



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**TEMA: CARACTERIZACIÓN COMPARATIVA DE UNA ALEACIÓN
DE ALUMINIO ENTRE LOS PROCESOS DE COLADO ESTÁTICO Y
COLADO DINÁMICO CON VARIACIÓN DE FRECUENCIA Y
AMPLITUD EN LA MESA VIBRATORIA.**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
INGENIERO MECÁNICO.**

MENDOZA BARAJA ANA GABRIELA
ana.mendoza@epn.edu.ec

OÑA COBA MISHHELL ALEJANDRA
mishell.ona@epn.edu.ec

DIRECTOR:
ING.FAUSTO HERNÁN OVIEDO FIERRO, M.Sc.
Fausto.oviedo@epn.edu.ec

Quito, abril 2020

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **ANA GABRIELA MENDOZA BARAJA Y MISHHELL ALEJANDRA OÑA COBA**, bajo mi supervisión.

Ing. Fausto Oviedo M.Sc.

DIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Nosotras **Ana Gabriela Mendoza Baraja y Mishell Alejandra Oña Coba**, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

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

Ana Gabriela Mendoza Baraja

Mishell Alejandra Oña Coba

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi madre Luz quien me acompañó en cada paso con mucho cariño, a mi familia y a Francisco por su apoyo y amor incondicional.

Gabby

DEDICATORIA

Dedico este estudio a los forjadores de mi diario vivir, aquel que se ha esforzado para darme principios y el mejor ejemplo MI PADRE y mi consejera que con amor y paciencia ha sabido guiar mi camino MI MADRE.

Alejandra

AGRADECIMIENTO

Agradezco a la vida por una tercera oportunidad de sonreír, compartir con mis seres queridos y cumplir mis sueños.

Gabby

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por haberme permitido realizar uno de los tantos anhelos que desde niña me lo propuse, ser Ingeniera.

Agradezco infinitamente a mis padres Javier y Martha que fueron y serán mi principal motivación y orgullo, me han sabido formar y orientar cada día. Permanecieron en cada una de mis madrugadas de estudio brindándome su palabra de aliento para que no desistiera, también Estefanía, Camila y Samantha que son fruto de este logro porque supieron abrigarme con su apoyo incondicional de hermanas.

Al Ingeniero Fausto Oviedo que con sus conocimientos, paciencia, responsabilidad y habilidades llevó a cabo este trabajo de titulación.

A mi compañera Gabriela por su colaboración y dedicación para este gran paso.

Alejandra

ÍNDICE

RESUMEN.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivo general	2
Objetivos específicos.....	2
1. MARCO TEÓRICO.	3
1.1 Generalidades del aluminio.	3
1.2 Propiedades del aluminio.....	3
1.3 Aleaciones de aluminio.	4
1.3.1 Elementos aleantes principales.	4
1.3.2 Aleación aluminio – silicio.	5
1.3.3 Aleación AK5M.....	6
1.3.4 Morfología de las aleaciones de Aluminio - Silicio.	7
1.3.5 Microestructura típica de una fundición de Al-Si hipoeutéctica.....	8
1.3.6 Modificación de la aleación Al-Si.	9
1.5. Fundición de la aleación de aluminio mediante colado estático.	11
1.5.1 Molde, modelo y moldeado para fundición de la aleación de aluminio.....	12
1.5.2 Fusión, colada y solidificación de las piezas de aleación de aluminio.....	14
1.6 Fundición por colado dinámico	15
1.7. Defectos comunes en la fundición de aleación de aluminio.	15
1.8 Mesa vibratoria.	17
1.8.1 Vibraciones de la mesa.	18
1.8.2 Amplitudes generadas por la mesa vibratoria.	20
2. METODOLOGÍA.	21
2.1 Antecedentes.	21
2.2 Selección de la Aleación.....	23
2.3 Preparación de modelos.....	24
2.3.1 Ensayo de dureza.	24
2.3.2 Análisis de microestructura.	25
2.3.3 Ensayo de tracción.....	25
2.3.4 Sobredimensionamiento por contracción.	26
2.3.5 Sobredimensionamiento por maquinado.	27
2.3.6 Determinación final de las dimensiones de los modelos.....	28
2.4 Dimensionamiento de la caja de moldeo.....	29
2.5 Preparación de moldes.	30

2.5.1	Diseño del Sistema de Alimentación.	32
2.5.2	Tiempo de llenado del molde.	32
2.5.3	Canal vertical.	33
2.5.4	Alimentadores.	35
2.5.5	Respiradores.	35
2.5.6	Embudo de colada.	36
2.6	Producción de la materia prima.	36
2.7	Producción de las molduras.	40
2.8	Producción de las probetas.	42
2.8.1	Preparación superficial de las probetas.	42
2.8.2	Mecanizado CNC para probetas de tracción.	43
2.8.3	Desbaste de probetas de microestructura y dureza.	43
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	44
3.1	Inspección visual de las probetas.	44
3.2	Resultados del análisis de composición química.	46
3.3	Resultados del analizador de vibraciones.	48
3.4	Resultado del ensayo de tracción.	52
3.5	Resultado del ensayo de dureza.	55
3.6	Resultado microestructural.	56
3.7	Matriz comparativa.	60
3.8	Interpretación y análisis de resultados.	61
3.8.1	Análisis de la composición química del material.	61
3.8.2	Análisis de la inspección visual del material.	61
3.8.3	Análisis del ensayo microestructural.	63
3.8.4	Análisis del ensayo de tracción.	64
3.8.5	Análisis del ensayo de dureza.	66
3.8.6	Interrelación entre los ensayos realizados.	67
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	68
4.1	Conclusiones.	68
4.2	Recomendaciones.	70
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	72
	ANEXOS.	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Celda unitaria del aluminio.	3
Figura 1.2 Aleaciones de aluminio para forja y para fundición.....	5
Figura 1.3 Diagrama de Fase Aluminio – Silicio.....	6
Figura 1.4. Microestructuras fundidas de composiciones hipoeutécticas, hipereutécticas y eutécticas.	7
Figura 1.5. Aleación de aluminio-silicio hipoeutéctica (Al-5.7Si).....	8
Figura 1.6. Intermetálico β -Al ₅ FeSi e intermetálico α -Al ₁₅ (FeMn) ₃ Si ₂	9
Figura 1.7. Relación entre tasa de solidificación y tamaño de la celda dendrítica.	9
Figura 1.8. Proceso para realizar una fundición.	10
Figura 1.9. Molde para colado estático.....	12
Figura 1.10. Arena sílice.	12
Figura 1.11. Modelos elaborados en madera de pino desarmable.....	13
Figura 1.12. Caja hembra y macho de madera.	14
Figura 1.13. Rechupes en fundición.	15
Figura 1.14. Poros en fundición.	16
Figura 1.15. Inclusiones de escoria en fundición.....	16
Figura 1.16. Grietas fundición.	16
Figura 1.17. Mesa Vibratoria.	17
Figura 1.18 Bosquejo del sistema de la mesa vibratoria.....	18
Figura 1.19. Esquema sistema mesa-motor-disco excéntrico.	19
Figura 2.1. Molde experimental de agitador magnético.	21
Figura 2.2. Molde experimental de agitador eléctrico.....	22
Figura 2.3. Probeta para ensayo de dureza.	25
Figura 2.4. Probeta para análisis de microestructura.....	25
Figura 2.5. Distribución de probetas para ensayos.....	26
Figura 2.6. Dimensión final del modelo.....	28
Figura 2.7. Dimensiones caja de moldeo.....	30
Figura 2.8. Mezcladora de arena sílice.....	31
Figura 2.9. Mezcla de arena sílice con resina.	32
Figura 2.10. Diseño del sistema de alimentación.....	32
Figura 2.11. Esquema de llenado del molde por la línea de partición.	34
Figura 2.12. Dimensiones del embudo de colada.	36
Figura 2.13. Tochos de aluminio.....	39
Figura 2.14. Pirómetro digital.	40
Figura 2.15. Sistema mesa vibratoria – molde.	41
Figura 2.16. Probetas para mecanizar.....	41
Figura 2.17. Probetas sin mecanizar.	42
Figura 2.18. Preparación de las probetas en torno manual.	43
Figura 2.19. Probetas de tracción mecanizadas en el torno CNC.....	43
Figura 2.20. a. Pulidor Forcipol. b. Probetas para ensayo de microestructura y dureza.	44
Figura 3.1 Canal de alimentación de la probeta de código M12A2, con presencia de rechupe.....	44
Figura 3.2 Canal de alimentación de la probeta de código M48A2, con presencia de segregación del material.	45
Figura 3.3 Acabado superficial de las probetas sin mecanizar.	45
Figura 3.4. Probetas de tracción con presencia de discontinuidades.....	45
Figura 3.5 Probetas de microestructura con presencia de discontinuidades.	46

Figura 3.6. Microrechupe de microestructura a 50x.	46
Figura 3.7. Curva amplitud vs tiempo durante la fundición, probeta M24A1.	48
Figura 3.8. Resistencia a la tracción de cada probeta de prueba.	53
Figura 3.9. Porcentaje de elongación de cada probeta de prueba.	54
Figura 3.10 Diagrama caja bigotes de la resistencia a la tracción.	54
Figura 3.11 Diagrama caja bigotes del porcentaje de elongación del material.	54
Figura 3.12. Dureza de cada probeta de prueba.	56
Figura 3.13 Diagrama caja bigotes de la dureza del material.	56
Figura 3.14 Comparación entre el acabado superficial y la estructura interna de las probetas M36A1, M36A2 y M36A3.	62
Figura 3.15 Perfil destacado de un microrechupe.	63
Figura 3.16 Probeta estática, silicio primario sin transformación microestructural.	63
Figura 3.17 a. Saturación del intermetálico α en la probeta M12A1 (aumento 50x). b. Saturación del intermetálico α en la probeta M48A2 (aumento 50x). c. Saturación del intermetálico α en la probeta M12A1 (aumento 10x). d. Saturación del intermetálico α en la probeta M48A2 (aumento 50x).	64
Figura 3.18 Línea de tendencia respecto a la resistencia a la tracción.	65
Figura 3.19 Línea de tendencia respecto al porcentaje de elongación del material. ...	65
Figura 3.20 a. Probeta estática, presencia escasa de discontinuidades. b. Probeta M36A1 superficie porosa 35%. c. Probeta M48A1 superficie porosa 75%.	66
Figura 3.21 Línea de tendencia respecto a la dureza del material.	66
Figura 3.22. Comparación entre resistencia a la tracción y dureza.	67
Figura 3.23 a. Microestructura de la probeta estática con silicio primario (aumento 10x). b., c. Microestructura probeta M12A1 y M24A2 con escasa formación de intermetálico α (aumento 10x). (Fuente: Propia).	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Aleaciones de aluminio para fundición.	4
Tabla 1.2. Comparación del molde perdido y permanente.	11
Tabla 1.3. Características de la mesa vibratoria y variador de velocidades.	17
Tabla 2.1. Amplitudes y frecuencias.	23
Tabla 2.2. Composición química en porcentajes de la aleación AK5M	24
Tabla 2.3. Descripción de las probetas según la norma ASTM E8.	26
Tabla 2.4. Tolerancias de contracción de metales.	27
Tabla 2.5. Tolerancias y rugosidades para acabados superficiales.	28
Tabla 2.6. Distancia pieza-pieza y pieza-molde	29
Tabla 2.7. Porcentaje de las resinas.	31
Tabla 2.8 Contante A de Milkhailov.	33
Tabla 2.9. Porcentaje de quemado de elementos en hornos de crisol.	37
Tabla 2.10. Composición química de las muestras.	37
Tabla 2.11. Quemado de los elementos.	37
Tabla 2.12. Material requerido.	38
Tabla 2.13. Carga para 100 kg.	38
Tabla 2.14. Carga para 40 kg.	39
Tabla 2.15. Carga para 8 Kg.	40
Tabla 2.16. Parámetros controlados durante el proceso de fundición.	41
Tabla 3.1. Composición química de las probetas de prueba.	47
Tabla 3.2. Variación de composición química de las probetas de prueba.	47
Tabla 3.3. Frecuencia y amplitud del sistema mesa vibratoria – molde de fundición. .	49
Tabla 3.4. Resistencia a la tracción y porcentaje de elongación para cada prueba realizada.	52
Tabla 3.5. Dureza del material en escala Rockwell H.	55
Tabla 3.6. Microestructura de las probetas de prueba.	57
Tabla 3.7. Composición química de elementos principales de la aleación AK5M de las probetas de prueba.	61

RESUMEN

El presente trabajo tiene como finalidad caracterizar la aleación AK5M a través de la técnica de colado dinámico comparándolo con el tradicional colado estático. Para el análisis de colado dinámico se elaboró un molde con arena sílice y resina, el molde es colocado en una mesa vibratoria en la cual se varía parámetros de frecuencia y amplitud. El control del movimiento vibratorio se realizó con ayuda de un analizador de vibraciones (software MAINTraq). Los parámetros de colado para la frecuencia fueron de: 4 Hz, 8Hz, 12Hz y 16Hz mientras que la variación de amplitud de la mesa vibratoria se cambió con el uso de discos excéntricos.

Los resultados de las propiedades mecánicas y microestructurales de las probetas fundidas fueron obtenidos a partir de ensayos de composición química, tracción, dureza, microestructura y análisis visual. Se pudo evidenciar que las probetas obtenidas por colado dinámico presentan una combinación de fases intermetálicas α (en forma de escritura china) y β (en forma de aguja); todas las probetas presentan microrechupes que se incrementan conforme aumenta la vibración. La resistencia a la tracción no disminuye con la presencia de discontinuidades en el material; los valores de esta propiedad se incrementan en las probetas fundidas en estado dinámico, sin embargo, los resultados muestran que la resistencia a tracción no es proporcional a la dureza debido a que el indentador utilizado para cuantificar esta propiedad tuvo contacto con los microrechupes.

Palabras clave: aleación AK5M, frecuencia, amplitud, colado dinámico, colado estático, microrechupes.

ABSTRACT

The purpose of this paper is to characterization of AK5M alloy by casting, through a compared of traditional casting with dynamic one. For the dynamic analysis a silicon, resin and sand mold were made, this method works using a vibratory table where you can vary the frequency and amplitude, these values are obtain from an vibration analyzer software called MAINTraq. The parameters obtained for frequency are: 4 Hz, 8 Hz, 12 Hz and 16 Hz. And the amplitude varies using eccentric discs.

The results of mechanical and microstructural properties of the specimens are obtained from chemical composition, tensile, hardness and microstructure tests. In this way, the specimens resulting of dynamic casting show a combination of intermetallic phases: alpha; Chinese writing shape, and Beta; needle shape.

All specimens indicate micro shrinkages, generally this it is not influencing on tensile proprieties, dynamics coupons have a superior tensile resistance comparing with the static method coupon, on the other hand the hardness is not proportional to the tensile, because the measurer enters the discontinuities.

Keywords: AK5M alloy, amplitude, dynamic casting, static casting, frequency, discontinuities.

“CARACTERIZACIÓN COMPARATIVA DE UNA ALEACIÓN DE ALUMINIO ENTRE LOS PROCESOS DE COLADO ESTÁTICO Y COLADO DINÁMICO CON VARIACIÓN DE FRECUENCIA Y AMPLITUD EN LA MESA VIBRATORIA.”

INTRODUCCIÓN

A lo largo de los años Ecuador no ha desarrollado avances en la fabricación de elementos metálicos mediante el proceso de fundición por colado estático, por lo cual en ocasiones se genera un bajo rendimiento en volumen, deficiencia en la estructura superficial del elemento, composición química inadecuada, propiedades mecánicas bajas, entre otros, por lo tanto, debido a su escaso progreso la gran mayoría son importados. [1] [2]

Actualmente para alcanzar la calidad adecuada de una pieza mecánica en el proceso de fundición es necesario acoplar métodos de tratamientos térmicos para enriquecer tanto la microestructura como las propiedades mecánicas del elemento. [3]

Una alternativa es la fundición por colado dinámico que permite obtener transformaciones en la microestructura y propiedades mecánicas de la pieza fundida; existen estudios cualitativos que han aplicado esta técnica en aleaciones eutécticas de aluminio- silicio con resultados notables en la morfología de la aleación los cuales fueron influenciados por la variación de amplitud, otras investigaciones que variaron frecuencias alcanzaron un refinamiento de grano. [4] [5]

Estudios previos que han utilizado la técnica de colado dinámico han modificado solo frecuencia o solo amplitud, en contraste el presente trabajo analizará el material obtenido variando ambos parámetros en la aleación hipoeutéctica AK5M.

La aleación AK5M ha sido seleccionada por sus componentes de fácil disponibilidad en el mercado nacional y múltiples usos en la industria ecuatoriana.

Las probetas serán producidas variando la frecuencia y amplitud; se obtendrán 4 grupos de probetas con diferentes frecuencias y a la vez en cada grupo se trabajará con 3 amplitudes diferentes. Finalmente, teniendo las probetas fundidas con los parámetros mencionados anteriormente se realizará cinco tipos de ensayos (composición química,

tracción, dureza microestructura y análisis visual) para posteriormente realizar un análisis de las características del material y elaborar una matriz comparativa de las variaciones en las propiedades mecánicas y microestructura, así también dar a conocer en mejor perspectiva los dos procesos de colado.

Este método aporta en la industria metalúrgica ya que permite el análisis de un método escasamente utilizado en procesos de fundición de metales ferrosos y no ferrosos. [6] Además se aspira incentivar el estudio y uso del colado dinámico frente al colado estático en este y otro tipo de materiales.

Objetivo general

- Caracterizar de forma comparativa una aleación de aluminio entre los procesos de colado estático y colado dinámico con variación de frecuencia y amplitud en la mesa vibratoria.

Objetivos específicos

- Seleccionar una aleación de aluminio disponible en el mercado nacional.
- Caracterizar una aleación de aluminio obtenida por colado estático.
- Caracterizar una aleación de aluminio obtenida por colado dinámico.
- Determinar las propiedades mecánicas y microestructurales de la aleación de aluminio para cada proceso de colado mediante ensayos destructivos y no destructivos.
- Realizar una matriz comparativa que permita analizar las características de cada proceso y determinar sus diferencias.

1. MARCO TEÓRICO.

1.1 Generalidades del aluminio.

El aluminio es un elemento abundante en la corteza terrestre, ocupa el tercer lugar después del oxígeno y la sílice. Para su producción es extraído de la bauxita mineral que se encuentra en silicatos, feldspatos y micas. Características como la baja densidad y su alta resistencia a la corrosión convierten al aluminio en un material versátil y de múltiples aplicaciones.

Entre las aplicaciones más utilizadas está la fabricación de láminas y cables eléctricos gracias a su maleabilidad. Para los procesos de fundición el aluminio es aleado con otros metales que permiten mejorar las propiedades y ajustarlo a las características requeridas.

1.2 Propiedades del aluminio.

El aluminio es un metal ligero y de baja densidad 2700 kg/m^3 , el punto de fusión es relativamente bajo $650 \text{ }^\circ\text{C}$, tiene una buena conductividad térmica y eléctrica además es resistente a la corrosión ya que forma naturalmente una capa de alúmina que lo protege de la intemperie, agua o productos químicos. Se trata de un material blando, fácil de mecanizar y muy dúctil; permite los procesos de soldadura, forja, fundición y extrusión.

El aluminio posee una red cristalina FCC o cúbica centrada en las caras como se puede apreciar en la figura 1.1 y un parámetro de red $a = 4.0413 \text{ \AA}$. El aluminio puro tiene excelentes propiedades anticorrosivas y gran conductividad, teóricamente la pureza bordea el 99.9%, ya en la práctica existe la presencia de impurezas, las fundamentales son el silicio y el hierro que aumentan la dureza, pero disminuyen la resistencia a la corrosión.

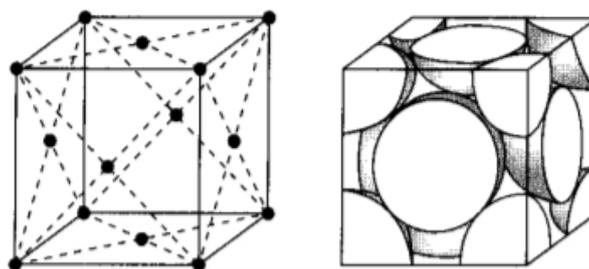


Figura 1.1 Celda unitaria del aluminio.
(Fuente: [7])

Para alterar las propiedades del aluminio de acuerdo a los requerimientos industriales o de servicio es necesario añadir elementos aleantes. El nivel de modificación de las características dependerá del elemento y porcentaje que se incorpore a la mezcla. Dependiendo de los elementos aleantes se formarán en la aleación diferentes reacciones químicas o fisicoquímicas formadas en diferentes fases que puede favorecer o desfavorecer las características iniciales del metal.

1.3 Aleaciones de aluminio.

Las aleaciones de aluminio son clasificadas de acuerdo al aleante principal en su composición, a continuación, en la tabla 1.1, se muestra la designación de cada grupo de aleación para fundiciones.

Tabla 1.1 Aleaciones de aluminio para fundición.

Aleación	Composición principal
1xxx	Aluminio comercialmente puro
2xxx	Aluminio – cobre
3xxx	Aluminio – silicio – cobre o Aluminio – magnesio – silicio
4xxx	Aluminio – silicio
5xxx	Aluminio – magnesio
7xxx	Aluminio – magnesio – zinc
8xxx	Aluminio – estaño

(Fuente: [8])

1.3.1 Elementos aleantes principales.

Los elementos que constituyen cada aleación intervienen en la modificación de las propiedades de la fundición final, a continuación, se presentan los principales elementos aleantes y los efectos que desencadenan.

- Silicio: la presencia de este elemento contribuye a mejorar la resistencia al desgaste y la resistencia mecánica gracias a la formación de partículas duras. Sin embargo, también disminuye la plasticidad y reduce la maquinabilidad por lo que se utiliza cobre para regular estas propiedades.
- Cobre: ayuda a mejorar la resistencia mecánica y a la vez la ductilidad del material mejorando el mecanizado de las piezas.

- Magnesio: si en una aleación el magnesio está combinado con el cobre mejora la resistencia mecánica del material. Sin embargo, su presencia evita realizar tratamientos térmicos en ciertas aleaciones.
- Hierro: porcentajes bajos de este elemento incrementan la resistencia mecánica, caso contrario se forman fases intermetálicas frágiles que afectan la ductilidad.
- Manganeso: permite la formación de fases intermetálicas conjuntamente con el hierro y el cromo.
- Plomo, cadmio, estaño y bismuto: estos elementos son utilizados en concentraciones superiores al 0.1% para mejorar la maquinabilidad de las piezas formando fases suaves y de esta forma permitir una ruptura suave de viruta.

1.3.2 Aleación aluminio – silicio.

Estas aleaciones constituyen el 90% de las piezas fundidas en aluminio por una excelente fundabilidad y buena resistencia a las fisuras. En la industria son seleccionadas con preferencia por sus propiedades mecánicas altas y peso relativamente bajo. Las características se definen de acuerdo a la composición química y microestructural de las aleaciones y a su vez la microestructura se precisa por el proceso de fundición, solidificación y de ser el caso posterior tratamiento térmico. Se pueden distinguir dos grandes grupos de aleaciones de aluminio – silicio de fase binaria, en la figura 1.2 se presenta el rango de aleaciones forjadas y aleaciones para fundición.

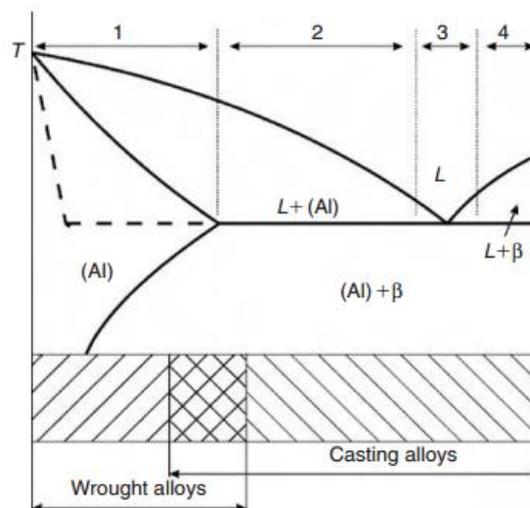


Figura 1.2 Aleaciones de aluminio para forja y para fundición.
(Fuente: [7])

Para las aleaciones de fundición el contenido de silicio se encuentra en un rango de 4% al 22% como muestra la figura 1.3 y puede ser dividido a su vez en tres grupos:

- Aleaciones hipoeutéticas: 4% al 9%.
- Aleaciones eutéticas: 10% al 13%.
- Aleaciones hipereutéticas: 14% al 22%.

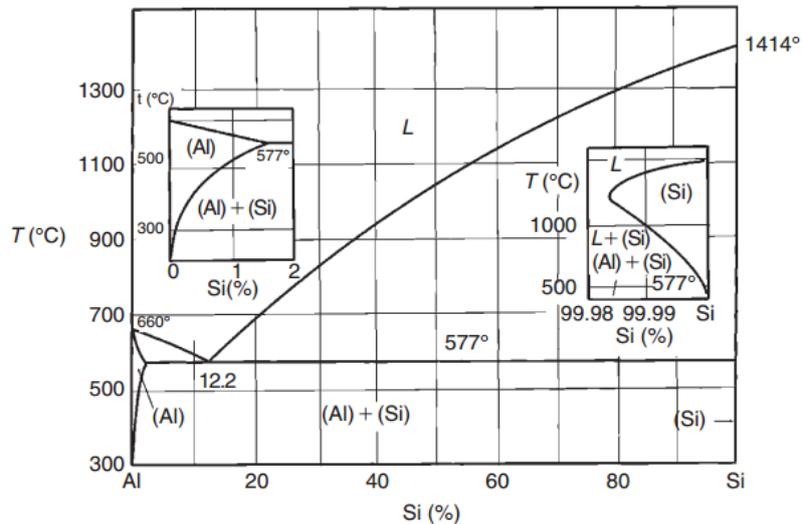


Figura 1.3 Diagrama de Fase Aluminio – Silicio.
(Fuente: [7])

El límite inferior del 4% es establecido por las características del Silicio ya que proporciona una buena capacidad de fundición al material, para el caso del límite superior 22% se establece debido a un nivel adecuado de plasticidad ya que a mayor porcentaje el silicio se torna demasiado frágil.

La técnica de solidificación seleccionada y utilizada está relacionada de forma directa con el refinamiento de la microestructura. En la fundición con arena se produce una menor velocidad de solidificación que en la fundición con molde permanente metálico. En consecuencia, a una velocidad más alta de solidificación las células dendríticas del aluminio y los cristales formados en las fases resultan más refinados y pequeños que en la fase eutética de esta forma se incrementa la resistencia mecánica y la ductilidad a temperatura ambiente.

1.3.3 Aleación AK5M.

La aleación AK5M pertenece al grupo 3xxx, los componentes principales son aluminio, silicio y cobre. Las proporciones de esta aleación se definen con los siguientes valores;

Al – 5.5Si – 1.25Cu o su análogo, aleación 355. Los principales componentes de la microestructura de esta aleación son dendritas de aluminio y aluminio más silicio eutéctico que con la presencia de hierro puede formar la fase β . En el proceso de solidificación se forman tres fases: Al_2Cu , $Al_5Cu_2Mg_8Si_6$ y Mg_2Si que se presentan en formas esqueléticas o venas en los límites de borde de grano.

Gran parte de las aleaciones poseen más de dos componentes por lo que para analizar la composición química lo adecuado sería usar diagramas ternarios y hasta cuaternarios, pero tomando en cuenta que los materiales se encuentran en bajas proporciones y son solubles en la matriz de aluminio es suficiente realizar el análisis en un sistema binario Al-Si.

1.3.4 Morfología de las aleaciones de Aluminio - Silicio.

Las aleaciones Al-Si presentan diferentes morfologías dependiendo de la composición; variará conforme la aleación sea de contenido cercano, superior o inferior a una composición eutéctica. La figura 1.4 muestra diferentes morfologías de acuerdo al contenido de Silicio.

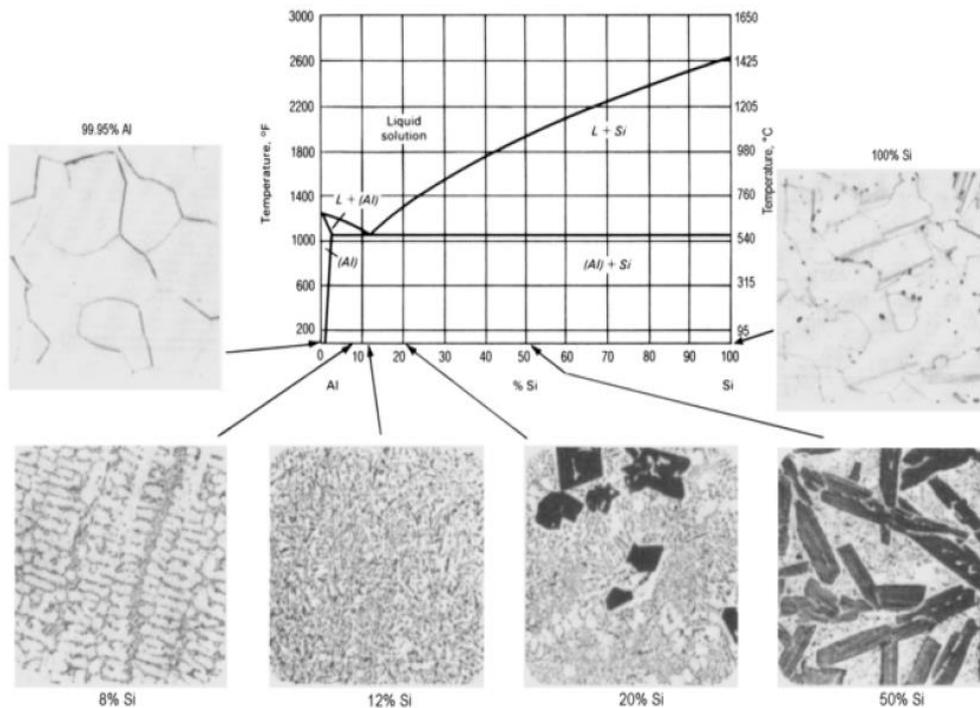


Figura 1.4. Microestructuras fundidas de composiciones hipoeutécticas, hipereutécticas y eutécticas.
(Fuente: [9])

1.3.5 Microestructura típica de una fundición de Al-Si hipoeutéctica.

En las fundiciones existen fases intermetálicas que pueden desarrollarse a altas temperaturas antes de la formación de las dendritas de aluminio, concurrente con la solidificación de la aleación, o a temperaturas bajas como 480 °C desarrollando fases eutécticas de gran complejidad. En la microestructura se puede estudiar el desarrollo de las fases intermetálicas en la matriz de aluminio de acuerdo al porcentaje de concentración de silicio. La figura 1.5 muestra la microestructura típica de una aleación hipoeutéctica Al-Si.



Figura 1.5. Aleación de aluminio-silicio hipoeutéctica (Al-5.7Si).
(Fuente: [10])

De acuerdo a la microestructura que presentan las fundiciones se pueden identificar con facilidad dos fases intermetálicas; cristales facetados o en forma de aguja que constituyen la fase β son de baja coherencia con la matriz de aluminio y dendritas que se exhiben en congruencia a la matriz son de forma columnar o en forma de escritura china constituyen la fase α .

Bajas tasas de enfriamiento favorecen la formación de la estructura tipo aguja β , caso contrario tasas altas de enfriamiento favorecen la formación de estructura columnar α , resultados experimentales han mostrado que la transición entre las fases β y α se dan lugar de acuerdo a la presencia de hierro en la composición química, el hierro aumenta la presencia de la fase β mientras que elementos como el manganeso y el cromo estabilizan las partículas en una estructura más refinada α . La figura 1.6 presenta las fases intermetálicas α y β .

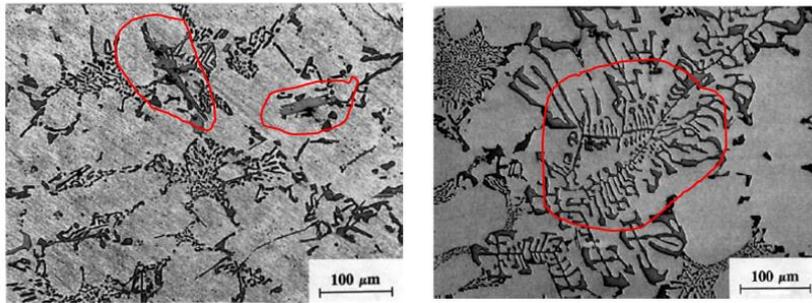


Figura 1.6. Intermetálico β -Al₅FeSi e intermetálico α -Al₁₅(FeMn)₃Si₂
(Fuente: [11])

1.3.6 Modificación de la aleación Al-Si.

Al modificar las propiedades estructurales se afecta la forma eutéctica de las aleaciones, como ya se ha mencionado en el apartado anterior la influencia de la velocidad de solidificación y la incorporación de modificadores químicos varían la morfología de la aleación. Los agentes modificadores más utilizados para las aleaciones de Al-Si son el sodio, antimonio y estroncio; el sodio es considerado el modificador más potente, sin embargo, sus efectos son transitorios; cambios físicos en la fundición o tratamientos térmicos también producen cambios significativos en la estructura del material.

Uno de los aspectos analizados en la modificación es el espaciado del brazo dendrítico, la solidificación de una aleación se realiza mediante la formación de dendritas a partir de una solución líquida, las dimensiones que apartan los brazos dendríticos unos de otros o de la formación principal se pueden controlar con la velocidad de solidificación variando las velocidades de enfriamiento y el refinamiento de esta estructura puede ser controlada analizando la distancia que separa los brazos de la dendrita, distancia de las dendritas adyacentes con las celdas centrales y la dimensión de la celda de dendrita. La figura 1.7 presenta la relación entre el tamaño de la celda dendrítica y la tasa de solidificación del material.

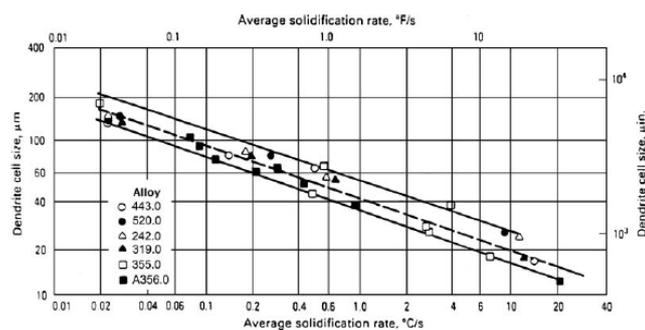


Figura 1.7. Relación entre tasa de solidificación y tamaño de la celda dendrítica.
(Fuente: [12])

1.4. Procesos de fundición de metales.

La fundición se da a partir del análisis del molde el cual se conforma de una cavidad cuya geometría dará forma a la pieza fundida, además se sobredimensiona dicha cavidad para que se permita obtener una contracción del metal mientras se solidifica y enfría. [13]

Scorza, expone que para la obtención de una pieza fundida es necesario seguir las siguientes operaciones:

- Elaboración del modelo en metal o madera.
- Elaboración del molde en arena, cuya cavidad tomará la geometría de la pieza hacer fundida.
- Fundición del metal en el horno.
- Colado de metal en el molde.
- Solidificación y enfriamiento
- Desmolde.
- Limpieza y mejoramiento del acabado superficial de la pieza.

La figura 1.8 resume los pasos del proceso de fundición.

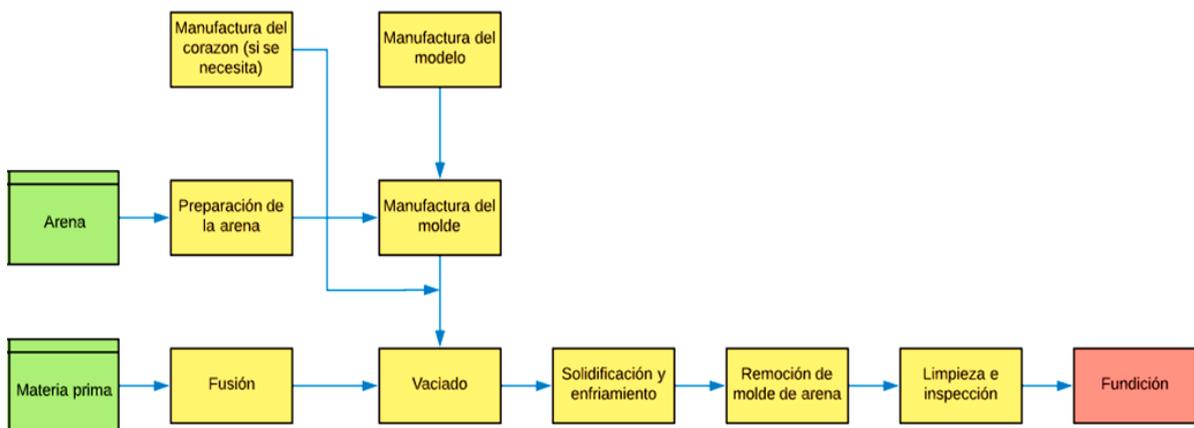


Figura 1.8. Proceso para realizar una fundición.
(Fuente: [13])

Para el proceso de fundición es necesario tener en cuenta la selección adecuada del tipo de molde, se pueden distinguir dos categorías: molde perdido y molde permanente, a continuación se describe cada tipo de molde y en la tabla 1.2 una comparación entre los dos tipos de moldes.

- Fundición con molde perdido: el molde tiene solo una vida útil y se elabora con arena, cemento, yeso entre otros materiales similares. Es práctico en piezas que no tengan muchos detalles (entrantes o salientes).
- Fundición con molde permanente: es reutilizable debido al metal con el que se elabora el molde, es práctico para piezas con detalles

Tabla 1.2. Comparación del molde perdido y permanente.

Tipo de molde	Molde perdido	Molde permanente
Características	Los granos de arena están envueltos de un aglomerante formando cohesión, es decir conserva la forma del molde al retirar la pieza.	Elevada precisión en cuanto a tolerancias, rugosidad y detalles.
Tipos de fundición	Fundición en arena verde. Fundición en arena seca. Fundición en yeso. Fundición en arena con resinas.	Fundición estática. Fundición centrífuga. Fundición a presión.
Ventajas	Sin limitación de tamaño. Bajo costo. Colado de cualquier metal.	Buen acabado superficial. Mayor rapidez de enfriamiento. Alta producción.
Desventajas	Acabado superficial áspero. Elevadas tolerancias.	Elevados costos de fabricación. Limitación de la temperatura de fusión del metal menor a la del molde. Limitación del tamaño de piezas.

(Fuente: Propia)

1.5. Fundición de la aleación de aluminio mediante colado estático.

Después de cambiar el metal de estado sólido a líquido mediante un horno se procede a transportarlo según la cantidad de metal fundido para próximamente ser vaciado en moldes que permanecen estáticos, para la transferencia del colado se utilizan cucharas que están cubiertas de material refractario y acero, permitiendo el transporte más rápido del metal fundido. Las estructuras de las cucharas mencionadas tienen la forma de: tambor, tetera, pico, con tabiques, etc.

Los límites para la temperatura de colada de las aleaciones de aluminio son superiores a los 800°C para una mejor fluidez del metal. Entre las propiedades más destacadas para

este tipo de fundición son: buena fluidez con el propósito de cubrir todas las cavidades del molde y segregación que permitirá la homogeneidad en cuanto a las propiedades mecánicas y la contracción durante el proceso de solidificación y enfriamiento. A continuación, la figura 1.9 presenta un molde para colado estático en arena.



Figura 1.9. Molde para colado estático.
(Fuente: Propia)

1.5.1 Molde, modelo y moldeado para fundición de la aleación de aluminio.

Existen diferentes tipos de moldes como:

- Moldes de arena.
- Moldes de metal.
- Moldes de cáscara, entre otros.

Para este tipo de aleaciones una alternativa es el uso de arena de grano fino y arena arcillosa. La caja macho debe tener una elevada compresibilidad con aglutinantes que serán quemados a temperaturas pequeñas.

Para elaborar moldes grandes o medianos se hace uso de mezclas con vidrio líquido, resina o aglutinantes siendo después soplado con CO₂ y para la elaboración de molduras grandes se recomienda usar moldes secos con alta resistencia. La mezcla para un moldeado se compone por: materiales principales (arena y aglutinantes) y materiales auxiliares (aditivos). En la figura 1.10 se puede apreciar arena sílice.



Figura 1.10. Arena sílice.
Fuente: (Propia)

La mezcla más común se realiza con arena sílice la cual se encuentra dispersa en la naturaleza, es económicamente accesible y tiene poder refractario. La arena sílice o arenas cuarzosas se componen del 90 al 70% de SiO_2 , máximo el 8% de impurezas y máximo el 2% de componentes arcillosos.

Los aglutinantes son importantes en la mezcla para que exista resistencia tanto en estado seco como en estado húmedo y también se de la unión de granos. Los materiales auxiliares o aditivos se los aplica para mejorar la penetrabilidad, desmolde, poder refractario entre otras propiedades.

Es muy frecuente la utilización de madera para el diseño de modelos que serán fundidos con aleación de aluminio ya que tiene deformaciones muy despreciables y diminutas contracciones de secado. Además, es beneficioso para la producción porque se puede usar modelos grandes, medianos y de geometría compleja. Dicho material posee buenas propiedades como: bajo costo, baja densidad, manejo accesible para su elaboración, conservación de pintura y acabados.

Dependiendo el uso que tendrá el modelo se elabora en una sola pieza o desarmable, para la caracterización del aluminio con colado dinámico se dio uso de un molde de madera de pino debido a la facilidad de labrado y deformación despreciable, el modelo se lo puede apreciar en la figura 1.11.



Figura 1.11. Modelos elaborados en madera de pino desarmable.
(Fuente: Propia)

El moldeado en cajas tiene una aceptación positiva gracias a lo económico que resulta elaborarlo, se pueden realizar piezas en serie y además desmontables. La estructura se conforma de dos cajas (hembra y macho), al estar divididas dichas cajas se obtendrá mejores resultados de molduras con mayor exactitud ya que las cajas se encuentran centradas por pasadores; se consiguen moldear moldes enterizos o moldes de dos piezas de acuerdo a las necesidades del operario. A continuación, la figura 1.12 muestra una caja desmontable de madera utilizada en la fundición de aluminio.



Figura 1.12. Caja hembra y macho de madera.
(Fuente: Propia)

Los sistemas de bebederos para la aleación mencionada requieren de exigencias como:

- Llenado uniforme de la aleación fundida en el molde.
- No impactos, no remolinos.
- Retener las inclusiones que se encuentren en la aleación líquida.

El uso de bebederos permite garantizar la uniformidad de llenado de la colada en el molde.

1.5.2 Fusión, colada y solidificación de las piezas de aleación de aluminio.

La oxidación se presenta fácilmente en las aleaciones de aluminio mientras se produce la fusión, deshacen gases e impurezas perjudiciales, uno de estos gases es el hidrógeno que produce porosidades, por lo tanto, es necesario escoger adecuadamente los materiales de carga y la agrupación de fusión. La contaminación más probable es el óxido de aluminio y este no desaparece en la colada.

La fundición de la aleación se da mediante hornos de electricidad, gas, de crisol, de reverbero, de resistencia e inducción; se hace uso de estos dependiendo la capacidad y el tipo de metal a trabajar. Los hornos de crisoles pueden fundir alrededor de 10 a 300 kg, el crisol no se funde porque es elaborado con hierro colado y con pintura refractaria cubierto en su interior y es calcinado a 500 °C en el lapso de 3 a 5 horas. Los hornos eléctricos tienen una capacidad mayor de 1 a 3 toneladas permitiendo realizar 5 fundiciones de gran carga y para altas producciones.

Las aleaciones en estado líquido se solidificarán al alcanzar el cambio de fase a una temperatura aproximada de 660°C para el caso del aluminio. Para producirse la solidificación ocurre primero una nucleación para lo cual el estado líquido tendrá en su interior una partícula sólida, el mismo que crecerá con el fin de que los átomos líquidos se junten al sólido y así desaparecerlos.

1.6 Fundición por colado dinámico

A diferencia del colado estático, este colado se realiza por una variación del lugar físico del molde donde es colado el metal. El procedimiento de este método consiste en colocar sobre una superficie vibratoria los moldes y durante la vibración verter el metal fundido hasta obtener la pieza solidificada.

La finalidad del colado dinámico es minimizar defectos en piezas obtenidas mediante la fundición integrando la técnica de vibración durante el proceso de solidificación. Este procedimiento repercutirá en la microestructura y las propiedades mecánicas de la pieza fundida, positiva o negativamente, el análisis que permite dar soporte a estos resultados pueden ser obtenidos mediante los ensayos de dureza, microestructura, tracción, etc. En cuanto al uso de esta aplicación ya existen estudios que fueron desarrollados por Chernov en el año 1878 y replicados con éxito en el año 2004 por Khraisheh. [14] [5]

1.7. Defectos comunes en la fundición de aleación de aluminio.

Obtenida la pieza fundida, se visualiza defectos comunes debido a factores que no han sido controlados durante el proceso, por lo cual deben ser comprendidos y estudiados para que estos sean corregidos.

Entre los defectos más comunes se tiene:

- Rechupes: es una cavidad que se forma en la pieza durante la solidificación y enfriamiento; estos rechupes pueden disminuir si se agrega un mayor porcentaje de cobre o silicio y con menos contenido de hierro. La figura 1.13 señala un ejemplo.

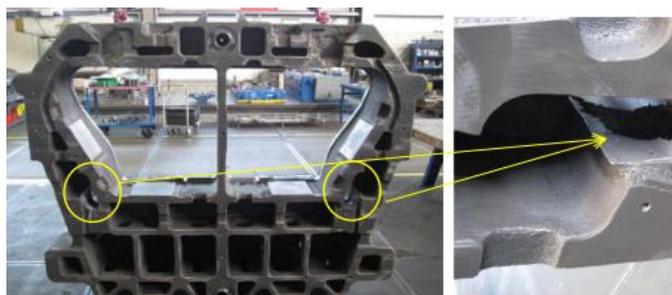


Figura 1.13. Rechupes en fundición.
(Fuente: [15]).

- Poros: este defecto es debido a la humedad excesiva en la arena, una forma de evitarlo es reduciendo el porcentaje de agua. La figura 1.14 señala un ejemplo.



Figura 1.14. Poros en fundición.
(Fuente: [16]).

- Inclusiones de escoria: generalmente se presentan inclusiones de escoria y de ciertos óxidos metálicos porque al colar no han sido retenidos y el alimentador de la colada no permaneció lleno mientras se daba el vaciado. La figura 1.15 señala un ejemplo.



Figura 1.15. Inclusiones de escoria en fundición.
(Fuente: [17]).

- Inclusiones de arena: se dan por la incorrecta selección de arena o aglutinamiento e incluso muy poca compactación.
- Grietas: provocado por la mala solidificación debido a los canales de distribución. La figura 1.16 señala un ejemplo.



Figura 1.16. Grietas fundición.
(Fuente: [17]).

1.8 Mesa vibratoria.

El diseño de la mesa vibratoria se basa en transmitir el efecto vibratorio al molde que va a contener el metal fundido, Veloz & Álvarez mencionan que mediante el acoplamiento directo del motor a la mesa vibratoria la transmisión de vibraciones es directa desde el motor al molde de arena, en la figura 1.17 se puede observar su diseño.



Figura 1.17. Mesa Vibratoria.
(Fuente: Propia)

La mesa vibratoria se creó en el año 2014 la cual está disponible en el laboratorio de fundición de la EPN, pero en el 2017 realizaron cambios con el fin de mejorar el funcionamiento, adaptaron una base para soldar cada soporte, permitir una mejor adaptación de los resortes y obtener como resultado una vibración uniforme, por último, al equipo se implementó un variador de velocidades. En la tabla 1.3 se describe las características de la mesa.

Tabla 1.3. Características de la mesa vibratoria y variador de velocidades.

Pieza	Características
Motor trifásico SIEMENS	RPM máximas: 1020 rpm Voltaje: 220V
Variador de velocidades	Variador WEG CFW 300
Resortes	Carga de fatiga 47 kg/cm (constante del resorte)
Eje excéntrico	Permite el desplazamiento longitudinal de la mesa.
Potenciómetro	Variador manual de velocidades

(Fuente: [18]).

1.8.1 Vibraciones de la mesa.

El diseño de la mesa tiene un movimiento vibratorio forzado con amortiguamiento, debido a la presencia de oscilaciones que son el resultado de una fuerza externa y a la elasticidad de la mesa correspondiente a la presencia de cuatro resortes. El bosquejo del sistema se puede apreciar en la 1.18

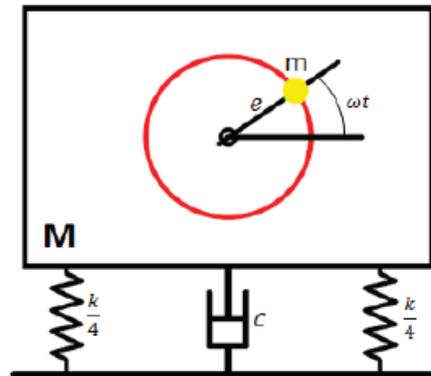


Figura 1.18 Bosquejo del sistema de la mesa vibratoria.
(Fuente: [1]).

La mesa vibratoria posee dos movimientos con dirección: vertical y horizontal, las ecuaciones que presiden el movimiento según Proaño & Sánchez del sistema son:

Ecuación del movimiento vertical:

$$M\ddot{y} + c\dot{y} + k_1y = F_0 \sin \omega t$$

Ecuación del movimiento horizontal:

$$M\ddot{x} + c\dot{x} + k_2x = F_0 \cos \omega t$$

Donde:

k_1 : Constante de elasticidad vertical.

k_2 : Constante de elasticidad horizontal.

Las ecuaciones que gobiernan el sistema de la mesa vibratoria son ecuaciones diferenciales no homogéneas, por lo tanto, la solución general se divide en: solución transitoria y solución estacionaria, considerando que se expondrá al sistema a un tiempo prolongado de oscilaciones se toma en cuenta únicamente la respuesta en estado estacionario cuando el sistema se estabiliza.

Para el caso en estudio el colado del material se realiza cuando el sistema se ha estabilizado, es decir, el proceso para colar la aleación inicia cuando el sistema mesa vibratoria – molde ha pasado del estado transitorio al estado estable.

Respuestas del sistema en estado estacionario de acuerdo a Proaño & Sánchez son:

$$y = \frac{F_o \sin(\omega_{n1}t + \phi)}{\sqrt{(k_1 - M\omega^2)^2 + (c\omega)^2}}$$

$$x = \frac{F_o \cos(\omega_{n2}t + \phi)}{\sqrt{(k_2 - M\omega^2)^2 + (c\omega)^2}}$$

Donde:

ω_{n1} : Frecuencia natural vertical.

ω_{n2} : Frecuencia natural horizontal

La frecuencia natural de la mesa vibratoria es la frecuencia con la que oscila después de suspender la señal de excitación o movimiento del motor, ω_{n1} y ω_{n2} son equivalentes a:

$$\omega_{n1} = \sqrt{\frac{k_1}{M}} \quad y \quad \omega_{n2} = \sqrt{\frac{k_2}{M}}$$

Los resortes generan la elasticidad inducida, mientras discos excéntricos acoplados al eje del motor producen oscilaciones y al existir fricción (dada por presencia de aire ambiental y el amortiguamiento histérico) se obtiene como resultado amortiguamiento. En la figura 1.19 que se presenta a continuación se puede observar el sistema que tiene la mesa y el motor-disco excéntrico.

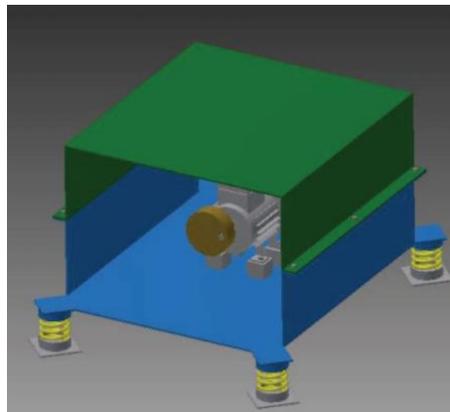


Figura 1.19. Esquema sistema mesa-motor-disco excéntrico.
(Fuente: [1]).

Para la vibración de la mesa es muy importante tener en cuenta que las oscilaciones no vayan afectar el molde o permitan el derrame de líquido, por lo cual el diseño realizado por

Proaño & Sánchez determinó el uso de un motor que trabaje a 1200 rpm como límite superior y además el rango de las amplitudes no sobrepasen en 1.5 mm.

1.8.2 Amplitudes generadas por la mesa vibratoria.

El estudio de Proaño & Sánchez de diseño de la mesa vibratoria recomienda variar la amplitud con el uso de tres discos excéntricos que otorgan los siguientes resultados de prueba, siendo A_n la amplitud, estos valores se obtienen al utilizar la geometría de la tabla 1.4:

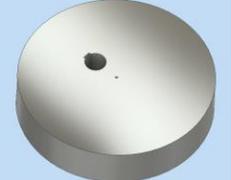
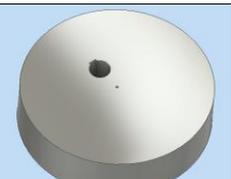
$$A_1 = \pm 0.02 \text{ cm}$$

$$A_2 = \pm 0.07 \text{ cm}$$

$$A_3 = \pm 0.1 \text{ cm}$$

Es posible variar la amplitud de la mesa vibratoria cambiando únicamente la velocidad de trabajo del motor, no obstante, al requerir una velocidad constante el uso de los discos excéntricos permite variar la amplitud y mantener la frecuencia constante.

Tabla 1.4. Amplitudes y geometría de discos excéntricos.

Disco excéntrico	Amplitud [cm]	Diámetro [cm]	Espesor [cm]
1 	± 0.02	9	1.2
2 	± 0.07	11	2.6
3 	± 0.1	11	3.7

(Fuente: Propia).

2. METODOLOGÍA.

2.1 Antecedentes.

Autores como Abu y Zhong han realizado estudios acerca de técnicas de moldeo aplicando una vibración mecánica mientras ocurre la solidificación del material ocasionando efectos en las propiedades mecánicas y en la microestructura de la pieza a ser fundida. [4][5]

Uno de los estudios que ha empleado esta técnica utilizó la aleación eutéctica Al-Si conocida en la industria automotriz, la vibración que se usa es mecánica y económica, favorece en la técnica para refinamiento de grano. Varios investigadores han indagado el efecto que produce la vibración en las microestructuras en metales como: latón, aluminio, zinc, etc.

Para llevar a cabo el estudio de la aleación eutéctica Al-Si se realizó la experimentación con un porcentaje de silicio de 12.5% a 100 Hz, amplitudes variables de 0.0018-0.02 cm. El molde usado para este estudio se muestra en la figura 2.1 el cual está sobre un agitador electromagnético monitoreado por un controlador.

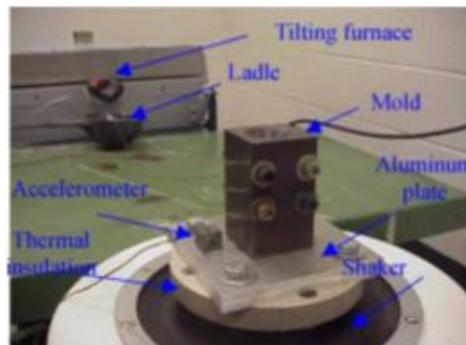


Figura 2.1. Molde experimental de agitador magnético.
(Fuente: [4]).

Como resultado de la práctica se obtuvo que la morfología del silicio es altamente influenciada por el nivel de vibración, al incrementar la vibración se obtiene una reducción del espacio laminar obteniendo silicio más fibroso, pero sin evidencia de mejorar las propiedades de la aleación. [4]

Otra investigación muestra un estudio desarrollado en un molde perdido en el cual se analizó la influencia que tiene la vibración mecánica durante la solidificación en la aleación

356 para lo cual se tomó en cuenta que la vibración cambiaría la microestructura en estado sólido dando lugar a la reducción del tamaño de grano y una microestructura mucho más homogénea. Para analizar esta técnica se utilizó un equipo con pequeños motores acoplados al molde en una sola pieza con el fin de conseguir una vibración más dócil, en la figura 2.2 se puede observar el equipo.

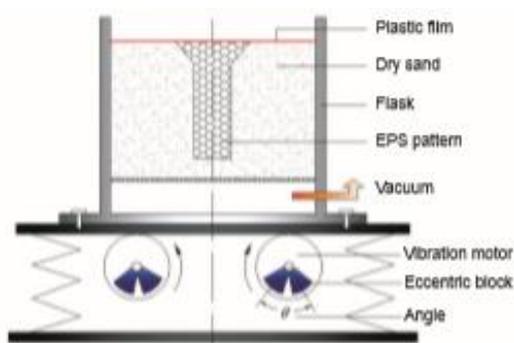


Figura 2.2. Molde experimental de agitador eléctrico.
(Fuente: [5]).

En este estudio mediante los resultados de las microestructuras se pudo conocer que el refinamiento de granos α -Al se incrementó en la red de Si. El colado fue a frecuencias variables (100Hz, 150 Hz, 200Hz) con una amplitud constante de 0.07cm. [5]

Las frecuencias usadas en estos estudios son superiores a 100 Hz, justificadas por la disponibilidad del equipo de vibración y las amplitudes relativamente similares con un máximo de 0.07 cm. Cada uno de estos estudios tiene como variable un parámetro ya sea la frecuencia o la amplitud. Los resultados de ambos estudios son cualitativos con referencia al análisis microestructural.

Ya se ha descrito que Abu y Zhong han utilizado en sus estudios frecuencias superiores a 100 Hz, en contraste el presente trabajo utilizará frecuencias variables bajas, correspondientes al equipo disponible en el Laboratorio de Fundición que irán en el rango de 4 a 16 Hz y amplitudes también variables utilizando como parámetros de control los tres discos excéntricos descritos en la tabla 1.4.

Será un aporte importante analizar el comportamiento del material a frecuencias bajas ya que las evidencias científicas que existen analizan aleaciones de aluminio a frecuencias relativamente altas (mayores a 100 Hz), de esta manera evidenciar experimentalmente si

se producen cambios durante la solidificación del material que permitan modificar la estructura y si estos cambios son positivos o perjudiciales para el material.

Los resultados de esta investigación serán cualitativos de acuerdo al análisis microestructural, pero también cuantitativos correspondientes a los resultados de los ensayos de dureza y tracción. La tabla 2.1 muestra los parámetros que se variarán en la mesa vibratoria para la experimentación.

Tabla 2.1. Amplitudes y frecuencias.

Colado estático			
Frecuencia: 0	Amplitud: 0		Número de probetas: 3
Colado dinámico			
Frecuencia del motor [Hz]	Frecuencia del Sistema Mesa vibratoria – molde [Hz]	Disco excéntrico	Número de probetas
12	4	A1 A2 A3	3 probetas por cada disco de prueba
24	8	A1 A2 A3	3 probetas por cada disco de prueba
36	12	A1 A2 A3	3 probetas por cada disco de prueba
48	16	A1 A2 A3	3 probetas por cada disco de prueba
Total probetas			39 probetas

(Fuente: Propia).

2.2 Selección de la Aleación.

Las diferentes aleaciones que se obtienen con el aluminio permiten mejorar las propiedades mecánicas del elemento puro para obtener propiedades específicas en una pieza fundida, se toma en cuenta parámetros que permitan obtener la mayoría de ventajas en cuanto a microestructura, dureza, y en su posibilidad la refinación del grano.

En la investigación de Pilataxi & Quillupangui realizada con la finalidad de mejorar la materia prima utilizada en una industria fundidora ecuatoriana se pudo concluir que con la correcta selección de la chatarra y la adición de elementos puros se obtienen mejoras en la fundición de poleas y los resultados favorecen para este caso en particular a la empresa Ecuapoleas S.A.

Se mejoró la aleación al clasificar la chatarra y como resultado de las probetas se obtuvo una uniformidad en la materia prima para que los elementos fundidos tengan las mismas características y progresos en cuanto a la dureza (76 Rockwell H), esto fue gracias a una aleación cercana a la AK5M, es aproximada ya que no se llegó en su totalidad a la composición química. La composición química se detalla en la tabla 2.2.

De acuerdo a esta premisa, para el presente estudio se ha decidido trabajar con la aleación de aluminio AK5M, con el fin de aportar al desarrollo de la producción de poleas en el país. La iniciativa concierne en determinar si existe una mejora de las propiedades de la aleación y proponer una alternativa del proceso de fundición sustituyendo el colado estático ha colado dinámico en el caso de obtener resultados positivos.

Tabla 2.2. Composición química en porcentajes de la aleación AK5M

Si	Cu	Mg	Fe	Mn	Zn	Al
4.5-5.5%	1.25%	0.5%	1%	0.5%	0.3%	91.45%

(Fuente: [19]).

Los beneficios esperados de la aleación AK5M en comparación con la aleación que se utilizó en el estudio del año 2018, es obtener mayor dureza, modificación de la microestructura sin uso de agentes externos como refinadores de grano o modificadores de silicio eutéctico como el cloruro de sodio.

2.3 Preparación de modelos.

Para la elaboración de las diferentes probetas se ha considerado los ensayos a realizar, de esta manera se tendrán como resultado las dimensiones necesarias para la fabricación de los modelos.

2.3.1 Ensayo de dureza.

Se realiza en el material para determinar la resistencia a ser indentado de forma permanente, para el caso del aluminio la dureza Brinell promedio es de 20 HB.

La geometría a considerar para este ensayo es la recomendada por Veintimilla & Quinga y se detalla en la figura 2.3.

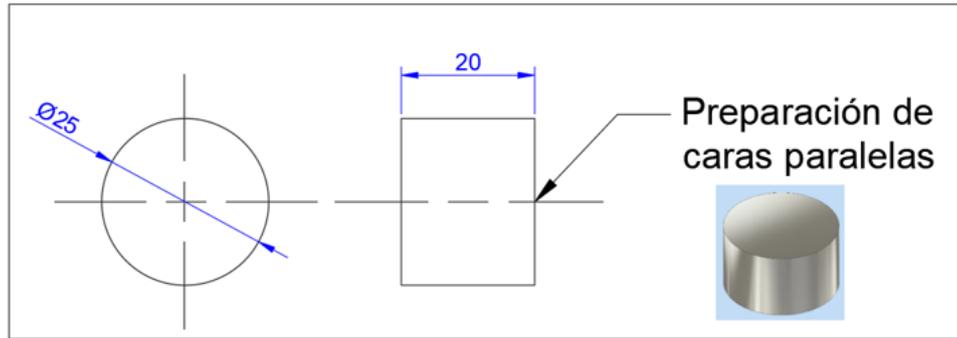


Figura 2.3. Probeta para ensayo de dureza.
(Fuente: Propia).

2.3.2 Análisis de microestructura.

Este análisis microestructural permitirá determinar los cambios en el aluminio respecto a las variaciones de frecuencia y amplitud, la geometría recomendada por Veintimilla & Quinga para este análisis se detalla en la figura 2.4.

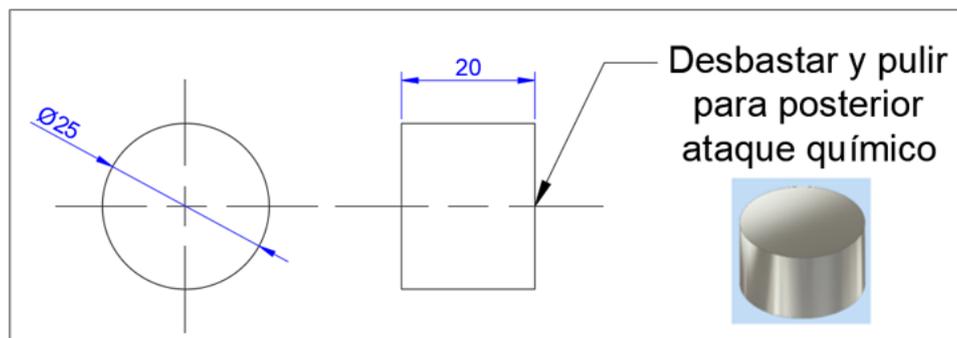
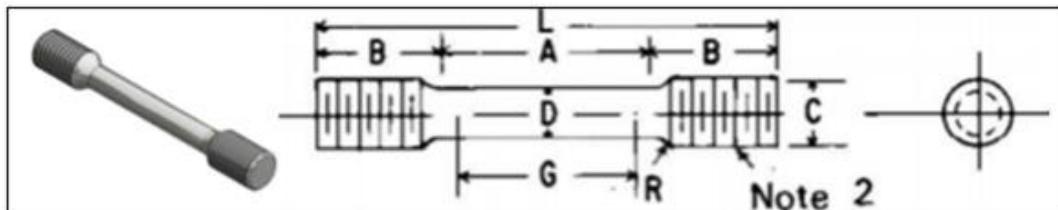


Figura 2.4. Probeta para análisis de microestructura.
(Fuente: Propia).

2.3.3 Ensayo de tracción.

Para este ensayo se debe aplicar una carga creciente en dirección axial a la probeta hasta la rotura, de esta forma se determinan propiedades mecánicas como la resistencia a la tracción. El ensayo de tracción se desarrolla de acuerdo a los parámetros descritos en la norma ASTM A371. La geometría de las probetas para el ensayo de tracción es detallada en la norma ASTM E8 y se detallan en la tabla 2.3 a continuación:

Tabla 2.3. Descripción de las probetas según la norma ASTM E8.



Designación	Descripción	Espécimen
G	Longitud calibrada	50 ± 0.1 mm
D	Diámetro	12.5 ± 0.2 mm
R	Radio filete	10mm
A	Longitud de la sección reducida	56 mm
L	Longitud total aproximada	126mm
B	Longitud del tramo final	35mm
C	Diámetro de la sección final	20mm
Nota 1.	La sección reducida puede tener una conicidad gradual desde los extremos hacia el centro con los exámenes no más del 1% más grande en diámetro que el centrar	
Nota 2.	Las probetas tendrán una rosca normalizada UNS (Unified National Standard) de la serie UNC (Unificada Nacional Gruesa), con designación $\frac{1}{4}$ - 10 UNC -2A, longitud de la rosca recomendada 1 pulgada.	

(Fuente: [20]).

Para la preparación del modelo se ha tomado en cuenta la distribución de la figura 2.5 y tomando en cuenta las geometrías descritas en los puntos anteriores se determinan las medidas.

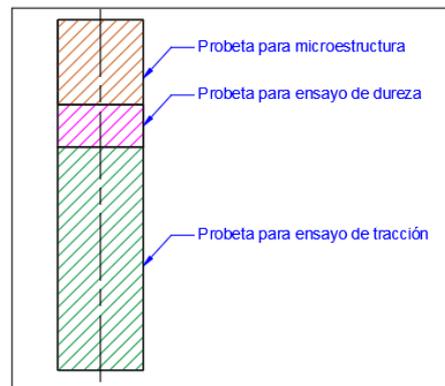


Figura 2.5. Distribución de probetas para ensayos.
(Fuente: Propia).

2.3.4 Sobredimensionamiento por contracción.

El metal adquiere la forma y dimensiones del molde, sin embargo, para obtener las dimensiones reales de la pieza fundida se debe considerar la contracción del material hasta llegar a la temperatura ambiente que se produce debido a las fuerzas interatómicas en el

metal líquido mientras se solidifica, para el dimensionamiento de los modelos se toma en cuenta el valor de tolerancia de contracción que se describe a continuación para diferentes materiales en la tabla 2.4.

Tabla 2.4. Tolerancias de contracción de metales.

Material	Dimensiones del modelo [mm]	Tolerancias de contracción [mm/m]
Fundición gris	Superior a 600	10.5
	600 a 1200	8.5
	Inferior a 1200	7.0
Fundición Blanca	----	16.0 a 23.0
Hierro Dúctil	----	8.3 a 10.4
Acero al carbono	Superior a 600	21.0
	600 a 800	16.0
	Inferior a 1800	13.0
Acero al Manganeso	----	25.0 a 38.0
Aluminio	----	13.0
Bronce	----	20.0 a 23.0

(Fuente: [21]).

La tolerancia de contracción para el aluminio es 13 mm/m, por lo tanto, para determinar la longitud final se tiene la expresión 2.2:

$$\Delta L = 13 \frac{\text{mm}}{\text{m}} \times L \frac{\text{m}}{1000 \text{ mm}} \quad [2.1]$$

$$\Delta L = 0.013L$$

$$L_f = L + \Delta L \quad [2.2]$$

$$L_f = L + 0.013L = 1.013L$$

Donde:

L_f: longitud final

L: longitud inicial

ΔL: variación de longitud por contracción

2.3.5 Sobredimensionamiento por maquinado.

Tomando en cuenta que en el proceso de fundición se pueden obtener piezas con presencia de micro escamas y un acabado superficial no uniforme se procede a maquinar

las superficies hasta obtener las dimensiones de cada probeta. Las tolerancias para maquinado se presentan en la tabla 2.5.

Tabla 2.5. Tolerancias y rugosidades para acabados superficiales.

Proceso de fundición	Tamaño de la pieza	Tolerancias		Rugosidad superficial	
		[pulg]	[mm]	[μpulg]	[μm]
Fundición de arena					
Aluminio	Pequeño	±0.020	(±0.5)	250 – 1000 (6-35)	
Hierro fundido	Pequeño	±0.040	(±1.0)		
	Grande	±0.060	(±1.5)		
Aleaciones de cobre	Pequeño	±0.015	(±0.4)		
Acero	Pequeño	±0.050	(±1.3)	250 – 1000 (6-35)	
	Grande	±0.080	(±2.0)		

(Fuente: [21]).

Para el caso del aluminio la tolerancia por maquinado es de 0.5 mm, este valor es adicionado a la dimensión real de las probetas.

2.3.6 Determinación final de las dimensiones de los modelos.

El modelo que se utilizará para la fundición tendrá una longitud de 225 mm y 30 mm de diámetro con una distribución para cada ensayo como se muestra en la figura 2.6 a continuación:

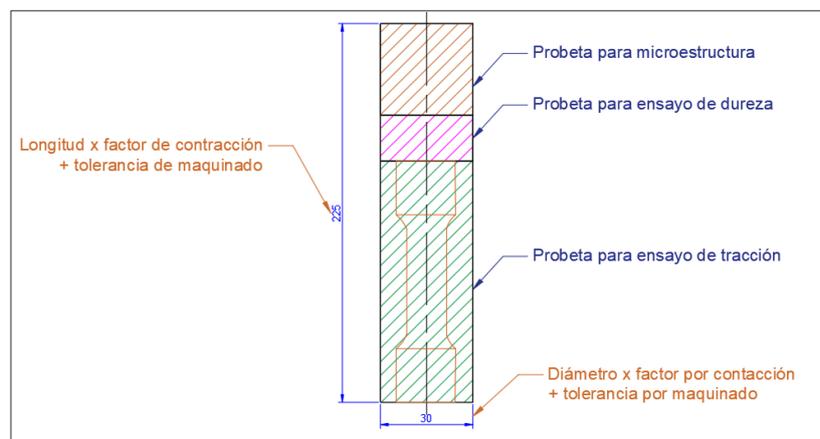


Figura 2.6. Dimensión final del modelo.
(Fuente: Propia).

Después de las consideraciones para el dimensionamiento de las probetas con los valores finales se puede determinar la masa del material a fundir por tanto mediante el volumen y la expresión 2.3 se obtiene la masa para cada probeta:

$$v = \pi \times r^2 \times h \text{ [cm}^3\text{]} \quad [2.3]$$

$$v = \pi \times 1.5^2 \times 22.5 = 158.96 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$m = \delta \times v \text{ [kg]} \quad [2.4]$$

$$m = 2.73 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \times 158.96 \text{ cm}^3 = 0.43 \text{ [kg]}$$

Donde:

v : volumen

h : altura

r : radio

m : masa

δ : densidad

2.4 Dimensionamiento de la caja de moldeo

Para asegurar una estructura correcta entre las paredes formadas por arena en la caja de moldeo es necesario considerar las dimensiones de la moldura, de esta manera se tendrá un espesor adecuado con la resistencia para soportar las presiones estáticas y dinámicas de la colada. En la tabla 2.6 se presentan recomendaciones para la distribución de los modelos.

Tabla 2.6. Distancia pieza-pieza y pieza-molde

Distancia pieza-pieza y pieza molde					
Tipo de pieza	Dimensiones [mm]				
	A	b	B	s	d
Pequeñas	10 a 30	35 a 60	50 a 75	0.3 e la altura de la plantilla	0.5 de la altura plantilla
Medianas	50 a 75	74 a 100	100 a 125		
Grandes	125 a 175	150 a 200	175 a 200		

(Fuente: [22]).

Se tomará como referencia los valores acotados para piezas medianas y en consecuencia las dimensiones de la caja de moldeo seleccionadas son 400 mm por lado y 77 mm de altura por cada una de las tapas, hembra y macho respectivamente como se puede apreciar en la figura 2.7.

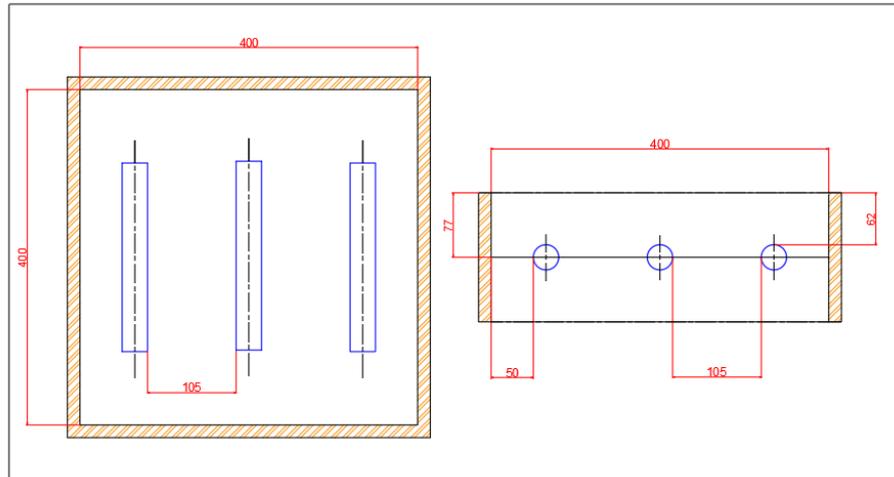


Figura 2.7. Dimensiones caja de moldeo.
(Fuente: Propia).

2.5 Preparación de moldes.

Al realizar moldes debe tomarse en cuenta el tipo de arena de moldeo a utilizar, según su composición se pueden clasificar en: arena sílice SiO_2 , arena de zirconio ZrSiO_4 , arena de cromita FeOCr_2O_3 . Los moldes elaborados en este estudio son hechos con arena sílice debido a la facilidad de adquisición en el medio, costos y propiedades que benefician el moldeo, dicha arena es mezclada con tres tipos de resinas las mismas que deben ser colocadas en porcentajes de acuerdo al peso.

Citando los beneficios que tiene la arena sílice (SiO_2) se dice que da refractariedad suficiente para soportar elevadas temperaturas, es económica, accesible para ser extraída, tiene una amplia gama de tamaño de grano y resistente al metal durante el labor de colado. La arena sílice es mezclada con las tres resinas en una mezcladora que se encuentra en el laboratorio de fundición de la EPN, figura 2.8.



Figura 2.8. Mezcladora de arena sílice.
Fuente: (Propia)

La resina seleccionada para la elaboración de los moldes se denomina “fenólica de uretano”, las proporciones de la resina se dan dependiendo de la cantidad de arena sílice. En base al volumen de las cajas de madera se ha considerado un valor de 19Kg de arena sílice, en la tabla 2.7 se especifica las cantidades utilizadas de resina.

Tabla 2.7. Porcentaje de las resinas.

	Resina A	Resina B	Resina C
	0.665 kg	0.240 kg	0.665 kg
Peso de la arena sílice: 19 kg			

Fuente: (Propia)

- La resina A tiene el 3.5% en peso con respecto a la arena sílice.
- La resina B tiene el 1.26% en peso con respecto a la arena sílice.
- La resina C tiene el 3.5% en peso con respecto a la arena sílice.

Los valores detallados en la tabla 2.7 se seleccionaron después de realizar varias pruebas utilizando los siguientes criterios: menor desprendimiento de arena de las paredes del modelo, tiempo de secado considerablemente corto y acabado general aceptable. La mezcla de la arena sílice con las resinas presenta el siguiente aspecto que puede ser observado en la figura 2.9.



Figura 2.9. Mezcla de arena sílice con resina.
Fuente: (Propia)

2.5.1 Diseño del Sistema de Alimentación.

Para obtener una moldura o pieza de calidad una de las condiciones más importantes es un adecuado sistema de alimentación que permita el suministro suave de la colada hacia la cavidad del molde. Un adecuado sistema de bebederos asegura el llenado del molde y contribuye a la obtención de piezas exactas minimizando los defectos. La figura 2.10 muestra el diseño del sistema de alimentación a la moldura de fundición.

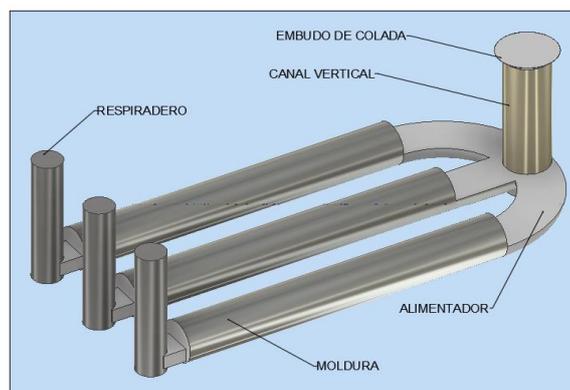


Figura 2.10. Diseño del sistema de alimentación.
(Fuente: Propia).

2.5.2 Tiempo de llenado del molde.

Para obtener piezas de calidad es óptimo un llenado uniforme y en un tiempo adecuado con el propósito de que la colada se deposite de manera continua y no intermitente. La uniformidad permite obtener piezas mejores y una mejor evacuación de gases en la solidificación.

Para calcular el tiempo de llenado del molde se considera la masa total de metal que ingresa, teniendo así:

La masa de las probetas es igual a $0.434 \text{ kg} \times 3$ (número de piezas) = 1.302 kg.

La masa del sistema de alimentación se estima un aproximado del 25% de la masa de las piezas a fundir, por tanto; la masa del sistema de alimentación es: $25\% \times 3$ (número de piezas) $\times 1.302 = 0.97 \text{ kg}$.

La masa total es igual a la masa de las probetas más la masa del sistema de alimentación: $1.302 + 0.5859 = 2.27 \text{ kg}$.

El tiempo de llenado del molde se calcula con la expresión 2.5, propuesta por Mikhailov donde A es constante y depende del metal con el que se va a trabajar, se muestra en la tabla 2.8. El peso total de la pieza en kg es M y δ es el espesor mínimo de la pieza en mm.

Tabla 2.8 Contante A de Milkhailov.

Metal	Constante A
Acero	1.5
Hierro gris	0.76
Fe maleable	1.89
Fe nodular	0.97
Aluminio	1.42
Aluminio 2	1.7
Bronce	0.47
Aleación Mg	2.3

(Fuente: [23]).

$$T_u = A \sqrt[3]{\delta \times M} \quad [2.5]$$

$$T_u = 1.7 \sqrt[3]{30\text{mm} \times 2.27\text{kg}}$$

$$T_u = 6.9 \approx 7 \text{ segundos}$$

Donde:

T_u : tiempo de llenado del molde

2.5.3 Canal vertical.

Es responsable de transmitir la masa fundida a los demás elementos del sistema de alimentación, su correcto dimensionamiento garantiza una adecuada presión de ingreso del material. La altura de presión que debe tener el metal durante el proceso de llenado depende de las dimensiones de la moldura y la ubicación de la misma en el molde de fundición. La expresión 2.6 que permite determinar la altura de presión cuando el molde es llenado por la línea de partición, es la siguiente:

$$H = \frac{2hc - p^2}{2c} \quad [2.6]$$

Donde:

H: altura de presión

h: altura del canal vertical y embudo de colado

c: altura de la moldura

p: altura de la moldura desde el lugar de suministro de la colada.

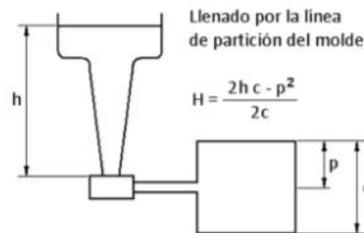


Figura 2.11. Esquema de llenado del molde por la línea de partición.
(Fuente: [23]).

Para el caso en estudio el diámetro de la moldura corresponde a la altura que es $c=30$ mm, $h=77$ mm y $p=15$ mm.

$$H = \frac{2 \times (77\text{mm}) \times 30\text{mm} - 15\text{mm}^2}{2 \times 30\text{mm}} = 73.25 \text{ mm}$$

Los diferentes conductos de llenado se rigen por la ecuación de Bernoulli que asemeja las líneas de corriente desde la entrada de la colada hasta el final de los alimentadores y esta expresada en la ecuación 2.7.

$$P = \sqrt{2gH} Sa\delta t 10^3 \quad [2.7]$$

Donde:

P: peso del metal

H: altura de presión

g: gravedad

Sa: sección de paso

t: tiempo óptimo de colado

δ : densidad del material

$$Sa = \frac{P}{0.6\sqrt{2gH}\delta t} \quad [2.8]$$

$$S_a = \frac{2.27 \text{ kg}}{0.3 \sqrt{2 \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) 0.07325 \text{ m} \times 2700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 6.9}} = 339 \text{ mm}^2$$

Por tanto, de acuerdo a la ecuación 2.9, el diámetro (d) del canal vertical será:

$$d = 2 \times \sqrt{\frac{S_a}{\pi}} \quad [2.9]$$

$$d = 2 \times \sqrt{\frac{339 \text{ mm}^2}{\pi}} = 20.78 \text{ mm}$$

2.5.4 Alimentadores.

Suministran la colada directamente a la cavidad del molde, su configuración debe permitir un llenado suave y una separación fácil de la moldura luego de la solidificación. La velocidad de movimiento de la masa fundida de aluminio durante el proceso de llenado según Titov, no debe exceder los 150 cm/s; por esta razón se utilizan sistemas de alimentación que se ensanchan con la siguiente correlación recomendada: S canal vertical: S alimentadores, que corresponde a 1: 2; 1: 1.5.

Para el caso de los alimentadores la sección será: S alimentadores es igual a 2 veces la sección del canal vertical; teniendo así 678 mm^2 . Para el diseño de los alimentadores se ha tomado en cuenta una sección curva semicilíndrica, con esta premisa y aplicando la ecuación 2.10, el diámetro de los alimentadores es:

$$d = 2 \times \sqrt{\frac{2 \times S_{\text{alimentador}}}{\pi}} \quad [2.10]$$

$$d = 2 \times \sqrt{\frac{2 \times 226 \text{ mm}^2}{\pi}} = 23.98 \text{ mm}$$

2.5.5 Respiradores.

Permiten la adecuada evacuación de gases de la cavidad del molde, se recomienda una sección menor a la del canal vertical de entrada, pero no excesivamente esbelta ya que el material debe fluir con facilidad, para este diseño se ha tomado en consideración un diámetro de 15 mm.

2.5.6 Embudo de colada.

Permite recibir el chorro de la colada al molde y retener escoria para que no penetre con el metal líquido, usualmente su geometría es similar a un cono truncado y tomando en cuenta este precepto se lo ha diseñado con las relaciones señaladas en la figura 2.12. Siendo D_{pc} el diámetro interior del embudo, D_{bs} el diámetro superior del canal vertical y H la altura del canal vertical. Para el diseño de este trabajo la altura será de 17 mm, el diámetro inferior de 52 mm y el diámetro superior de 68 mm.

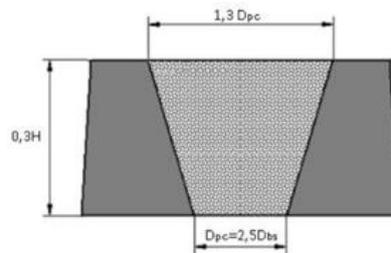


Figura 2.12. Dimensiones del embudo de colada.
(Fuente: [23]).

2.6 Producción de la materia prima.

En el apartado 2.2 se detalla la selección de la aleación de aluminio AK5M con la cual se ha decidido trabajar, para llegar a esta aleación se incorporan diferentes componentes disponibles en nuestro medio. La aleación está constituida por chatarra y elementos puros que complementan la carga hasta llegar a la composición química deseada. Como chatarra se utilizaron partes de un motor en desuso: pistones, block y piezas de la culata, mientras que como elementos puros se añadió principalmente alambrión de aluminio que posee una pureza del 99.9%. El aporte de aluminio tiene como función principal bajar el alto porcentaje de silicio de los pistones.

El cálculo de la carga se realiza en base a una masa de 100 Kg para su posterior interpolación a la masa que se requiera. La composición química de la aleación a conseguir se detalla en la tabla 2.2.

Se debe considerar que en el proceso de fundición existen pérdidas de elementos debido a la evaporación de los mismos en forma de gases, por tanto, se considera el quemado de los elementos en un horno de crisol como se indica en la tabla 2.9.

Tabla 2.9. Porcentaje de quemado de elementos en hornos de crisol.

Si	Cu	Mg	Fe	Mn	Zn	Al
0.75%	1.5%	2%	1%	2%	3.5%	1.5%

(Fuente: [24]).

Para los cálculos pertinentes se ha realizado un ensayo de composición química a la chatarra que corresponde a la carga principal de la aleación, cada muestra ha sido designada con la letra M_n , siendo n el número de muestra. En la tabla 2.10 se puede apreciar la composición química de cada muestra y el alto porcentaje de silicio que posee cada una.

Tabla 2.10. Composición química de las muestras.

Muestra	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10
Peso [Kg]	1.405	1.295	1.295	1.395	0.31	0.305	0.24	0.235	3.515	8.765
% Si	14.43	14.41	12.78	13.85	13.92	13.47	15.03	15.94	12.53	9.01
% Cu	1.12	1.25	1.44	1.91	1.37	1.47	1.42	2.25	2.86	2.70
% Mg	2.10	2.17	1.89	1.49	1.04	1.70	1.58	1.64	0.18	0.22
% Fe	0.80	1.27	1.01	0.51	0.57	0.89	0.64	0.55	0.92	0.70
% Mn	0.14	0.20	0.12	0.07	0.02	0.04	0.20	0.18	0.12	0.31
% Zn	0.15	0.08	0.11	0.05	0.02	0.07	0.11	0.09	0.07	0.26
%Al	79.73	77.71	80.26	80.26	81.74	80.82	79.62	77.95	82.90	86.63
%Otros elementos	1.53	2.91	2.39	1.86	1.32	1.54	1.40	1.40	0.42	0.17
TOTAL %	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

(Fuente: Propia).

A continuación, se detalla el cálculo de la carga para la obtención de la materia prima:

1) Determinación el quemado de los elementos

Tabla 2.11. Quemado de los elementos.

Elementos	A (% Aleación a conseguir)	B (condiciones de quemado/100)	C RESULTADO= A x B [Kg]
Si	5	0.075	0.375
Cu	1.250	0.015	0.0180
Mg	0.500	0.020	0.0100
Fe	1	0.010	0.0100
Mn	0.500	0.020	0.0100
Zn	0.300	0.035	0.0105
Al	91.450	0.015	1.371

(Fuente: Propia).

2) Cantidad de material requerido

Tabla 2.12. Material requerido.

Elementos	A (Aleación a conseguir)	C Quemado de los elementos	Material Requerido A + C [Kg]
Si	5	0.375	5.375
Cu	1.250	0.018	1.268
Mg	0.500	0.010	0.510
Fe	1	0.010	1.010
Mn	0.500	0.010	0.510
Zn	0.300	0.011	0.311
Al	91.450	1.371	92.821

(Fuente: Propia).

3) Determinación de la carga de chatarra y material puro a adicionar para conseguir la aleación AK5M considerando 100 Kg.

Tabla 2.13. Carga para 100 kg.

Muestra	Mat. Requerido	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Peso [Kg]		Disponibile	Disponibile	Disponibile	Disponibile	Disponibile	Disponibile
Si	5.375	0.20274	0.1866095	0.16550	0.1932075	0.043152	0.041084
Cu	1.268	0.01574	0.0161875	0.01865	0.0266445	0.004247	0.004484
Mg	0.510	0.02951	0.0281015	0.02448	0.0207855	0.003224	0.005185
Fe	1.010	0.01124	0.0164465	0.01308	0.0071145	0.001767	0.002715
Mn	0.510	0.00197	0.0025900	0.00155	0.0009765	0.000062	0.000122
Zn	0.311	0.00211	0.0010360	0.00142	0.0006975	0.000062	0.000214
Al	92.821	1.12021	1.0063445	1.03937	1.119627	0.253394	0.246501
Muestra	M7	M8	M9	M10	Total Disponible [Kg]	Elementos Puros [Kg] por agregar	
Peso [Kg]	Disponibile	Disponibile	Disponibile	Disponibile			
Si	0.036072	0.037459	0.4404295	0.7897265	2.135982	3.61	
Cu	0.003408	0.0052875	0.100529	0.236655	0.431826	0.82	
Mg	0.003792	0.0038540	0.006327	0.019283	0.1445325	0.35	
Fe	0.001536	0.0012925	0.032338	0.061355	0.1488835	0.85	
Mn	0.000480	0.0004230	0.004218	0.0271715	0.039564	0.46	
Zn	0.000264	0.0002115	0.0024605	0.022789	0.031266	0.28	
Al	0.191088	0.1831825	2.913935	7.5931195	15.666765	77.15	
					TOTAL=	83.55	

(Fuente: Propia).

La masa necesaria para la elaboración de 39 probetas es 29.51 Kg, se considerará una carga de 40 Kg estimando pérdidas por escoria y desperdicio en las paredes del crisol.

4) Carga total para la obtención de 40 Kg de aleación AK5M

Tabla 2.14. Carga para 40 kg.

Muestra	Para 40kg de aleación	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Peso [Kg]	Se requiere	Disponibile	Disponibile	Disponibile	Disponibile	Disponibile	Disponibile
Si	2.15	0.20274	0.1866095	0.1655	0.1932075	0.043152	0.041084
Cu	0.507	0.01574	0.0161875	0.01865	0.0266445	0.004247	0.004484
Mg	0.204	0.02951	0.0281015	0.02448	0.0207855	0.003224	0.005185
Fe	0.404	0.01124	0.0164465	0.01308	0.0071145	0.001767	0.002715
Mn	0.204	0.00197	0.0025900	0.00155	0.0009765	0.000062	0.000122
Zn	0.124	0.00211	0.001036	0.00142	0.0006975	0.000062	0.000214
Al	37.128	1.12021	1.0063445	1.03937	1.119627	0.253394	0.246501
Muestra	M7	M8	M9	M10	Total disponible [Kg]	Elementos puros [Kg]	Elementos puros [g] para agregar
Peso [Kg]	Disponibile	Disponibile	Disponibile	Disponibile			
Si	0.036072	0.037459	0.4404295	0.7897265	2.135982	0.014018	14.018
Cu	0.003408	0.0052875	0.100529	0.236655	0.431826	0.075674	75.674
Mg	0.003792	0.003854	0.006327	0.019283	0.1445325	0.059467	59.4675
Fe	0.001536	0.0012925	0.032338	0.061355	0.1488835	0.255116	255.1165
Mn	0.000480	0.000423	0.004218	0.0271715	0.039564	0.164436	164.436
Zn	0.000264	0.0002115	0.0024605	0.022789	0.031266	0.092934	92.934
Al	0.191088	0.1831825	2.913935	7.5931195	15.666765	21.46193	21461.93
TOTAL=						22.12	

(Fuente: Propia).

De acuerdo a los cálculos detallados anteriormente se tiene que para la obtención de 40 kilogramos de aleación se requiere una carga final de: 22.12 kg de elementos puros más 18.73 kg de chatarra. Para producir la materia prima se ha considerado la fabricación de tochos como se muestra en la figura 2.13 que permitan un mejor manejo del material para la fundición final de las probetas.



Figura 2.13. Tochos de aluminio.
(Fuente: Propia).

2.7 Producción de las molduras.

Para fundir las probetas se considera un nuevo cálculo de la carga de fundición tomando en cuenta el quemado de los elementos y por tanto nuevas pérdidas de material.

Se considera la misma aleación a conseguir descrita en la tabla 2.2 y las mismas condiciones de quemado de la tabla 2.9. Siguiendo el mismo proceso ya descrito en el apartado anterior se obtienen los resultados de la tabla 2.15.

Tabla 2.15. Carga para 8 Kg.

Muestra	Para 8kg De La Aleación	MATERIA PRIMA	TOTAL DISPONIBLE	ELEMENTOS PUROS [Kg]	ELEMENTOS PUROS [g]
Peso [Kg]	SE REQUIERE	DISPONIBLE	[Kg]		
Si	0.4300	0.31124	0.31124	0.11876	118.76
Cu	0.1015	0.085498	0.085498	0.016002	16.002
Mg	0.0408	0.008990	0.008990	0.031810	31.81
Fe	0.0808	0.105152	0.105152	-0.024352	-24.352
Mn	0.0408	0.008680	0.008680	0.032120	32.12
Zn	0.02484	0.010416	0.010416	0.014424	14.424
Al	7.42574	5.63518	5.635180	1.79056	1790.56
TOTAL=				1.979324	

Fuente: (Propia).

En la tabla 2.15 se puede observar los resultados de los elementos puros, el resultado se da al restar el material requerido para 8kg de aleación con el material total disponible. Referenciando a los dos elementos más importantes de la aleación por su alto contenido, se debe agregar 0.118kg de Silicio y 1.79 de Aluminio para realizar la fundición y obtener las probetas. Este proceso se seguirá repitiendo hasta culminar con el número de probetas según la preparación práctica de las cajas de moldeo.

Durante el proceso de fundición es importante controlar ciertos parámetros para cada una de las coladas, el tiempo de colado corresponde al calculado en el apartado 2.5.2; aproximadamente 7 segundos, también es importante el control de la temperatura de colado que debe ser superior a 800 °C para garantizar la fluidez del aluminio, el control de este parámetro se realizó con un pirómetro digital expuesto en la figura 2.14 a continuación:



Figura 2.14. Pirómetro digital.
(Fuente: Propia).

El montaje del molde en la mesa de vibración se puede apreciar en la figura 2.15, para el análisis de las vibraciones generadas durante el proceso de fundición se ha utilizado un analizador de vibraciones MAINTraq que mediante sensores (acelerómetros), permite medir las oscilaciones del sistema mesa – molde. Las mediciones se realizan mediante un software que muestra en su interfaz las curvas de amplitud vs tiempo.



Figura 2.15. Sistema mesa vibratoria – molde.
(Fuente: Propia).

El tiempo que el sistema permanece en vibración es de dos minutos para cada uno de los moldes, de tal manera que todas las probetas tengan el mismo tiempo de exposición a la vibración durante el colado y solidificación del material. Finalmente, el desmolde de las probetas se realiza tomando en cuenta un tiempo prudencial de enfriamiento del material. La figura 2.16 muestra las probetas obtenidas y en la tabla 2.16 se muestra en resumen los parámetros de cada grupo de probetas obtenido.



Figura 2.16. Probetas para mecanizar.
(Fuente: Propia).

Tabla 2.16. Parámetros controlados durante el proceso de fundición.

Código	Disco excéntrico de prueba	Frecuencia del motor [Hz]	Temperatura de colado [°C]	Tiempo de colado [seg]	Observaciones
M12A1	A1	12	864	7.20	-----
M12A2	A2		823	7.36	-----
M12A3	A3		810	7.16	-----

Código	Disco excéntrico de prueba	Frecuencia del motor [Hz]	Temperatura de colado [°C]	Tiempo de colado [seg]	Observaciones
M24A1	A1	24	865	7.50	-----
M24A2	A2		815	7.44	-----
M24A3	A3		803	7.09	-----
M36A1	A1	36	864	8.10	-----
M36A2	A2		825	7.55	-----
M36A3	A3		807	7.29	-----
M48A1	A1	48	862	7.37	-----
M48A2	A2		812	7.86	-----
M48A3	A3		808	7.60	Llenado parcial del molde

Fuente: (Propia).

2.8 Producción de las probetas.

En el apartado 2.3 se ha detallado los ensayos tomados en cuenta para este estudio: ensayo de dureza, ensayo micro estructural, ensayo de tracción y ensayo de composición química; de acuerdo a las dimensiones que requieren las probetas se mecanizan y se ponen a punto para el ensayo correspondiente.

2.8.1 Preparación superficial de las probetas.

Posterior al proceso de fundición, las probetas poseen un acabado superficial aceptable; sin embargo, para el mecanizado final es necesario mejorar la superficie y preparar los extremos de los ejes obtenidos. En la figura 2.17 se muestran las probetas sin mecanizar.



Figura 2.17. Probetas sin mecanizar.
(Fuente: Propia).

Para el maquinado es necesario preparar las probetas; cilindrar la superficie, refrentar los extremos y realizar el agujero de centros para el montaje en la máquina CNC. Estas operaciones se realizaron en un torno manual. La figura 2.18 esquematiza el proceso.



Figura 2.18. Preparación de las probetas en torno manual.
(Fuente: Propia).

2.8.2 Mecanizado CNC para probetas de tracción.

Para la obtención de las probetas de tracción normalizadas el método disponible más rápido y de mayor precisión es el mecanizado CNC, de acuerdo a las dimensiones especificadas en la norma ASTM E8 se maquina cada una de las probetas. El mecanizado es realizado en un torno CNC Romi que usa lenguaje G para la programación. Las probetas mecanizadas se muestran en la figura 2.19 a continuación.



Figura 2.19. Probetas de tracción mecanizadas en el torno CNC.
(Fuente: Propia).

2.8.3 Desbaste de probetas de microestructura y dureza.

Para poner a punto las probetas de dureza y microestructura es necesario desbastar las caras de forma paralela y pulir la cara de estudio de microestructura hasta obtener una apariencia tipo espejo. El equipo utilizado para este proceso es la máquina pulidora Forcipol en la cual se introducen los parámetros de presión y velocidad de trabajo, la

probeta pasa por un proceso de desbaste grueso con láminas de lijas que se van incrementando de acuerdo al número de granos por área y finaliza con un desbaste fino o pulido con un paño de una micra para el tratamiento de metales. En la figura 2.20 se muestra el equipo de desbaste y pulido acompañado de las probetas preparadas para el ataque químico.



Figura 2.20. **a.** Pulidor Forcipol. **b.** Probetas para ensayo de microestructura y dureza.
(Fuente: Propia).

En el presente apartado muestra los resultados correspondientes a los ensayos de composición química, tracción, dureza y microestructural cada uno se ha registrado en tablas y se complementan una gráfica para una mayor comprensión de los resultados.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

3.1 Inspección visual de las probetas

Durante el proceso de fundición de las probetas se evidenció un fenómeno particular en el canal de alimentación de la colada. En la solidificación del material correspondiente a pruebas desarrolladas en la fundición estática y a frecuencias y amplitudes bajas el canal de alimentación presenta un rechufe de tamaño considerable, un ejemplo se muestra en la figura 3.1, mientras que, conforme se ha aumentado la frecuencia y la amplitud el material se segrega del molde formando una masa fuera del canal de alimentación y no toma la forma del embudo de colada como se observa en la figura 3.2.



Figura 3.1 Canal de alimentación de la probeta de código M12A2, con presencia de rechufe.
(Fuente: Propia).



Figura 3.2 Canal de alimentación de la probeta de código M48A2, con presencia de segregación del material.
(Fuente: Propia).

Las probetas obtenidas después de la fundición tienen un acabado superficial aceptable, presencia de rebabas, pero estructuralmente sólido. La apariencia superficial de las probetas sin mecanizar se encuentra en la figura 3.3 a continuación.



Figura 3.3 Acabado superficial de las probetas sin mecanizar.
(Fuente: Propia).

Durante el proceso de mecanizado del material, se pudo apreciar la presencia de microrechupes distribidos por toda la superficie, la figura 3.4 muestra las probetas de tracción mecanizadas y con la presencia de las discontinuidades.



Figura 3.4. Probetas de tracción con presencia de discontinuidades.
(Fuente: Propia).

Las discontinuidades del material no solo se evidenciaron en el desbaste longitudinal de las probetas, también fueron visibles y en mayor escala en los cortes transversales del material para obtener las probetas de microestructura, dureza y composición química. La figura 3.5 presenta las probetas de microestructura con microrechupes distribuidos de forma homogénea.



Figura 3.5 Probetas de microestructura con presencia de discontinuidades.
(Fuente: Propia).

De acuerdo a las evidencias detectadas se han analizado las discontinuidades que se presentan en mayor cantidad conforme se va aumentando la frecuencia y amplitud en cada prueba. El análisis microestructural permite examinar de forma más detallada la discontinuidad, el microrechupe presenta bordes irregulares, pero sin ángulos agudos, por lo que se podría concluir que no constituye concentradores de esfuerzos. En la figura 3.6 se puede apreciar la geometría de un microrechupe.



Figura 3.6. Microrechupe de microestructura a 50x.
(Fuente: Propia).

3.2 Resultados del análisis de composición química.

De acuerdo a la composición química presentada en la tabla 2.10 se realizaron los cálculos para la fundición, a continuación, la tabla 3.1 presenta la composición química de cada prueba realizada y la tabla 3.2 muestra la variación correspondiente entre la composición química de la aleación AK5M y la composición de las probetas de prueba.

Tabla 3.1. Composición química de las probetas de prueba.

	M12A1	M24A1	M36A1	M48A1	M12A2	M24A2
Elemento	%	%	%	%	%	%
Aluminio	91.40	90.6	90.1	90.50	90.90	90.60
Silicio	5.36	5.65	5.79	5.78	5.59	5.63
Cobre	0.81	1.03	0.98	1.06	1.10	1.12
Magnesio	0.08	0.08	0.10	0.08	0.056	0.10
Manganeso	0.05	0.08	0.10	0.08	0.05	0.10
Cromo	0.02	0.03	0.04	0.03	0.02	0.04
Hierro	1.72	2.01	2.30	1.90	1.67	1.92
Níquel	0.32	0.34	0.38	0.39	0.36	0.34
Zinc	0.15	0.15	0.15	0.16	0.14	0.16
Titanio	0.013	0.016	0.017	0.015	0.013	0.015
Total	100.0	99.98	99.98	99.98	99.97	99.98

Fuente:(Propia)

	M36A2	M48A2	M12A3	M24A3	M36A3	Estático
Elemento	%	%	%	%	%	%
Aluminio	91.10	90.7	91.3	90.5	90.4	90.6
Silicio	5.51	5.4	5.51	5.53	5.77	5.78
Cobre	1.06	0.88	0.91	1.09	1.03	0.95
Magnesio	0.09	0.09	0.08	0.06	0.08	0.1
Manganeso	0.05	0.1	0.05	0.1	0.07	0.08
Cromo	0.02	0.04	0.018	0.05	0.03	0.03
Hierro	1.62	2.23	1.67	2.12	2.01	1.72
Níquel	0.36	0.33	0.30	0.35	0.38	0.49
Zinc	0.15	0.15	0.12	0.16	0.16	0.11
Titanio	0.013	0.017	0.017	0.014	0.014	0.016
Total	99.98	99.98	99.97	99.99	99.98	99.98

Fuente: (Propia).

Tabla 3.2. Variación de composición química de las probetas de prueba.

	M12A1	M24A1	M36A1	M48A1	M12A2	M24A2
Elemento	$\Delta\%$	$\Delta\%$	$\Delta\%$	$\Delta\%$	$\Delta\%$	$\Delta\%$
Aluminio	0.020	0.890	1.360	1.000	0.530	0.900
Silicio	0.140	-0.150	-0.290	-0.280	-0.090	-0.130
Cobre	0.440	0.220	0.270	0.190	0.150	0.130
Magnesio	0.420	0.420	0.400	0.420	0.444	0.400
Manganeso	0.450	0.420	0.400	0.420	0.450	0.400
Cromo	-0.020	-0.030	-0.040	-0.030	-0.020	-0.040
Hierro	-0.720	-1.010	-1.300	-0.900	-0.670	-0.920
Níquel	-0.320	-0.340	-0.380	-0.390	-0.360	-0.340
Zinc	0.150	0.150	0.150	0.140	0.160	0.140
Titanio	-0.013	-0.016	-0.017	-0.015	-0.013	-0.015

	M36A2	M48A2	M12A3	M24A3	M36A3	Estático
Elemento	$\Delta\%$	$\Delta\%$	$\Delta\%$	$\Delta\%$	$\Delta\%$	$\Delta\%$
Aluminio	0.380	0.750	0.170	0.980	1.060	0.810
Silicio	-0.010	0.100	-0.010	-0.030	-0.270	-0.280
Cobre	0.190	0.370	0.340	0.160	0.220	0.300
Magnesio	0.410	0.410	0.420	0.440	0.420	0.400
Manganeso	0.450	0.400	0.450	0.400	0.430	0.420
Cromo	-0.020	-0.040	-0.018	-0.050	-0.030	-0.030
Hierro	-0.620	-1.230	-0.670	-1.120	-1.010	-0.720
Níquel	-0.360	-0.330	-0.300	-0.350	-0.380	-0.490
Zinc	0.150	0.150	0.180	0.140	0.140	0.190
Titanio	-0.013	-0.017	-0.017	-0.014	-0.014	-0.016

Fuente: (Propia).

3.3 Resultados del analizador de vibraciones.

Se ha explicado en el apartado 2.7 los parámetros que se deben setear durante la experimentación; por una parte, la frecuencia del motor y por otra cambiar el espesor de los discos excéntricos que permiten modificar la frecuencia y amplitud de la mesa vibratoria respectivamente.

Los valores reales de frecuencia y amplitud de todo el sistema de la mesa vibratoria – molde de fundición, son presentados en la interfaz del programa MAINTraq, de esta forma se puede determinar con precisión la frecuencia y amplitud del sistema, los datos son tomados cuando el sistema ya se estabiliza de acuerdo a la curva que se genera durante todo el tiempo de vibración del sistema, la figura 3.7 muestra las oscilaciones del sistema durante la experimentación.

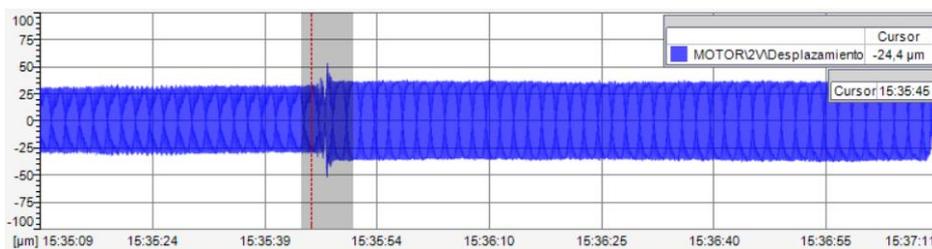


Figura 3.7. Curva amplitud vs tiempo durante la fundición, probeta M24A1.
(Fuente: Propia).

La figura 3.7 presenta una irregularidad en las oscilaciones, esta discontinuidad está enmarcada en la zona oscura del gráfico y corresponde al tiempo de colado del material.

En la tabla 3.3 se detallan los valores de frecuencia y amplitud correspondientes a cada una de las pruebas realizadas.

Tabla 3.3. Frecuencia y amplitud del sistema mesa vibratoria – molde de fundición.

Código	M12A1	Curva Amplitud vs Tiempo
Frecuencia [Hz]	4	<p>Desplazamiento [μm]</p> <p>10.0 7.5 5.0 2.5 0 -2.5 -5.0 -7.5 -10.0</p> <p>0 125 250 375 500 625 750 875 1000</p> <p>Tiempo [mseg]</p> <p>Hora: 13:00:56</p> <p>Cursor periodico Delta: 249.7 mseg Frec.: 4.006 Hz</p>
Amplitud [μm]	5	
Código	M12A2	Curva Amplitud vs Tiempo
Frecuencia [Hz]	4	<p>Desplazamiento [μm]</p> <p>10.0 7.5 5.0 2.5 0 -2.5 -5.0 -7.5 -10.0</p> <p>0 125 250 375 500 625 750 875 1000</p> <p>Tiempo [mseg]</p> <p>Hora: 13:13:46</p> <p>Cursor periodico Delta: 244.1 mseg Frec.: 4.096 Hz</p>
Amplitud [μm]	7	
Código	M12A3	Curva Amplitud vs Tiempo
Frecuencia [Hz]	4	<p>Desplazamiento [μm]</p> <p>10.0 7.5 5.0 2.5 0 -2.5 -5.0 -7.5 -10.0</p> <p>0 125 250 375 500 625 750 875 1000</p> <p>Tiempo [mseg]</p> <p>Hora: 13:23:26</p> <p>Cursor periodico Delta: 255.2 mseg Frec.: 3.919 Hz</p>
Amplitud [μm]	8.5	
Código	M24A1	Curva Amplitud vs Tiempo
Frecuencia [Hz]	8	<p>Desplazamiento [μm]</p> <p>50.0 37.5 25.0 12.5 0 -12.5 -25.0 -37.5 -50.0</p> <p>0 125 250 375 500 625 750 875 1000</p> <p>Tiempo [mseg]</p> <p>Hora: 15:35:49</p> <p>Cursor periodico Delta: 125.0 mseg Frec.: 8 Hz</p>
Amplitud [μm]	35	

Código	M24A2	Curva Amplitud vs Tiempo
Frecuencia [Hz]	8	
Amplitud [µm]	36	
Código	M24A3	Curva Amplitud vs Tiempo
Frecuencia [Hz]	8	
Amplitud [µm]	43	
Código	M36A1	Curva Amplitud vs Tiempo
Frecuencia [Hz]	12	
Amplitud [µm]	60	
Código	M36A2	Curva Amplitud vs Tiempo
Frecuencia [Hz]	12	
Amplitud [µm]	93	

Código	M36A3	Curva Amplitud vs Tiempo
Frecuencia [Hz]	12	
Amplitud [µm]	140	
Código	M48A1	Curva Amplitud vs Tiempo
Frecuencia [Hz]	16	
Amplitud [µm]	110	
Código	M48A2	Curva Amplitud vs Tiempo
Frecuencia [Hz]	16	
Amplitud [µm]	130	
Código	M48A3	Curva Amplitud vs Tiempo
Frecuencia [Hz]	16	
Amplitud [µm]	175	

Fuente: (Propia).

3.4 Resultado del ensayo de tracción.

Se ha realizado el ensayo de tracción a tres probetas para cada código o prueba realizada, con la finalidad de generar un promedio entre los valores obtenidos. A continuación, la tabla 3.4 presenta los valores de resistencia máxima a la tracción y el promedio de elongación del material. Los valores marcados con (*) corresponden a las probetas que se fracturan fuera de la longitud de control, por tanto, han sido excluidos del cálculo.

Tabla 3.4. Resistencia a la tracción y porcentaje de elongación para cada prueba realizada.

Código	Frecuencia [Hz]	Resistencia a la tracción [Mpa]	Promedio de resistencia a la tracción [Mpa]	% elongación en 50 mm	Promedio de elongación [%]
M12A1	4	94.4	86.4	3.4	2,97
		89.7		2.5	
		75.1		3.0	
M12A2	4	111.5*	106.3	1.8*	2,75
		103.4		2.6	
		109.2		2.9	
M12A3	4	101.5	100.7	2.3	2,50
		99.1*		1.6*	
		99.9		2.7	
M24A1	8	95.9	98.07	3.8	3,87
		96.1		3.7	
		102.2		4.1	
M24A2	8	91.8	92.2	3.6	3,20
		95.7		3.9	
		89.0		2.1	
M24A3	8	104.2	97.2	3.7	3,13
		93.4		3.1	
		94.1		2.6	
M36A1	12	104.6	109.7	3.2	3,23
		105.7		3.0	
		118.7		3.5	
M36A2	12	118.4	118.4	3.7	3,70
		115.9*		2.3*	
		43.6*		0.8*	
M36A3	12	94.2	96.3	1.6	2,20
		100		4.0	
		94.6		1.0	
M48A1	16	101.1*	110.2	0.7*	0,90
		111.8		0.8	
		108.6		1.0	

Código	Frecuencia [Hz]	Resistencia a la tracción [Mpa]	Promedio de resistencia a la tracción [Mpa]	% elongación en 50 mm	Promedio de elongación [%]
M48A2	16	57.2	63.6	2.8	2,43
		74.2		1.7	
		59.3		2.8	
Estático	10	98.5	94.7	0.4	1,10
		100.6		1.0	
		84.9		1.9	

Fuente: (Propia).

La Figura 3.8 y 3.9 resumen los datos numéricos, se ha marcado con color naranja el resultado de la probeta fundida con el proceso estático y de color verde el resultado del proceso dinámico.

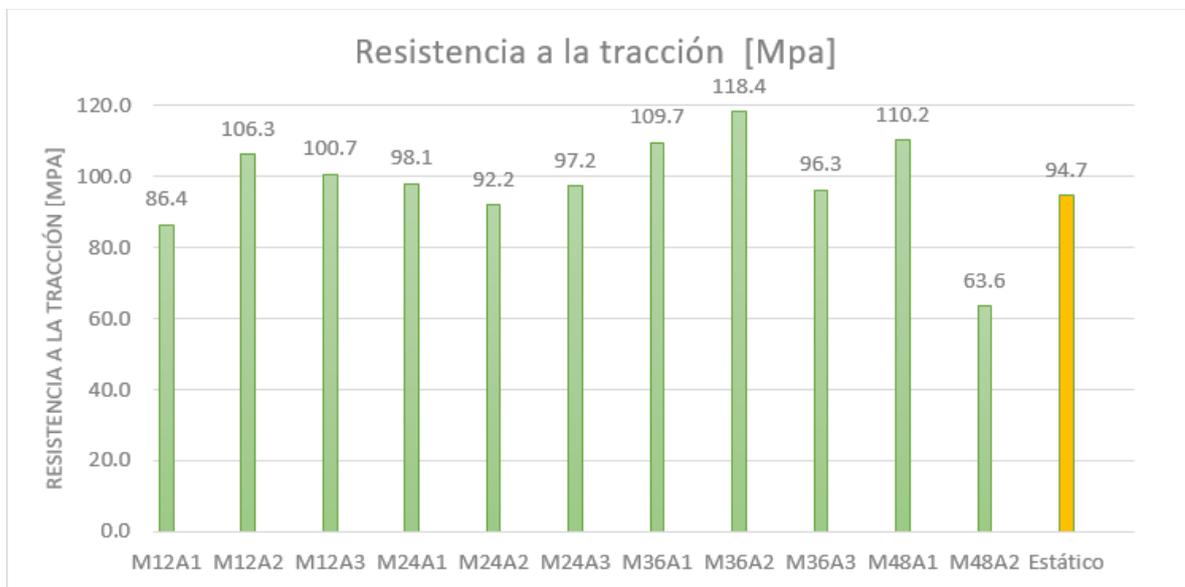


Figura 3.8. Resistencia a la tracción de cada probeta de prueba.
(Fuente: Propia).

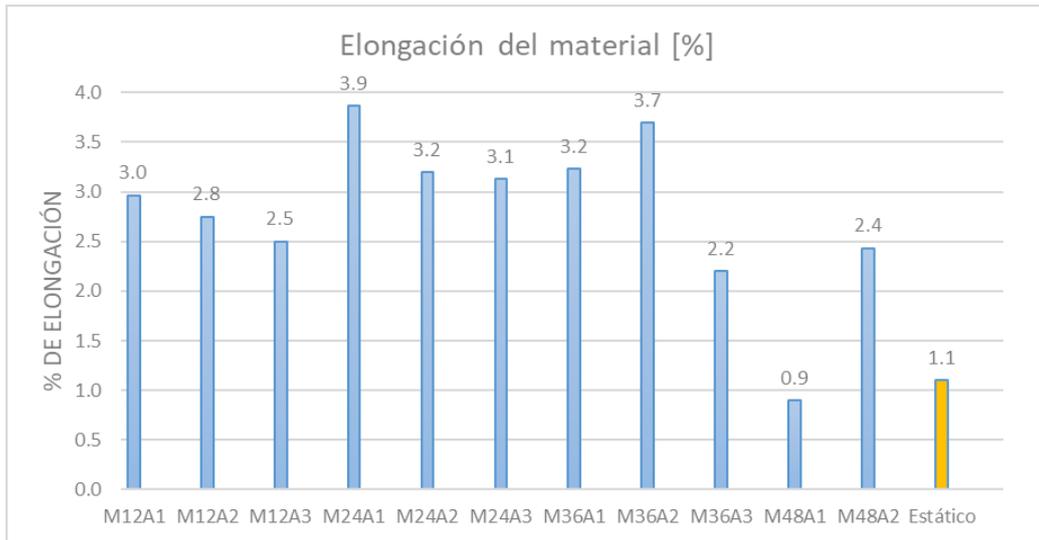


Figura 3.9. Porcentaje de elongación de cada probeta de prueba.
(Fuente: Propia).

Los gráficos de caja y bigotes 3.10 y 3.11 representan la distribución y dispersión de los valores de resistencia a la tracción y porcentaje de elongación señalando los valores máximos y mínimos.

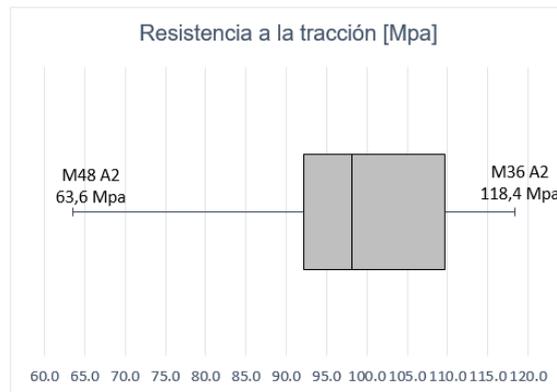


Figura 3.10 Diagrama caja bigotes de la resistencia a la tracción.
(Fuente: Propia).

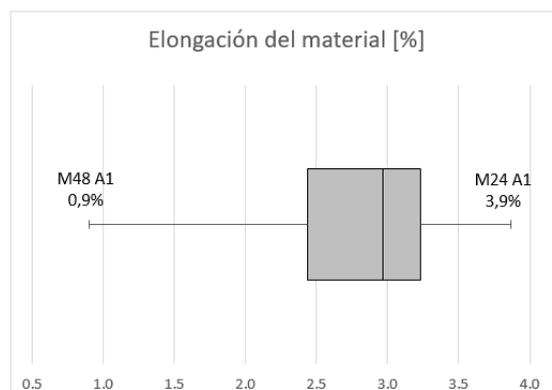


Figura 3.11 Diagrama caja bigotes del porcentaje de elongación del material.
(Fuente: Propia).

3.5 Resultado del ensayo de dureza.

Durante el ensayo de dureza se ha tomado 3 datos en diferentes puntos para generar un promedio, el indentador utilizado corresponde al tipo bola de 1/8 de pulgada con una carga de 60 Kp. Los resultados de dureza se presentan en la tabla 3.5

Tabla 3.5. Dureza del material en escala Rockwell H.

Código	Dureza [HRH]	Promedio de dureza [HRH]
ESTÁTICA	93	92.7
	90	
	95	
M12 A1	89	89.0
	86	
	92	
M12 A2	92	88.7
	86	
	88	
M12 A3	85	90.7
	93	
	94	
M24 A1	89	92.0
	94	
	93	
M24 A2	78	84.0
	88	
	86	
M24 A3	83	84.0
	83	
	86	
M36 A1	79	79.0
	80	
	78	
M36 A2	92	88.7
	90	
	84	
M36 A3	94	94.0
	96	
	92	
M48 A1	83	83.3
	86	
	81	

Código	Dureza [HRH]	Promedio de dureza [HRH]
M48 A2	81	79.3
	81	
	76	

Fuente: (Propia)

La Figura 3.12 resume los datos numéricos, se ha marcado con color naranja el resultado de la probeta fundida con el proceso estático y de color azul los resultados del proceso dinámico.

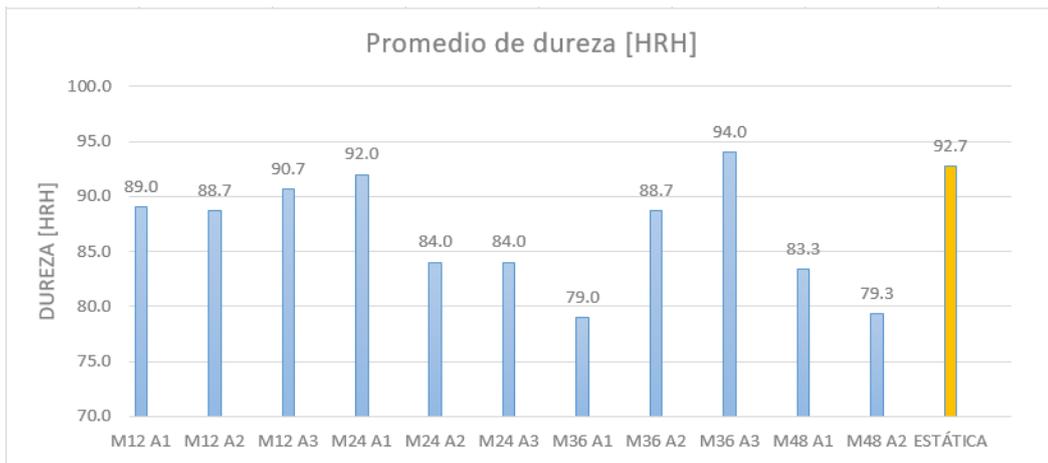


Figura 3.12. Dureza de cada probeta de prueba.
(Fuente: Propia).

El gráfico de caja y bigotes 3.13 representa representan la distribución y dispersión de los valores de dureza señalando los valores máximos y mínimos.

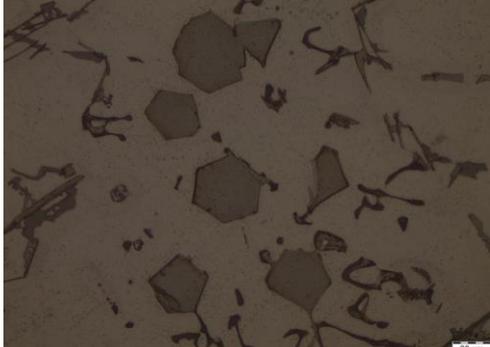


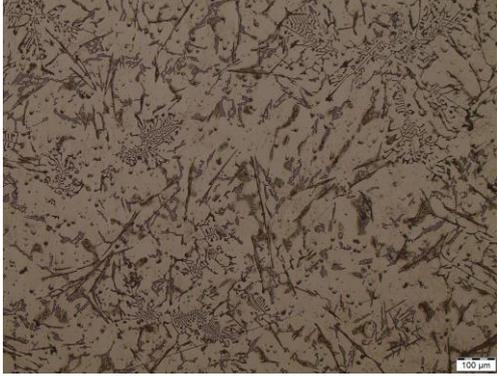
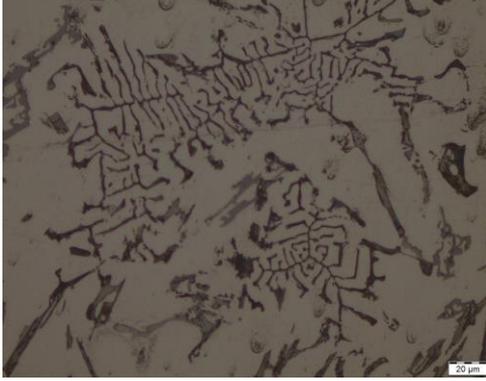
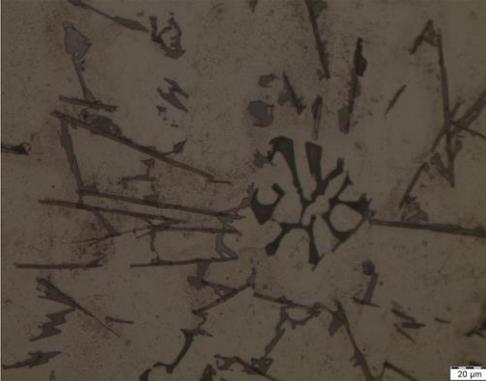
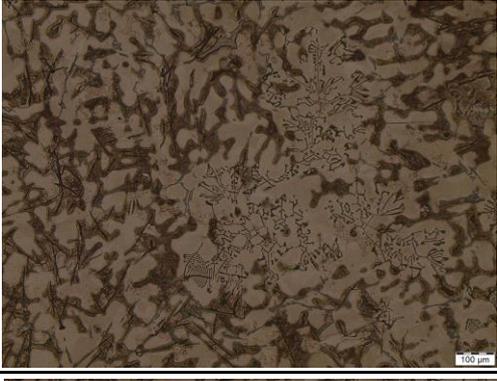
Figura 3.13 Diagrama caja bigotes de la dureza del material.
(Fuente: Propia).

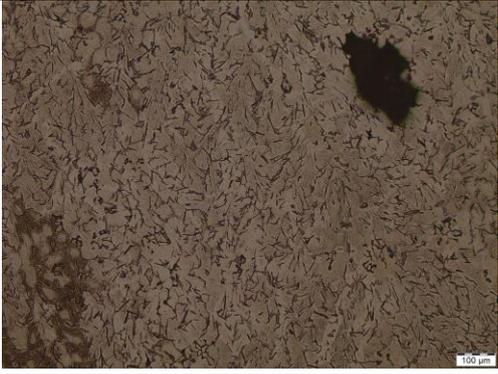
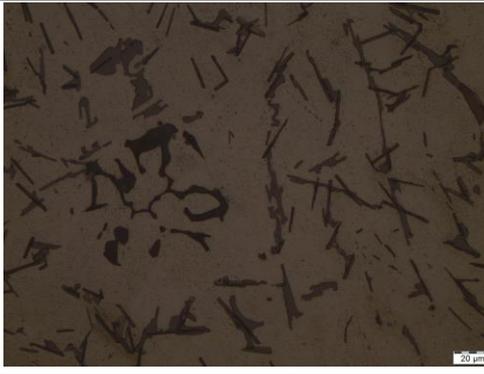
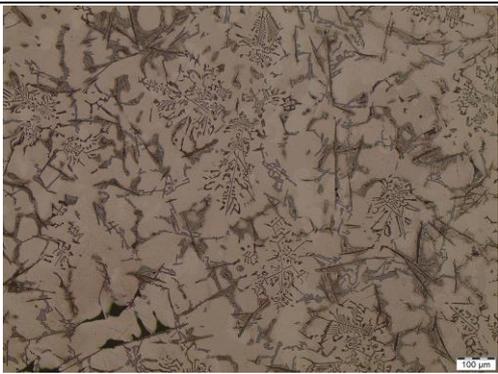
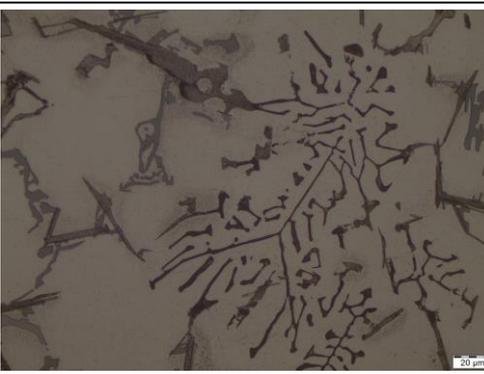
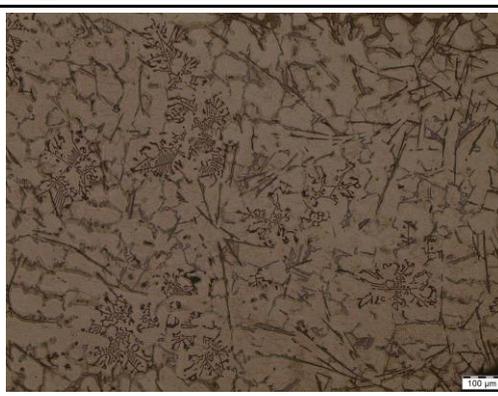
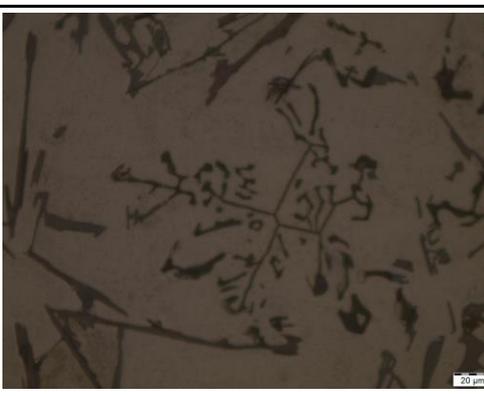
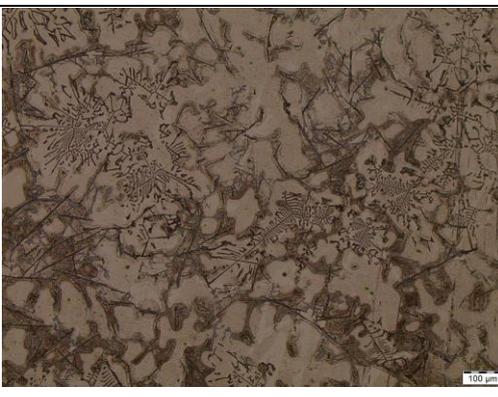
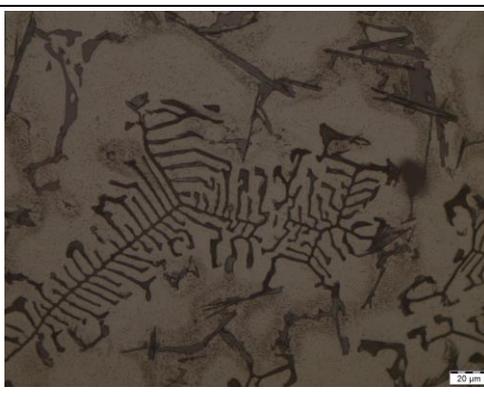
3.6 Resultado miroestructural.

La tabla 3.6 presenta las microestructuras correspondientes a cada muestra, se presenta las imágenes con un acercamiento de 10x y 50x.

Tabla 3.6. Microestructura de las probetas de prueba.

Código	Microestructura a 10x	Microestructura a 50x
Estática		
M12A1		
M12A2		
M12A3		

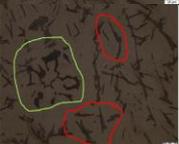
Código	Microestructura a 10x	Microestructura a 50x
M24A1		
M24A2		
M24A3		
M36A1		

Código	Microestructura a 10x	Microestructura a 50x
M36A2		
M36A3		
M48A1		
M48A2		

Fuente: (Propia).

3.7 Matriz comparativa.

Código	Frecuencia del sistema [Hz]	Amplitud del sistema [μm]	Resistencia a la tracción [Mpa]	Elongación del material [%]	Dureza [HRH]	Microestructura α intermetálico alfa β intermetálico beta
M12A1	4	5	86.40	2.97	89.0	
M12A2	4	7	106.30	2.75	88.7	
M12A3	4	9	100.70	2.50	90.7	
M24A1	8	35	98.07	2.50	92.0	
M24A2	8	36	92.20	3.87	84.0	
M24A3	8	43	97.20	3.20	84.0	

Código	Frecuencia del sistema [Hz]	Amplitud del sistema [μm]	Resistencia a la tracción [Mpa]	Elongación del material [%]	Dureza [HRH]	Microestructura α intermetálico alfa β intermetálico beta
M36A1	12	60	109.70	3.23	79.0	
M36A2	12	93	118.40 *	3.70	88.7	
M36A3	12	140	96.30	2.20	94.0	
M48A1	16	110	110.02	0.90	83.3	
M48A2	16	130	63.60	2.43	79.3	
Estático	0	0	94.70	1.10	92.7	

Fuente: (Propia).

3.8 Interpretación y análisis de resultados.

3.8.1 Análisis de la composición química del material.

El análisis microestructural de las probetas parte de la comparación de materiales similares químicamente, es decir materiales cuya composición química no presente variaciones significativas. Los elementos principales de la aleación AK5M son: aluminio, silicio y cobre. La Aleación AK5M posee un contenido de 5.5% de Si, 1.25% de Cu y 91.45% de Al [19]. De acuerdo a los resultados del ensayo de composición química detallados en la tabla 3.1 se destacará el valor de los tres elementos principales: Al, Si y Cu.

Todas las probetas en estudio poseen valores similares a la composición química teórica como se puede evidenciar en la tabla 3.7; las variaciones se encuentran en un rango 0.02% como mínimo y 1.36% máximo, por tanto, es factible la comparación entre las diferentes probetas.

Tabla 3.7. Composición química de elementos principales de la aleación AK5M de las probetas de prueba.

Elemento	M12A1		M24A1		M36A1		M48A1		M12A2		M24A2	
	%	$\Delta\%$ vs composición teórica										
Aluminio	91.4	0.020	90.6	0.890	90.1	1.360	90.5	1.000	90.9	0.530	90.6	0.900
Silicio	5.36	0.140	5.65	-0.150	5.79	-0.290	5.78	-0.280	5.59	-0.090	5.63	-0.130
Cobre	0.81	0.440	1.03	0.220	0.98	0.270	1.06	0.190	1.10	0.150	1.12	0.130

Elemento	M36A2		M48A2		M12A3		M24A3		M36A3		Estático	
	%	$\Delta\%$ vs composición teórica	%	$\Delta\%$ vs composición teórica								
Aluminio	91.1	0.380	90.7	0.750	91.3	0.170	90.5	0.980	90.4	1.060	90.6	0.810
Silicio	5.51	-0.010	5.4	0.100	5.51	-0.010	5.53	-0.030	5.77	-0.270	5.78	-0.280
Cobre	1.06	0.190	0.88	0.370	0.91	0.340	1.09	0.160	1.03	0.220	0.95	0.300

Fuente: (Propia).

3.8.2 Análisis de la inspección visual del material.

De acuerdo a la inspección visual realizada al material se pueden destacar los siguientes aspectos: el acabado superficial de las probetas fundidas no evidenció la presencia de defectos: poros o microrechupes en la superficie del material, por lo que se preveía que el material mostrará las mismas características internamente, sin embargo, al procesar las probetas, los cortes trasversales revelaron la presencia de múltiples microrechupes.

En la figura 3.11 se ha resaltado los microrechupes y se muestra la diferencia entre el acabado superficial de las probetas y la constitución interna de la misma.
En un análisis más amplio se pudo identificar que a mayor frecuencia y amplitud existe mayor presencia de microrechupes.

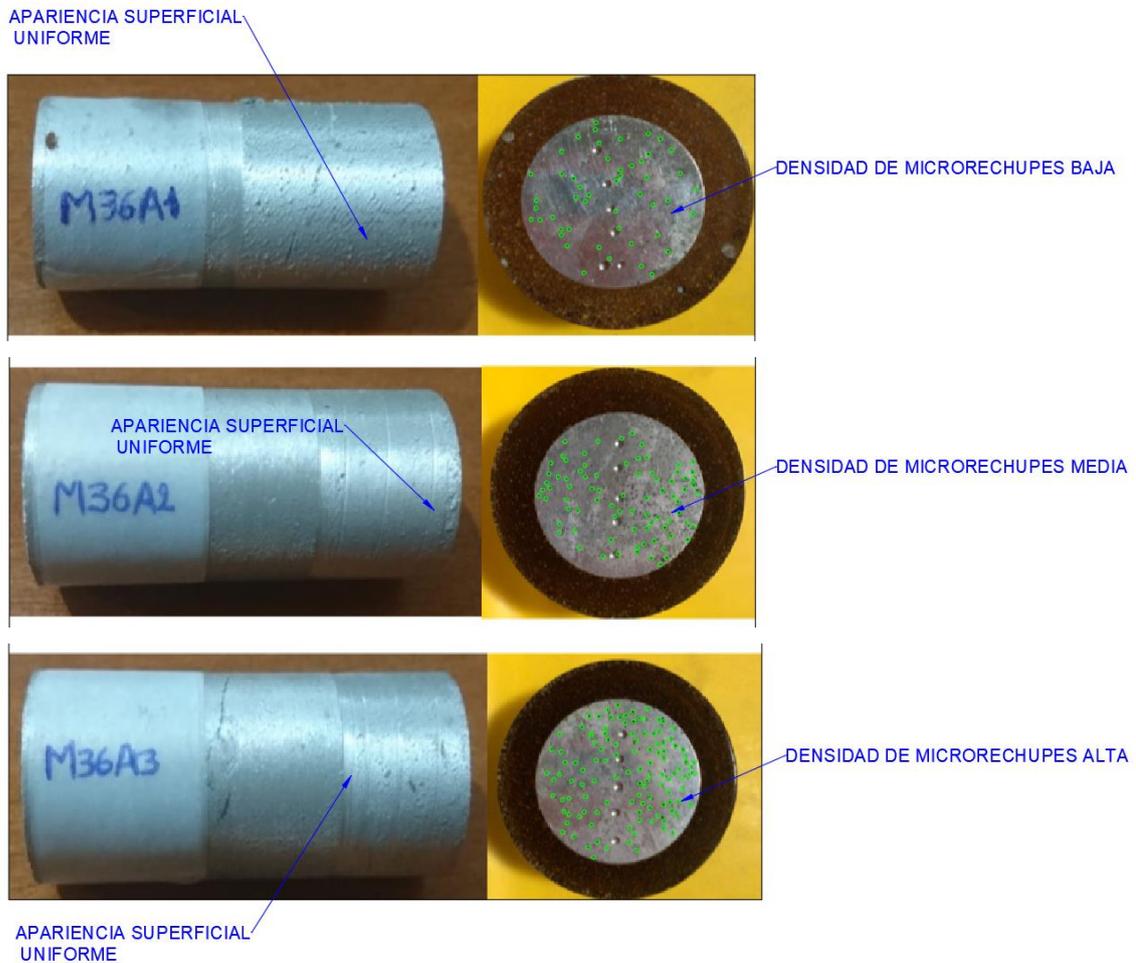


Figura 3.14 Comparación entre el acabado superficial y la estructura interna de las probetas M36A1, M36A2 y M36A3.
(Fuente: Propia).

En las imágenes de la microestructura se pudo analizar la geometría de estas discontinuidades, uno de los microrechupes se destaca en la figura 3.12 el cual presenta bordes irregulares, pero sin ángulos agudos, con una geometría muy uniforme, sin cambios de sección abruptos y sin concentradores de esfuerzos. En la figura 3.12 se realiza el borde del microrechupe y se puede apreciar con mayor nitidez la geometría suave.



Figura 3.15 Perfil destacado de un microrechupe.
(Fuente: Propia).

3.8.3 Análisis del ensayo microestructural.

La aleación AK5M o su análogo 355 debido a su composición química, se trata de una aleación hipoeutéctica la cual posee fases intermetálicas en la matriz de aluminio a causa de la agrupación de silicio; por medio del ensayo microestructural se obtuvo resultados semejantes a la figura 1.5 donde se presenta una microestructura con dos fases: la fase β que se produce debido a bajas tasas de enfriamiento y la fase α por tasas elevadas de enfriamiento.

La transición entre fases (β y α) se da lugar de acuerdo a la presencia de hierro el mismo que aumenta la presencia de la fase β y elementos como el manganeso y el cromo establecen las partículas en una estructura más refinada α , por lo tanto, las microestructuras de las probetas fundidas en estado dinámico presentan una combinación de fases intermetálicas α (en forma de escritura china) y β (en forma de aguja) alcanzando el refinamiento en la microestructura y cambiando el silicio para dar lugar a mejores propiedades mecánicas ya que la probeta fundida en estado estático presenta intermetálico β primario sin ninguna modificación del silicio como se muestra en la figura 3.13.

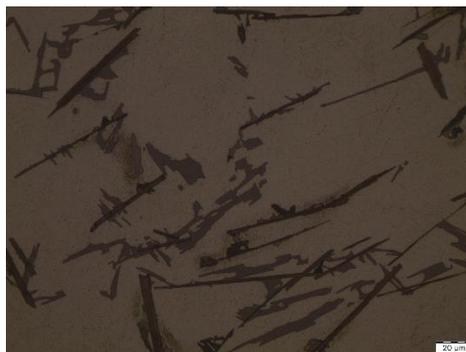


Figura 3.16 Probeta estática, silicio primario sin transformación microestructural.
(Fuente: Propia).

Se citará el análisis de la probeta M12A1 vs la probeta M48A2, es decir la de menor frecuencia y amplitud contra la de mayores valores. Ya se ha mencionado que las propiedades mecánicas se verán beneficiadas conforme exista un refinamiento microestructural donde el intermetálico alfa forme un gran porcentaje en la matriz de aluminio (en el apartado 3.8.4 se profundizará el análisis). La figura 3.14 presenta un ejemplo de la diferencia entre las probetas: M12A1 (4Hz, 5 μm) y M48A2 (16Hz, 130 μm), respecto al intermetálico. La saturación de la fase α es evidente mientras se ha aumentado los valores de frecuencia y amplitud, por lo que se puede destacar un refinamiento en la microestructura del material. Esta tendencia es visible para las demás probetas en estudio.

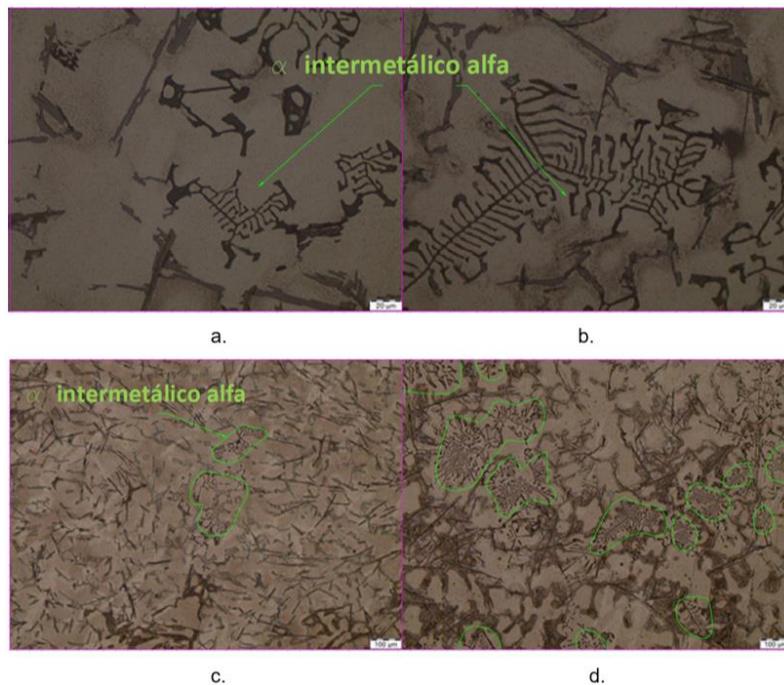


Figura 3.17 **a.** Saturación del intermetálico α en la probeta M12A1 (aumento 50x). **b.** Saturación del intermetálico α en la probeta M48A2 (aumento 50x). **c.** Saturación del intermetálico α en la probeta M12A1 (aumento 10x). **d.** Saturación del intermetálico α en la probeta M48A2 (aumento 50x).

(Fuente: Propia).

3.8.4 Análisis del ensayo de tracción.

La presencia de microrechupes en la constitución interna del material supone que este tendrá un comportamiento frágil frente a un esfuerzo de tensión, sin embargo, ya se ha señalado que las discontinuidades presentan bordes irregulares, pero sin ángulos agudos, con una geometría muy uniforme y sin presencia de concentradores de esfuerzos, por tanto, constituye una de las razones para no afectar la resistencia a la tracción del material.

Otra de las razones que se denota es la distribución homogénea de las discontinuidades las cuales forman una especie de malla en sentido transversal y longitudinal del material.

No existe una tendencia lineal respecto a los resultados de resistencia a la tracción o porcentaje de elongación en las probetas fundidas en estado dinámico respecto al incremento de frecuencia y amplitud, sin embargo, en general la resistencia a la tracción se incrementa con la vibración del material. La figura 3.15 describe la variación respecto a la resistencia a la tracción y la figura 3.16 describe la variación respecto al porcentaje de elongación del material.

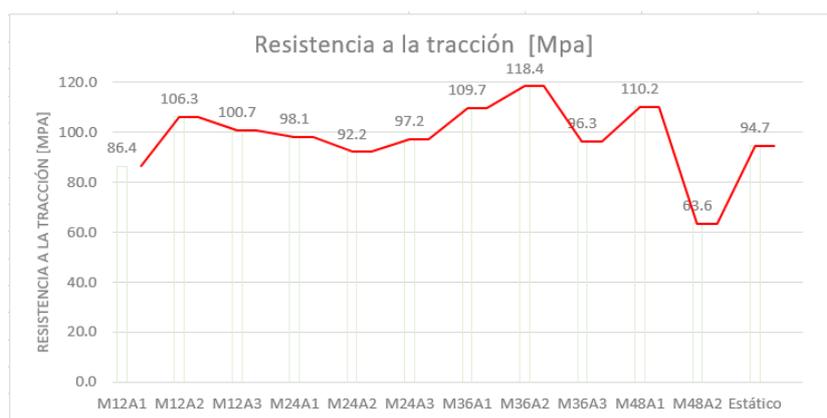


Figura 3.18 Línea de tendencia respecto a la resistencia a la tracción. (Fuente: Propia).



Figura 3.19 Línea de tendencia respecto al porcentaje de elongación del material. (Fuente: Propia).

La mayor cantidad de probetas fundidas en estado dinámico (8 de 11) poseen una resistencia a la tracción superior a la probeta fundida en estado estático y (10 de 11) probetas fundidas en estado dinámico poseen un porcentaje de elongación del material superior al fundido en estado estático.

En la figura 3.17 se ha destacado con una circunferencia los microrechupes de las probetas Estática, M36A1 y M48A1. La particularidad perceptible en la imagen es que pese a la falta de continuidad en el material la resistencia a la tracción no disminuye, sino al contrario aumenta. La cantidad de microrechupes cubre al menos el 75% de la superficie en la probeta M48A1 vs un 35% en la probeta M36A1 mientras que en la probeta estática la presencia de discontinuidades es mínima y la resistencia a la tracción es 110.02 MPa, 109.70 MPa y 86.40 MPa respectivamente. El análisis es congruente a que la distribución es prácticamente uniforme y por tanto se genera un matriz uniforme que tiene una adecuada resistencia.

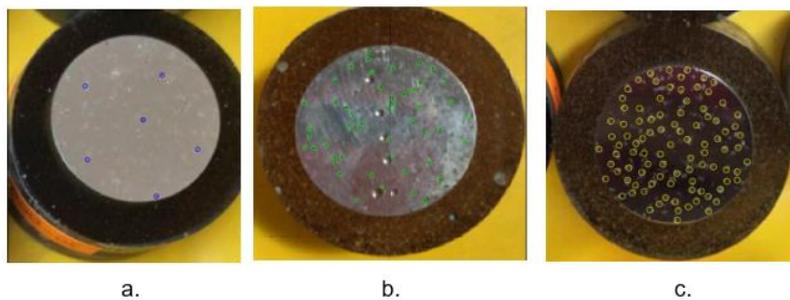


Figura 3.20 **a.** Probeta estática, presencia escasa de discontinuidades. **b.** Probeta M36A1 superficie porosa 35%. **c.** Probeta M48A1 superficie porosa 75%.
(Fuente: Propia).

3.8.5 Análisis del ensayo de dureza.

En concordancia con los dos ensayos mencionados anteriormente tampoco existe una tendencia lineal respecto a la dureza del material al incrementar las vibraciones, la figura 3.18 presenta la variación de los resultados.

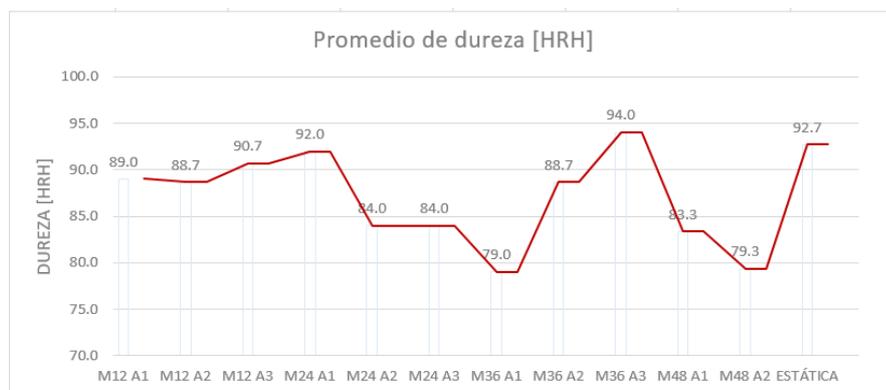


Figura 3.21 Línea de tendencia respecto a la dureza del material.
(Fuente: Propia).

En el apartado 2.2 para la selección de la aleación se describe que estudios ya elaborados por colado estático obtuvieron un valor de 76 HRH en una aleación muy cercana a la AK5M; en este análisis mediante el ensayo destructivo de dureza se obtienen resultados que superan dicho valor, teniendo un máximo de dureza en el código M36A3 con 94 HRH y un mínimo en la probeta M36A1 con 79 HRH. En las probetas fundidas en estado dinámico (10 de 11) el valor de dureza es inferior a la probeta fundida en estado estático. Los resultados son consecuentes al contacto entre el identador del durómetro con los microrechupes, por tanto, los resultados son inferiores en una superficie discontinua.

3.8.6 Interrelación entre los ensayos realizados.

Las propiedades de resistencia a la tracción y dureza deberían ser directamente proporcionales, sin embargo, para este caso en estudio no se cumple a cabalidad. La figura 3.19 presenta los resultados de resistencia a tracción vs dureza. Ambas líneas de tendencia deberían seguir la misma propensión, pero no es el caso, las diferencias pueden referir a lo ya mencionado; la coincidencia del identador con una discontinuidad en el material.

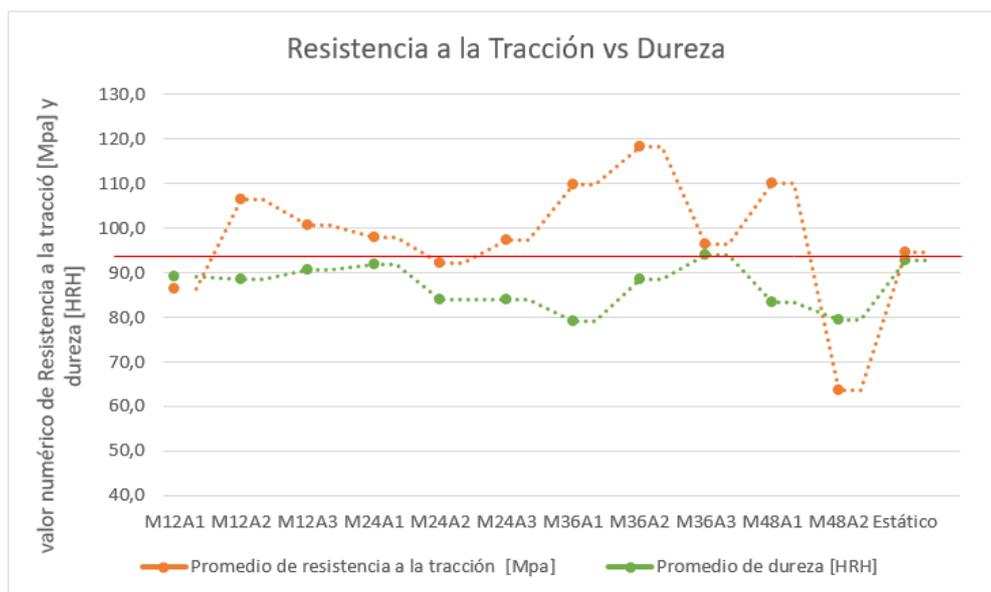


Figura 3.22. Comparación entre resistencia a la tracción y dureza. (Fuente: Propia).

Por mencionar un ejemplo puntual, los valores más bajos de resistencia a la tracción corresponden a las probetas: estática, M12A1 y M24A2. La probeta estática presenta en su microestructura silicio primario sin modificación alguna y las probetas M12A1 y M24A2

fundidas con valores bajos de frecuencia y amplitud, presentan escasa modificación en su microestructura con una leve presencia del intermetálico α como lo muestra la figura 3.20.

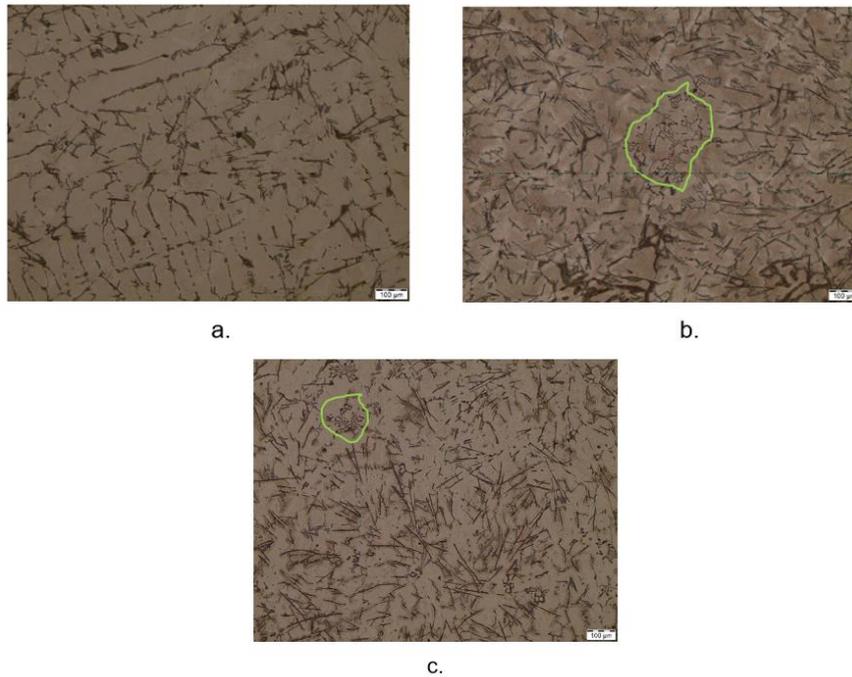


Figura 3.23 **a.** Microestructura de la probeta estática con silicio primario (aumento 10x). **b., c.** Microestructura probeta M12A1 y M24A2 con escasa formación de intermetálico α (aumento 10x). (Fuente: Propia).

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

Se ha caracterizado de forma comparativa la aleación de aluminio AK5M entre los procesos de colado estático y colado dinámico con variación frecuencia y amplitud en la mesa vibratoria obteniendo análisis positivos en cuanto a microestructura y resistencia a la tracción.

Los procesos de fundición de colado estático y dinámico fueron desarrollados de forma artesanal con alta participación de mano de obra y escaso control automático. El proceso de fundición dinámico de las probetas fue desarrollado controlando parámetros de temperatura, velocidad de colado, frecuencia de vibración del motor de la mesa vibratoria y discos excéntricos modificadores de la amplitud del sistema.

La aleación AK5M de aluminio fue seleccionada por su fácil fabricación conforme a la materia prima disponible en el mercado nacional, es hipoeutéctica con un porcentaje de silicio de hasta 5.5%, para el presente trabajo se elaboró los correspondientes estudios de carga para mantener una composición química muy similar a la teórica, los resultados tienen una variación mínima de 0.02% y máximo del 1.36%.

Durante la solidificación del material se observó que al variar amplitud y frecuencia de trabajo de la mesa vibratoria los canales de alimentación cambiaban de aspecto en la superficie, si las frecuencias y amplitudes son elevadas existe la presencia de segregación del material tal cual el registro fotográfico de la probeta M48A2 de la figura 3.2. A mayor frecuencia y amplitud el material presenta mayor cantidad de microrechupes en la probeta fundida, caso contrario, en rangos bajos de los parámetros ya mencionados.

El análisis visual permite apreciar que el acabado superficial de las probetas fundidas en colado dinámico no presume defectos internos por un buen acabado superficial del material, sin embargo, después de ser mecanizadas se evidencia múltiples microrechupes.

La aleación AK5M fundida en estado estático presenta propiedades mecánicas adecuadas de acuerdo a los ensayos destructivos y no destructivos realizados, pero en estado dinámico en general posee propiedades mecánicas superiores a excepción de la dureza.

Para la fundición dinámica de las probetas se han utilizado frecuencias de 4, 8, 12 y 16 Hz, estas frecuencias son bajas en relación a estudios previos que superan los 100 Hz, la fundición a frecuencias bajas ha permitido modificar la microestructura del material y cambiar la forma primaria del silicio a formas más complejas en forma de dendritas.

El análisis de la microestructura de un microrechupe permitió visualizar la presencia de bordes irregulares, pero sin ángulos agudos, con una geometría muy uniforme, sin cambios de sección abruptos y sin concentradores de esfuerzos.

La probeta M48A2 (16Hz, 130 μm) fue elaborada con valores de frecuencia y amplitud más altos la misma que presenta mayor saturación de fase α con respecto al intermetálico, por lo que se puede destacar una modificación importante en la microestructura del material.

El material fundido con valores bajos de frecuencia y amplitud, como es el caso de las probetas M12A1 (4Hz, 5 μm) y M24A1 (8Hz, 35 μm) presentan un desarrollo mínimo en su microestructura con una leve presencia del intermetálico α .

La presencia de microrechupes en las probetas fundidas en estado dinámico no disminuye la resistencia a la tracción, al contrario, existe un incremento respecto al valor de la probeta fundida en estado estático.

En la fundición de colado dinámico 8 de 11 probetas revelaron una resistencia a la tracción superior a la probeta fundida en estado estático. Para el caso de las probetas fundidas en estado dinámico, la resistencia a la tracción no es directamente proporcional a la dureza; se presentan valores bajos de dureza ya que el indentador tiene contacto con las discontinuidades, sin embargo, al estar distribuidos homogéneamente no afecta la resistencia a la tracción.

Las probetas fundidas en estado dinámico presentan un incremento en la propiedad mecánica resistencia a la tracción; conforme existe una modificación en la microestructura del material. Aquellas estructuras con una fase intermetálica α en forma de escritura china donde el silicio ha cambiado su forma primaria poseen mejores propiedades.

Las probetas de nomenclatura M48A3 que corresponden a una frecuencia de 16Hz y amplitud 175 μ m no fueron mecanizadas debido a que el colado se esparció fuera de la caja, consecuencia del movimiento brusco por parte de la mesa vibratoria a pesar de estar sujetadas mediante prensas para evitar dicha separación entre macho y hembra.

4.2 Recomendaciones

En futuras investigaciones se recomienda indagar la formación de microrechupes durante el proceso de fundición por colado dinámico y la razón para que estas discontinuidades no influyan negativamente en los resultados de la resistencia a la tracción.

Se recomienda trabajar con un molde permanente ya que la producción en arena conlleva una inversión considerable de tiempo.

Para futuros estudios se recomienda elaborar ensayos de macrodureza los mismos que permitirán medir el tamaño de grano y realizar un análisis más extenso del refinamiento microestructural.

Se debe tener en cuenta que existen dos variaciones de amplitud, una que es parte solo del sistema mesa vibratoria y otra variación que es del sistema mesa vibratoria- molde de fundición.

Para utilizar la mesa vibratoria que se encuentra en el laboratorio de fundición de la EPN en colado dinámico, evitar una frecuencia mayor a 16Hz y una amplitud del sistema mesa vibratoria mayor a 0.1cm ya que podrían impedir la obtención de la probeta fundida.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Proaño Sarauz, B. S., & Sánchez de la Cruz, J. S. Diseño y construcción de una mesa vibratoria para utilizarla en colado dinámico. Quito, Pichincha, Ecuador, 2014.
- [2] Titov, N., & Stepánov, Y. Tecnología del proceso de fundición. Moscú, 1981.
- [3] Sánchez Figueredo, R. Aumento en la competitividad; sostenibilidad y sustentabilidad de los fundidos metálicos por el método de vertido vibratorio. Cuba, 2012.
- [4] Abu, N., Khraisheh, M., Saito, K., y Male, A. Silicon morphology modification in the eutectic Al-Si alloy using mechanical mold vibration. Elsevier, 2004, pp. 109-117.
- [5] Zhong, Z., Zitian, F., Xuanpu, D., Bo, T., Di, P., y Jiqiang, L. Influence of mechanical vibration on the solidification of a lost foam cast 356 alloy. Wuhan 430074, 7, pp. 24-29.
- [6] Sánchez Figueredo, R. Influencia del vertido Vibratorio en la Resistencia a la tracción del hierro con Grafito Esferoidal. Holguín, Cuba, 2015.
- [7] Zolotarevsky, V., Belov, N., Glazoff, M. Casting aluminium alloys. Chapter one - Alloying Elements and Dopants: Phase Diagrams, Elsevier, 2007. pp 6.
- [8] Askeland, D. Ciencia e ingeniería de materiales: Vol 9. pp 370.
- [9] ASM Handbook. Metallography and Microstructure: Vol 9. United States of America: ASM International, 2004, pp. 1703.
- [10] Gruzleski, J., Closset, B., The Treatment of Liquid Aluminum-Silicon Alloys, AFS. 1990, pp 2.
- [11] Totten, G. E., Mackenzie, D.S. Handbook of Aluminum: Vol. I: Physical Metallurgy and Processes: Vol. I. CRC Press, 2003 pag 621-622
- [12] Kaufman. J, Rooy, E. Aluminum Alloy Castings, Properties, Processes, and Applications, pp 40.
- [13] Groover, M. P. Fundamentos de Manufactura Moderna: Materiales, Procesos y Sistemas. Pearson, 1997.
- [14] Fauria, A., Da Silva, M. Efecto de los ultrasonidos de potencia en el proceso de solidificación de la aleación A357. Barcelona, 2012.
- [15] Fundiciones Fumbarri Durango, 2013. [Online]. Available at: <http://www.fumbarri.com/wp-content/uploads/2013/01/fumbarri-rechupes-en-nodular.pdf>
- [16] Loizaga, A., Sertucha, J., y Suárez, R. Defectos metalúrgicos generados por la presencia de gases en el metal fundido, 2008, pp. 111-119.
- [17] Appold, H., Feiler, K., Reinhard, A., & Schmidt, P. Tecnología de los metales para profesiones técnico mecánicas. España, 2005.
- [18] Álvarez, R., Veloz, C. Caracterización de una aleación de latón obtenida por colado dinámico con variación de amplitud de la mesa vibratoria, Quito, 2019.

- [19] Zolotarevsky, V., Belov, N. Casting Aluminum Alloys. Amsterdam, 2007.
- [20] ASTM E8 / E8M-16ae1, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org
- [21] Rao, N. P. Manufacturing technology: Foundry, Forming and Welding. Volumen I, Cuarta. Nwe Delhi: McGraw Hill, 2013.
- [22] Goyos, L. Tecnología de fundición II. pp 61
- [23] Milkhalov. Diseño y cálculo del proceso de fundición manual en arena, Capítulo 3. pp 26-30
- [24] “Proceso de Fundición de Metales”, apuntes de clases, Facultad de Ingeniería Mecánica, Escuela Politécnica Nacional, 2019.
- [25] Palas, M. Reconocimiento de fases en aleaciones de aluminio en estado modelado. Tesis de pregrado en Ingeniería Mecánico-Eléctrica. Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Mecánico-Eléctrica. Piura, Perú, 2012.
- [26] Pilataxi, D., Quillupangui, C. Estudio y optimización del proceso de fundición de poleas en aluminio para la empresa Ecuapoleas S.A., Quito, 2018.

ANEXOS

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE MATERIALES
LABORATORIO DE FUNDICIÓN

INFORME TÉCNICO

Solicitado por: Ing. Fausto Hernán Oviedo Msc

Tipo de Trabajo: Espectrometría por chispa

Fecha: 28 de agosto del 2019

Realizado por: Ing. Oscar Sotomayor, Ing. Luis G. Huilca

Descripción: Ensayo de espectrometría por chispa en diez muestras

1. ANTECEDENTES.

Se recibe en el Laboratorio de Fundición de la Escuela Politécnica Nacional diez probetas sueltas.

Se solicita realizar el ensayo con la finalidad de determinar los componentes presentes en las muestras entregadas.

2. IDENTIFICACIÓN DE LAS PROBETAS.

Las probetas para el análisis correspondiente son identificadas como se muestra a continuación:

Nombre	Identificación de la probeta	Fotografía
Muestras de material metálico	Muestra M1	

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE MATERIALES
LABORATORIO DE FUNDICIÓN

Muestras de material metálico	Muestra M2	
	Muestra M3	
	Muestra M4	
	Muestra M5	
	Muestra M6	

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE MATERIALES
LABORATORIO DE FUNDICIÓN

Muestras de material metálico	Muestra M7	
	Muestra M8	
	Muestra M9	
	Muestra M10	

3. ANTECEDENTES TÉCNICOS

3.1. **Limpieza Superficial:** Según norma ASTM E1251 – 17a Standard Test Method for Analysis of Aluminum and Aluminum Alloys by Spark Atomic Emission Spectrometry



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

DEPARTAMENTO DE MATERIALES

LABORATORIO DE FUNDICIÓN

3.2. Método: Al 120 Al-Si

4. VALORES OBTENIDOS

El análisis de espectrometría por chispa se realiza empleando el espectrómetro marca BRUKER modelo Q2 ION. Para el análisis se toman 3 mediciones para pistones grandes, 2 para medianos y 1 medición para pistones pequeños, además de 1 medición para los dos componentes del block del motor respectivamente, finalmente se promediaron sus valores.

	M1	M2	M3	M4	M5
Elemento	Valor [%]	Valor [%]	Valor [%]	Valor [%]	Valor [%]
Silicio [Si]	14,43	14,41	12,78	13,85	13,92
Hierro [Fe]	0,804	1,265	1,009	0,505	0,57
Cobre [Cu]	1,119	1,252	1,435	1,91	1,369
Manganeso [Mn]	0,142	0,197	0,105	0,072	0,016
Magnesio [Mg]	2,096	2,167	1,887	1,493	1,037
Cromo [Cr]	0,074	0,083	0,084	0,066	0,006
Níquel [Ni]	1,289	2,566	1,812	1,408	1,167
Zinc [Zn]	0,154	0,08	0,108	0,052	0,018
Titanio [Ti]	0,087	0,038	0,036	0,065	0,028
Plomo [Pb]	0,024	0,0073	0,0066	0,035	---
Estaño [Sn]	0,282	0,174	0,19	0,178	0,068
Vanadio[V]	0,021	0,02	0,014	0,035	0,018
Circonio[Zr]	---	0,014	0,012	0,023	0,029
Cobalto[Co]	0,016	0,011	0,0091	0,025	0,0082
Calcio[Ca]	0,02	0,01	0,0066	0,0055	0,0025
Aluminio [Al]	79,43	77,71	80,51	80,26	81,74
Total	99,99	100,00	100,00	99,98	100,00



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE MATERIALES
LABORATORIO DE FUNDICIÓN

	M6	M7	M8	M9	M10
Elemento	Valor [%]	Valor [%]	Valor [%]	Valor [%]	Valor [%]
Silicio [Si]	13,47	15,03	15,94	12,53	9,006
Hierro [Fe]	0,892	0,644	0,547	0,92	0,7
Cobre [Cu]	1,468	1,422	2,247	2,286	2,697
Manganeso [Mn]	0,035	0,203	0,184	0,211	0,311
Magnesio [Mg]	1,703	1,584	1,639	0,179	0,215
Cromo [Cr]	0,013	0,061	0,062	0,028	0,027
Niquel [Ni]	1,345	1,207	1,064	0,077	0,048
Zinc [Zn]	0,072	0,107	0,094	0,716	0,262
Titanio [Ti]	0,026	0,056	0,074	0,041	0,039
Plomo [Pb]	---	0,016	0,045	0,069	0,024
Estaño [Sn]	0,105	0,017	0,061	0,022	0,013
Vanadio[V]	0,017	0,013	0,033	0,0098	0,014
Circonio[Zr]	0,028	0,0088	0,017	0,0085	0,0096
Cobalto[Co]	0,0081	0,0082	0,024	---	---
Calcio[Ca]	0,0031	0,0063	0,0059	0,0044	0,0033
Aluminio [Al]	80,82	79,62	77,95	82,9	86,63
Total	100,00	100,00	99,99	100,00	100,00

Ing. Luis G. Huilca

Técnico Responsable

Ing. Oscar Sotomayor Msc.
Jefe del Laboratorio de
Fundición.



Con la finalidad de mejorar nuestros servicios, solicitamos de la manera más comedida se llene la encuesta mediante la captura del código QR adjunto, agradecemos su colaboración

Bruker Analysis Report

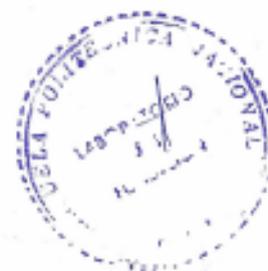


Sample: M1

Analysis Time: 23.08.2019 16:29:39

Method: Al120

	Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]
∅	14,43	0,804	1,119	0,142	2,096
	Cr [%]	Ni [%]	Zn [%]	Ti [%]	Pb [%]
∅	0,074	1,289	0,154	0,087	0,024
	Sn [%]	V [%]	Sr [%]	Zr [%]	Co [%]
∅	0,282	0,021	<0,0030	0,0088	0,016
	Ca [%]	Al [%]			
∅	0,020	79,43			



Bruker Analysis Report



Sample: M2

Analysis Time: 23.08.2019 16:41:10

Method: Al120

	Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]
∅	14,41	1,265	1,252	0,197	2,167
	Cr [%]	Ni [%]	Zn [%]	Ti [%]	Pb [%]
∅	0,083	2,566	0,080	0,038	0,0073
	Sn [%]	V [%]	Sr [%]	Zr [%]	Co [%]
∅	0,174	0,020	<0,0030	0,014	0,011
	Ca [%]	Al [%]			
∅	0,010	77,71			



Bruker Analysis Report



Sample: M3

Analysis Time: 23.08.2019 16:53:19

Method: Al120

	Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]
Ø	12,78	1,009	1,435	0,105	1,887
	Cr [%]	Ni [%]	Zn [%]	Ti [%]	Pb [%]
Ø	0,084	1,812	0,108	0,036	0,0066
	Sn [%]	V [%]	Sr [%]	Zr [%]	Co [%]
Ø	0,190	0,014	<0,0030	0,012	0,0091
	Ca [%]	Al [%]			
Ø	0,0066	80,51			



Bruker Analysis Report



Sample: M4

Analysis Time: 23.08.2019 17:09:10

Method: Al120

	Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]
∅	13,85	0,505	1,910	0,072	1,493
	Cr [%]	Ni [%]	Zn [%]	Ti [%]	Pb [%]
∅	0,066	1,408	0,052	0,065	0,035
	Sn [%]	V [%]	Sr [%]	Zr [%]	Co [%]
∅	0,178	0,035	0,0074	0,023	0,025
	Ca [%]	Al [%]			
∅	0,0055	80,26			



Bruker Analysis Report



Sample: M5

Analysis Time: 24.08.2019 11:15:01

Method: Al120

	Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]
Ø	13,92	0,570	1,369	0,016	1,037
	Cr [%]	Ni [%]	Zn [%]	Ti [%]	Pb [%]
Ø	0,0060	1,167	0,018	0,028	<0,0040
	Sn [%]	V [%]	Sr [%]	Zr [%]	Co [%]
Ø	0,068	0,018	<0,0030	0,029	0,0082
	Ca [%]	Al [%]			
Ø	0,0025	81,74			



Bruker Analysis Report



Sample: M6

Analysis Time: 24.08.2019 11:23:43

Method: Al120

	Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]
Ø	13,47	0,892	1,468	0,035	1,703
	Cr [%]	Ni [%]	Zn [%]	Ti [%]	Pb [%]
Ø	0,013	1,345	0,072	0,026	<0,0040
	Sn [%]	V [%]	Sr [%]	Zr [%]	Co [%]
Ø	0,105	0,017	<0,0030	0,028	0,0081
	Ca [%]	Al [%]			
Ø	0,0031	80,82			



Bruker Analysis Report



Sample: M7

Analysis Time: 24.08.2019 11:28:05

Method: Al120

	Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]
Ø	15,03	0,644	1,422	0,203	1,584
	Cr [%]	Ni [%]	Zn [%]	Ti [%]	Pb [%]
Ø	0,061	1,207	0,107	0,056	0,016
	Sn [%]	V [%]	Sr [%]	Zr [%]	Co [%]
Ø	0,017	0,013	<0,0030	0,0088	0,0082
	Ca [%]	Al [%]			
Ø	0,0063	79,62			



Bruker Analysis Report



Sample: MB

Analysis Time: 24.08.2019 11:37:50

Method: Al120

	Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]
Ø	15,94	0,547	2,247	0,184	1,639
	Cr [%]	Ni [%]	Zn [%]	Ti [%]	Pb [%]
Ø	0,062	1,064	0,094	0,074	0,045
	Sn [%]	V [%]	Sr [%]	Zr [%]	Co [%]
Ø	0,061	0,033	0,0084	0,017	0,024
	Ca [%]	Al [%]			
Ø	0,0059	77,95			



Bruker Analysis Report



Sample: M9

Analysis Time: 24.08.2019 11:45:08

Method: Al120

	Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]
∅	12,53	0,920	2,286	0,211	0,179
	Cr [%]	Ni [%]	Zn [%]	Ti [%]	Pb [%]
∅	0,028	0,077	0,716	0,041	0,069
	Sn [%]	V [%]	Sr [%]	Zr [%]	Co [%]
∅	0,022	0,0098	<0,0030	0,0085	<0,0030
	Ca [%]	Al [%]			
∅	0,0044	82,90			



Bruker Analysis Report



Sample: M10

Analysis Time: 27.08.2019 16:52:48

Method: Al120

	Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]
∅	9,006	0,700	2,697	0,311	0,215
	Cr [%]	Ni [%]	Zn [%]	Ti [%]	Pb [%]
∅	0,027	0,048	0,262	0,039	0,024
	Sn [%]	V [%]	Sr [%]	Zr [%]	Co [%]
∅	0,013	0,014	<0,0030	0,0096	<0,0030
	Ca [%]	Al [%]			
∅	0,0033	86,63			



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE MATERIALES
LABORATORIO DE FUNDICIÓN

INFORME TÉCNICO

Solicitado por: Ing. Fausto Oviedo Msc

Tipo de Trabajo: Espectrometría por chispa

Fecha: 21 de octubre del 2019

Realizado por: Ing. Oscar Sotomayor, Ing. Luis G. Huilca

Descripción: Ensayo de espectrometría por chispa en tres probetas

1. ANTECEDENTES.

Se recibe en el Laboratorio de Fundición de la Escuela Politécnica Nacional tres probetas sueltas.

Se solicita realizar el ensayo con la finalidad de determinar los componentes presentes en las muestras entregadas.

2. IDENTIFICACIÓN DE LAS PROBETAS.

Las probetas para el análisis correspondiente son identificadas como se muestra a continuación:

Nombre	Identificación de la probeta	Fotografía
Muestras de material metálico	Muestra M1	

Muestras de material metálico	Muestra M2'	
	Muestra M3'	

3. ANTECEDENTES TÉCNICOS

3.1. **Limpieza Superficial:** Según norma ASTM E1251 – 17a Standard Test Method for Analysis of Aluminum and Aluminum Alloys by Spark Atomic Emission Spectrometry

3.2. **Método:** Al 120 Al-Si

4. VALORES OBTENIDOS

El análisis de espectrometría por chispa se realiza empleando el espectrómetro marca BRUKER modelo Q2 ION. Para el análisis se toman 3 mediciones por muestra promediando su valor.

	M1'	M2'	M3'
Elemento	Valor [%]	Valor [%]	Valor [%]
Silicio [Si]	5,201	5,669	5,968
Hierro [Fe]	1,696	1,280	2,162
Cobre [Cu]	1,379	1,545	1,404
Manganeso [Mn]	0,140	0,097	0,137
Magnesio [Mg]	0,145	0,149	0,412
Cromo [Cr]	0,066	0,041	0,062
Niquel [Ni]	0,258	0,348	0,391
Zinc [Zn]	0,168	0,174	0,158
Titanio [Ti]	0,022	0,020	0,026
Plomo [Pb]	0,0068	0,0094	0,010
Vanadio[V]	0,013	0,0099	0,015
Calcio[Ca]	0,0034	0,0047	0,013
Aluminio [Al]	90,89	90,63	89,22
Total	99,99	99,98	99,98





Ing. Luis G. Huilca

Técnico Responsable



Ing. Oscar E. Sotomayor Msc.

**Jefe del Laboratorio de
Fundición.**



Con la finalidad de mejorar nuestros servicios, solicitamos de la manera más comedida se llene la encuesta mediante la captura del código QR adjunto, agradecemos su colaboración

Bruker Analysis Report



Sample: M1

Analysis Time: 18.10.2019 14:48:00

Method: Al120

	Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]
∅	5,201	1,696	1,379	0,140	0,145
	Cr [%]	Ni [%]	Zn [%]	Ti [%]	Pb [%]
∅	0,066	0,258	0,166	0,022	0,0068
	Sn [%]	V [%]	Sr [%]	Zr [%]	Co [%]
∅	<0,0100	0,013	<0,0030	0,0047	0,0041
	Ca [%]	Al [%]			
∅	0,0034	90,89			

Bruker Analysis Report



Sample: M2

Analysis Time: 18.10.2019 15:04:09

Method: Al120

	Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]
Ø	5,669	1,280	1,545	0,097	0,149
	Cr [%]	Ni [%]	Zn [%]	Ti [%]	Pb [%]
Ø	0,041	0,348	0,174	0,020	0,0094
	Sn [%]	V [%]	Sr [%]	Zr [%]	Co [%]
Ø	<0,0100	0,0099	<0,0030	0,0053	0,0047
	Ca [%]	Al [%]			
Ø	0,0047	90,63			

Bruker Analysis Report



Sample: M3

Analysis Time: 18.10.2019 15:30:31

Method: Al120

	Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]
∅	5,968	2,162	1,404	0,137	0,412
	Cr [%]	Ni [%]	Zn [%]	Ti [%]	Pb [%]
∅	0,062	0,391	0,158	0,026	0,010
	Sn [%]	V [%]	Sr [%]	Zr [%]	Co [%]
∅	<0,0100	0,015	<0,0030	0,0055	0,0080
	Ca [%]	Al [%]			
∅	0,013	89,22			

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE MATERIALES
LABORATORIO DE FUNDICIÓN

INFORME TÉCNICO

Solicitado por: Ing. Fausto Oviedo Msc.

Tipo de Trabajo: Espectrometría por chispa

Fecha: 07 de febrero del 2020

Realizado por: Ing. Oscar Sotomayor, Ing. Luis G. Huilca

Descripción: Ensayo de espectrometría por chispa en tres probetas

1. ANTECEDENTES.

Se recibe en el Laboratorio de Fundición de la Escuela Politécnica Nacional doce probetas sueltas.

Se solicita realizar el ensayo con la finalidad de determinar los componentes presentes en las muestras entregadas.

2. IDENTIFICACIÓN DE LAS PROBETAS.

Las probetas para el análisis correspondiente son identificadas como se muestra a continuación:

Nombre	Identificación de la probeta	Fotografía
Muestras de material metálico	A1 M12	

Muestras de material metálico	A1-M24	
	A1-M36	
	A1-M48	
	A2-M12	
	A2-M24	
	A2-M36	



X

Muestras de material metálico	A2-M48	
	A3-M12	
	A3-M24	
	A3-M36	
	Estático	

3. ANTECEDENTES TÉCNICOS

3.1. **Limpieza Superficial:** Según norma ASTM E1251 – 17a Standard Test Method for Analysis of Aluminum and Aluminum Alloys by Spark Atomic Emission Spectrometry

3.2. **Método:** Al 120 Al-Si



4. VALORES OBTENIDOS

El análisis de espectrometría por chispa se realiza empleando el espectrómetro marca BRUKER modelo Q2 ION. Para el análisis se toman 2 mediciones por muestra promediando su valor.

	A1-M12	A1-M24	A1-M36	A1-M48	A2-M12	A2-M24
Elemento	Valor [%]					
Silicio [Si]	5,363	5,659	5,795	5,781	5,597	5,632
Hierro [Fe]	1,722	2,010	2,301	1,902	1,679	1,926
Cobre [Cu]	0,812	1,031	0,987	1,062	1,101	1,129
Manganeso [Mn]	0,053	0,088	0,101	0,083	0,056	0,101
Magnesio [Mg]	0,089	0,081	0,101	0,100	0,082	0,081
Cromo [Cr]	0,020	0,033	0,044	0,033	0,020	0,041
Níquel [Ni]	0,328	0,346	0,389	0,396	0,361	0,340
Zinc [Zn]	0,158	0,151	0,156	0,160	0,143	0,167
Titanio [Ti]	0,013	0,016	0,017	0,015	0,013	0,015
Aluminio [Al]	91,43	90,56	90,09	90,45	90,92	90,55
Total	99,99	99,98	99,98	99,98	99,97	99,98

	A2-M36	A2-M48	A3-M12	A3-M24	A3-M36	ESTATICO
Elemento	Valor [%]					
Silicio [Si]	5,517	5,406	5,512	5,536	5,778	5,784
Hierro [Fe]	1,626	2,236	1,670	2,122	2,016	1,721
Cobre [Cu]	1,063	0,888	0,914	1,091	1,035	0,957
Manganeso [Mn]	0,055	0,104	0,055	0,118	0,073	0,080
Magnesio [Mg]	0,091	0,095	0,083	0,065	0,089	0,131
Cromo [Cr]	0,020	0,046	0,018	0,052	0,030	0,038
Níquel [Ni]	0,368	0,333	0,301	0,350	0,388	0,494
Zinc [Zn]	0,154	0,154	0,124	0,168	0,164	0,118
Titanio [Ti]	0,013	0,017	0,017	0,014	0,014	0,016
Aluminio [Al]	91,07	90,70	91,28	90,47	90,39	90,64
Total	99,98	99,98	99,97	99,99	99,98	99,98





Ing. Luis G. Hulica

Técnico Responsable



Ing. Oscar Sotomayor Msc.

**Jefe del Laboratorio de
Fundación.**



Con la finalidad de mejorar nuestros servicios, solicitamos de la manera más comedida se llene la encuesta mediante la captura del código QR adjunto, agradecemos su colaboración.

Bruker Analysis Report



Sample: A1-M12

Analysis Time: 03.02.2020 11:50:04

Method: Al120

	Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]
∅	5,363	1,722	0,812	0,053	0,089
	Cr [%]	Ni [%]	Zn [%]	Ti [%]	Pb [%]
∅	0,020	0,328	0,158	0,013	<0,0040
	Sn [%]	V [%]	Sr [%]	Zr [%]	Co [%]
∅	<0,0100	0,0061	<0,0030	0,0029	<0,0030
	Ca [%]	Al [%]			
∅	0,0070	91,43			



X

Bruker Analysis Report



Sample: A1-M24

Analysis Time: 03.02.2020 12:14:32

Method: Al120

	Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]
∅	5,659	2,010	1,031	0,088	0,081
	Cr [%]	Ni [%]	Zn [%]	Ti [%]	Pb [%]
∅	0,033	0,346	0,151	0,018	<0,0040
	Sn [%]	V [%]	Sr [%]	Zr [%]	Co [%]
∅	<0,0100	0,0084	<0,0030	0,0039	<0,0030
	Ca [%]	Al [%]			
∅	0,0017	90,56			



A handwritten signature in blue ink, consisting of a stylized, cursive-like mark.

Bruker Analysis Report



Sample: A1-M36

Analysis Time: 03.02.2020 11:23:22

Method: Al120

	Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]
∅	5,785	~2,301	0,987	0,101	0,101
	Cr [%]	Ni [%]	Zn [%]	Ti [%]	Pb [%]
∅	0,044	0,389	0,156	0,017	<0,0040
	Sn [%]	V [%]	Sr [%]	Zr [%]	Co [%]
∅	<0,0100	0,0084	<0,0030	0,0038	<0,0030
	Ca [%]	Al [%]			
∅	0,0027	90,09			



Bruker Analysis Report



Sample: A1-M48

Analysis Time: 03.02.2020 11:59:53

Method: Al120

	Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]
∅	5,781	1,902	1,062	0,083	0,100
	Cr [%]	Ni [%]	Zn [%]	Ti [%]	Pb [%]
∅	0,033	0,396	0,160	0,015	<0,0040
	Sn [%]	V [%]	Sr [%]	Zr [%]	Co [%]
∅	<0,0100	0,0077	<0,0030	0,0041	<0,0030
	Ca [%]	Al [%]			
∅	0,0026	90,45			



Bruker Analysis Report



Sample: A2-M12

Analysis Time: 03.02.2020 11:20:55

Method: Al120

	Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]
Ø	5,597	1,679	1,101	0,056	0,082
	Cr [%]	Ni [%]	Zn [%]	Ti [%]	Pb [%]
Ø	0,020	0,361	0,143	0,013	0,0043
	Sn [%]	V [%]	Sr [%]	Zr [%]	Co [%]
Ø	<0,0100	0,0073	<0,0030	0,0044	<0,0030
	Ca [%]	Al [%]			
Ø	<0,0010	90,92			



Bruker Analysis Report



Sample: A2-M24

Analysis Time: 03.02.2020 12:19:58

Method: Al120

	Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]
∅	5,632	1,926	1,129	0,101	0,081
	Cr [%]	Ni [%]	Zn [%]	Ti [%]	Pb [%]
∅	0,041	0,340	0,167	0,015	<0,0040
	Sn [%]	V [%]	Sr [%]	Zr [%]	Co [%]
∅	<0,0100	0,0090	<0,0030	0,0039	<0,0030
	Ca [%]	Al [%]			
∅	0,0017	90,55			



Bruker Analysis Report



Sample: A2-M36

Analysis Time: 03.02.2020 11:39:17

Method: Al120

	Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]
∅	5,517	1,626	1,063	0,055	0,091
	Cr [%]	Ni [%]	Zn [%]	Ti [%]	Pb [%]
∅	0,020	0,368	0,154	0,013	0,0043
	Sn [%]	V [%]	Sr [%]	Zr [%]	Co [%]
∅	<0,0100	0,0073	<0,0030	0,0044	<0,0030
	Ca [%]	Al [%]			
∅	<0,0010	91,07			



Bruker Analysis Report



Sample: A2-M48

Analysis Time: 03.02.2020 12:01:53

Method: Al120

	Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]
∅	5,406	~2,236	0,888	0,104	0,095
	Cr [%]	Ni [%]	Zn [%]	Ti [%]	Pb [%]
∅	0,046	0,333	0,154	0,017	<0,0040
	Sn [%]	V [%]	Sr [%]	Zr [%]	Co [%]
∅	≤0,0100	0,0095	≤0,0030	0,0038	≤0,0030
	Ca [%]	Al [%]			
∅	0,0019	90,70			



Bruker Analysis Report



Sample: A3-M12

Analysis Time: 03.02.2020 10:04:28

Method: Al120

	Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]
∅	5,512	1,670	0,914	0,055	0,083
	Cr [%]	Ni [%]	Zn [%]	Ti [%]	Pb [%]
∅	0,018	0,301	0,124	0,017	<0,0040
	Sn [%]	V [%]	Sr [%]	Zr [%]	Co [%]
∅	<0,0100	0,010	<0,0030	0,0042	<0,0030
	Ca [%]	Al [%]			
∅	0,0042	91,28			



Bruker Analysis Report



Sample: A3-M24

Analysis Time: 03.02.2020 12:24:12

Method: Al120

	Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]
∅	5,536	2,122	1,091	0,118	0,065
	Cr [%]	Ni [%]	Zn [%]	Ti [%]	Pb [%]
∅	0,062	0,350	0,168	0,014	<0,0040
	Sn [%]	V [%]	Sr [%]	Zr [%]	Co [%]
∅	<0,0100	0,0085	<0,0030	0,0036	<0,0030
	Ca [%]	Al [%]			
∅	0,0022	90,47			



Bruker Analysis Report



Sample: A3-M36

Analysis Time: 03.02.2020 11:47:10

Method: Al120

	Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]
∅	5,778	2,016	1,035	0,073	0,089
	Cr [%]	Ni [%]	Zn [%]	Ti [%]	Pb [%]
∅	0,030	0,388	0,164	0,014	<0,0040
	Sn [%]	V [%]	Sr [%]	Zr [%]	Co [%]
∅	<0,0100	0,0089	<0,0030	0,0046	<0,0030
	Ca [%]	Al [%]			
∅	0,0013	90,39			



Bruker Analysis Report



Sample: M-Estatico

Analysis Time: 03.02.2020 12:07:40

Method: Al120

	Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]
Ø	5,784	1,721	0,957	0,080	0,131
	Cr [%]	Ni [%]	Zn [%]	Ti [%]	Pb [%]
Ø	0,038	0,494	0,118	0,016	<0,0040
	Sn [%]	V [%]	Sr [%]	Zr [%]	Co [%]
Ø	<0,0100	0,0088	<0,0030	0,0043	<0,0030
	Ca [%]	Al [%]			
Ø	0,0033	90,64			





ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
MECÁNICA



LABORATORIO DE ANÁLISIS
DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES

F01-PE-LAEV-01 Rev.00

INFORME

LAEV – M20.018 Rev.01

Quito, 5 de febrero de 2020

Solicitado por: M.Sc. Fausto Oviedo
Persona de contacto: Ana Mendoza, Mishel Oña
Teléfono: 0992766738
Correo: mishell.ona@epn.edu.ec
Fecha de recepción: 30/01/2020
Fecha de ejecución: 04/02/2020

ORDEN DE TRABAJO Nº: DM-OTI0009-2020

1. **MUESTRAS:** Treinta y seis (36) probetas de fundición de aluminio para ensayo de tracción.

2. GENERALIDADES E IDENTIFICACIÓN:

La siguiente descripción fue proporcionada por el cliente:

Título de la tesis: CARACTERIZACIÓN COMPARATIVA DE UNA ALEACIÓN DE ALUMINIO ENTRE LOS PROCESOS DE COLADO ESTÁTICO Y COLADO DINÁMICO CON VARIACIÓN DE FRECUENCIA Y AMPLITUD EN LA MESA VIBRADORA.

En la tabla 1 se muestra la identificación de las muestras a ser ensayadas:

Tabla 1. Identificación de las muestras.

Grupo (información proporcionada por el cliente)	Id. del LAEV
M12 A3 (T1-T3)	M20.018.01 – M20.018.03
M12 A1 (T4-T6)	M20.018.04 – M20.018.06
M12 A2 (T7-T9)	M20.018.07 – M20.018.09
M36 A3 (T10-T12)	M20.018.10 – M20.018.12
M36 A1 (T13-T15)	M20.018.13 – M20.018.15
M36 A2 (T16-T18)	M20.018.16 – M20.018.18
M24 A3 (T19-T21)	M20.018.19 – M20.018.21
M24 A2 (T22-T24)	M20.018.22 – M20.018.24
M48 A2 (T25-T27)	M20.018.25 – M20.018.27
M48 A1 (T28-T30)	M20.018.28 – M20.018.30
Estática (T31-T33)	M20.018.30 – M20.018.33
M24 A1 (T34-T36)	M20.018.34 – M20.018.36



LAEV – M20.018 Rev.01

Dirección: Av. Mena Caamaño e Isabel la Católica Esquina (Escuela Politécnica Nacional)
Teléfono: 022976300 ext. 3715, 3716
Correo: laev@epn.edu.ec



3. CONDICIONES AMBIENTALES:

Temperatura: $25,0 \pm 2,6^{\circ}\text{C}$

Humedad relativa: $41,9 \pm 6,9\%$

4. ENSAYO DE TRACCION

En la tabla 2 se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de tracción.

Tabla 2. Resistencia a la tracción.

Id.	Diámetro promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción		% elongación en 50 mm
	mm	lbf	N	ksi	MPa	
M20.018.01	12,55	2 823	12 555	14,7	101,5	2,3
M20.018.02	12,54	2 751	12 235	14,4	99,1	1,6*
M20.018.03	12,57	2 787	12 395	14,5	99,9	2,7
M20.018.04	12,57	2 633	11 713	13,7	94,4	3,4
M20.018.05	12,59	2 512	11 173	13,0	89,7	2,5
M20.018.06	12,57	2 095	9 318	10,9	75,1	3,0
M20.018.07	12,57	3 111	13 836	16,2	111,5	1,8*
M20.018.08	12,57	2 885	12 833	15,0	103,4	2,6
M20.018.09	12,63	3 075	13 677	15,8	109,2	2,9
M20.018.10	12,58	2 632	11 706	13,7	94,2	1,6
M20.018.11	12,55	2 781	12 369	14,5	100,0	4,0
M20.018.12	12,54	2 627	11 685	13,7	94,6	1,0
M20.018.13	12,54	2 904	12 918	15,2	104,6	3,2
M20.018.14	12,55	2 939	13 073	15,3	105,7	3,0
M20.018.15	12,52	3 285	14 612	17,2	118,7	3,5
M20.018.16	12,59	3 315	14 746	17,2	118,4	3,7
M20.018.17	12,67	3 285	14 611	16,8	115,9	2,3*
M20.018.18	12,61	1 225	5 448	6,3	43,6	0,8*
M20.018.19	12,54	2 894	12 875	15,1	104,2	3,7
M20.018.20	12,54	2 608	11 602	13,6	93,9	3,1
M20.018.21	12,59	2 634	11 718	13,7	94,1	2,6
M20.018.22	12,54	2 550	11 342	13,3	91,8	3,6
M20.018.23	12,61	2 687	11 952	13,9	95,7	3,9
M20.018.24	12,63	2 508	11 157	12,9	89,0	2,1
M20.018.25	12,53	1 586	7 053	8,3	57,2	2,8
M20.018.26	12,56	2 066	9 188	10,8	74,2	1,7
M20.018.27	12,61	1 665	7 408	8,6	59,3	2,8
M20.018.28	12,53	2 802	12 465	14,7	101,1	0,7*
M20.018.29	12,55	3 108	13 824	16,2	111,8	0,8
M20.018.30	12,53	3 009	13 385	15,7	108,6	1,0
M20.018.31	12,53	2 730	12 143	14,3	98,5	0,4
M20.018.32	12,53	2 789	12 407	14,6	100,6	1,0
M20.018.33	12,53	2 354	10 470	12,3	84,9	1,0



LAEV - M20.018 Rev.01

Dirección: Av. Mena Caamaño e Isabel la Católica Esquina (Escuela Politécnica Nacional)

Teléfono: 022976300 ext. 3715, 3716

Correo: laev@epn.edu.ec

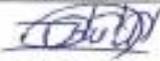


Tabla 2. Resistencia a la tracción (continuación).

Id.	Diámetro promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción		% elongación en 50 mm
	mm	lbf	N	ksi	MPa	
M20.018.34	12,55	2.842	12.640	14,8	102,2	4,1
M20.018.35	12,53	2.657	11.820	13,9	95,9	3,8
M20.018.36	12,55	2.674	11.893	13,9	96,1	3,7

* Falla fuera de las marcas

Nota.- Los resultados contenidos en el presente informe corresponden únicamente a las muestras ensayadas por el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones (LAEV). Además, los valores de fuerza que se emiten en el presente documento (y con los que se ha evaluado la conformidad) corresponden a valores corregidos en función del último certificado de calibración del equipo de fuerza y no se ha utilizado el valor de la incertidumbre.

	REVISADO POR:	APROBADO POR:
Firma:		
Nombre:	Ing. Jonathan Castro, M.Sc.	Ph.D. Wilson Guachamin
Cargo:	ESPECIALISTA DE LABORATORIO	JEFE

LABORATORIO DE ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES

