEX 110:**  
Tipo económico de excelente calidad con propiedades exotérmicas para la fundición en crisol.
- **ALU FUNDEX LP:**  
Fundente limpiador de paredes para ser utilizado en horno de reverbero en la fundición de Aluminio
- **ALU FUNDEX 197:**  
Fundente refinador tipo económico para aluminio, de uso general, recomendado especialmente para horno rotatorio y también para horno reverbero. Este producto tiene un punto de fusión de aproximadamente 640 °C.
- **ALU FUNDEX EXTRA:**

Fundente escorificante de alta eficiencia, aplicado en la fundición de aluminio en crisol u horno de reverbero. Aplicación del 0.3-0.5% en peso con respecto a la carga dependiendo del tipo de material a fundir. Tiene excelente recuperación de metal en hornos tipo reverbero.

- **ALU FUNDEX E:**  
Igual al extra
- **ALU FUNDEX EP:**  
Igual al extra en pastillas
- **ALU FUNDEX ECO:**  
Igual al Extra, utilizado en la fundición de virutas, chatarras y lingote.
- **ALU FUNDEX 647:**  
Fundente modificador y desoxidante sin potasio para aluminio al silicio
- **ALU FUNDEX 657:**  
Fundente de cobertura para Aluminio al magnesio.

#### **METODO DE APLICACIÓN DEL ALU FUNDEX 110, ECO y EXTRA**

1. Calentar el crisol vacío. Luego el lingote y/o chatarra y añadir 250 gramos de ALU-FUNDEX 110, ECO y EXTRA, por cada 50 kg. de carga.  
  
El ALU FUNDEX 110, ECO y EXTRA, protege la carga durante la fusión, reduce la oxidación y la absorción de gases.  
  
Debido a la disminución de óxidos, el aluminio tiene mayor colabilidad.
2. Cuando la temperatura alcance los 700°C, apagar el fuego o sacar el crisol del horno. El calor residual elevará la temperatura de la carga hasta unos 750°C.
3. Espolvorear sobre la superficie 250 gr. de ALU FUNDEX 110, ECO y EXTRA, por cada 50 kg. de carga y dejar reposar un minuto.  
  
El ALU FUNDEX 110, ECO y EXTRA, produce una reacción exotérmica con la escoria, con lo cual se logra que el metal retenido por la escoria se desprenda y regrese al baño.
4. Poner en íntimo contacto el fundente con la escoria mediante agitación apropiada
5. Con una cuchara perforada retirar la escoria ya libre de metal y proceder a la colada.

Las temperaturas adecuadas de colada son:

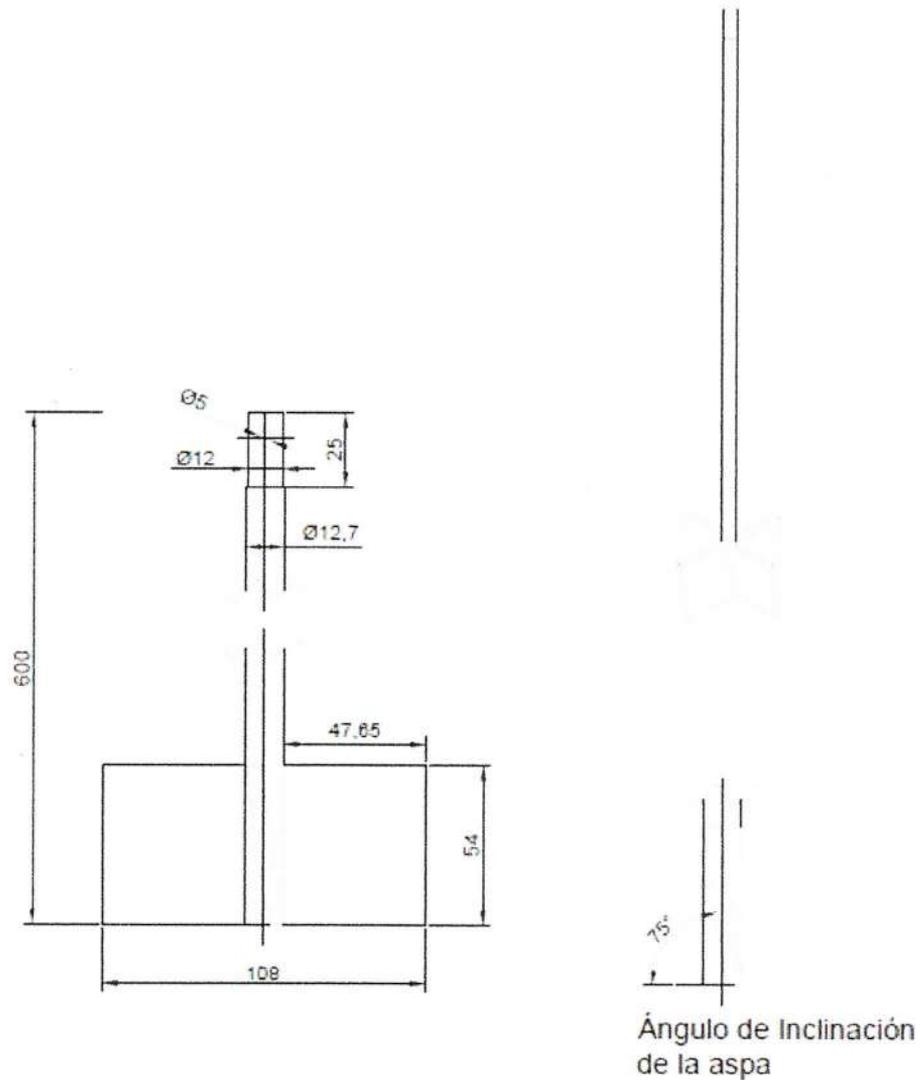
750°C	para piezas livianas de espesor inferior a 10 mm.
710°C	para piezas de espesor entre 10 y 35 mm.
690°C	para piezas de espesor superior a 35 mm.

Debe evitarse la excesiva temperatura, de lo contrario aumentar la absorción de gas y las pérdidas por oxidación.

**METODO DE APLICACIÓN DEL ALU FUNDEX ECO Y EXTRA  
EN HORNO REVERBERO:**

1. Una vez terminada la colada y alcanzada la temperatura de vaciado, adicionar sobre la superficie de metal ALU FUNDEX ECO y EXTRA en bolsas pequeñas procurando distribuir el material homogéneamente sobre el baño. Si se dispone de una pistola aplicadora de fundente sobre el baño.
2. Agitar enérgicamente el baño para llevar las inclusiones a la superficie y poner el ALU-FUNDEX ECO y EXTRA en íntimo contacto con la escoria y metal.
3. Retirar la escoria con la rastra y observar la consistencia de la escoria. Si presenta todavía mucho aluminio metálico atrapado, deberá ajustarse la cantidad hasta encontrar el punto ideal de aplicación. La adición de ALU FUNDEX ECO y EXTRA se puede situar entre 0,3 a 0,5% en peso.  
En hornos de gran tamaño la adición es menor situándose en 0.1 - 0.3%.

## ANEXO IV. PLANO DE FABRICACIÓN AGITADOR



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

TRAT. TERMICO	N/A	<b>EPN</b>	FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA	
RECUBRIMIENTO	N/A			
CANTIDAD DE PIEZAS	1			
MATERIAL	ACERO AISI 304	TOL. GRAL	ESCALA	DIB
		$\pm 0.5$	1:1	Beltrán Henry
				DIS Beltrán Henry
				REV Ing. Fausto Oviedo, M.Sc
Agitador		MEC 001		FECHA
				10/07/2022

## ANEXO V. INFORME TÉCNICO DE ENSAYOS DE MICRO DUREZA

	ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL	Revisión:	000	
	Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla (LMDF)	Fecha:	22/09/2019	
		Página:	Pág. 1 de 3	
	INFORME DE RESULTADOS	RT-LMDF-0701		
	Nº DT-OTI0066-22			

### INFORME DE RESULTADOS Nº DT-OTI0066-22

#### Información General

Cliente / Empresa/ Entidad:	ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL		
Persona de contacto:	HENRY ANDRÉS BELTRAN ORDOÑEZ		
Teléfono: 0986301250	E-mail:	henry.beltran01@epn.edu.ec	
Muestras suministradas por:	16	Fecha de recepción de muestra:	08-06-22
Fecha de emisión de Informe:	26-07-22	Fecha/ plan y método de muestreo:	N/A
Fecha de inicio de ensayo:	08-06-22	Fecha de fin de ensayo:	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 1, 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:

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



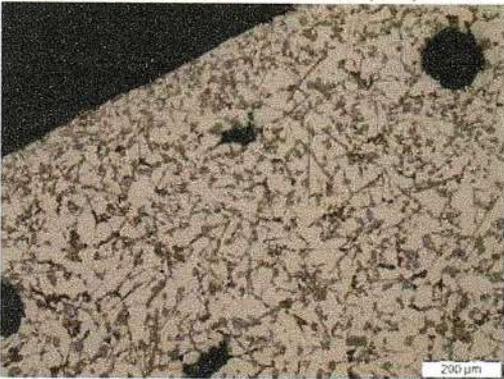




**Fotografía N° 1.** Aumento de 100X, probeta extraída del elemento 22-021. Sin ataque químico.



**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:

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

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

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