



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

“CARACTERIZACIÓN DE UNA ALEACIÓN DE LATÓN OBTENIDA POR COLADO DINÁMICO CON VARIACIÓN DE AMPLITUD DE LA MESA VIBRATORIA”

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

ÁLVAREZ VARGAS RAMIRO ISRAEL
ramiro.alvarez@epn.edu.ec

VELOZ MUÑOZ CARLOS ESTEBAN
carlos.veloz01@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. OVIEDO FIERRO FAUSTO HERNÁN, MSc.
fausto.oviedo@epn.edu.ec

Quito, mayo 2019

CERTIFICACION

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Ramiro Israel Álvarez Vargas Y Carlos Esteban Veloz Muñoz, bajo mi supervisión.

Ing. Fausto Oviedo Msc.
DIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Nosotros, **Ramiro Israel Álvarez Vargas** y **Carlos Esteban Veloz Muñoz**, 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 el 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 la normativa institucional vigente.

Ramiro Israel Álvarez Vargas

Carlos Esteban Veloz Muñoz

DEDICATORIA

Dedico a la Escuela Politécnica Nacional, profesores y alumnos, quienes podrán usar este trabajo para futuras investigaciones que se hagan.

A toda mi familia y amigos, que han cumplido un rol importante en el transcurso de mi vida.

Ramiro

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de investigación a mi familia, mi padre Dr. Carlos Veloz,
mi madre Dra. María Muñoz, mi hermana Ab. Mishel Veloz,
por ser un pilar fundamental en mi vida.

De manera especial a mi tío muy querido Arq. Édison Veloz por su apoyo incondicional.

Carlos

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres, quienes han brindado su apoyo incondicional tanto económico y moral durante toda mi vida, ellos nunca dejaron de confiar en mí.

A mis hermanas que cumplen un valor muy significativo en mi vida, que me inspiran a seguir adelante, por su respaldo y paciencia. Todos ellos son un ejemplo a seguir.

Un agradecimiento especial a toda mi familia y amigos, por su preocupación, quienes me ayudaron, y acompañaron, en ciertos momentos difíciles de mi vida.

Gracias a todos los que conforman la facultad de ingeniería mecánica, por su ardua labor, impartiendo conocimientos, y brindado su ayuda en los momentos que se los necesita.

Y principalmente a Dios, por su bendición y compañía a lo largo de mi camino.

Ramiro

AGRADECIMIENTO

Agradezco a la Escuela Politécnica Nacional, a sus distinguidos maestros y en especial al Ing. Fausto Oviedo, MSc. Director de tesis; así como también va mi agradecimiento al Ing. Carlos Díaz, MSc. y al señor Técnico Fabián Peñaloza, quienes han sido la guía y dirección para llegar a culminar este trabajo de investigación.

Agradezco a mi familia por todo el apoyo brindado, a lo largo de toda mi vida estudiantil.

Carlos.

ÍNDICE

CERTIFICACION.....	i
DECLARACIÓN.....	ii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT	xiv
INTRODUCCION.....	1
Objetivo General.....	3
Objetivos Específicos.....	3
1. MARCO TEORICO	4
1.1.1. Propiedades del latón.....	4
1.1.2. Tipos de Latón	5
1.1.3. Fases y microestructura del latón.....	7
1.1.3.1. Diagrama de fase cobre-zinc.....	7
1.1.3.2. Microestructura	10
1.2. Procesos de fundición de latón	12
1.2.1. Fusión y colada de las piezas de aleación de cobre.....	14
1.2.2. Moldeo de las aleaciones de cobre	14
1.2.3. Solidificación de aleaciones de cobre.....	15
1.2.4. Defectos de las aleaciones.....	17
1.3. Fundición por colado dinámico.....	17
1.4. Vibraciones	18
1.4.1. Vibración libre no amortiguada (Movimiento armónico simple).....	19
1.4.2. Vibración forzada no amortiguada.....	20
1.5. Mesa vibratoria.....	21
1.5.1. Movimiento de la mesa vibratoria	22
1.6. Diagnóstico actual de la mesa vibratoria del Laboratorio de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional	23
2. METODOLOGIA.....	25
2.1. Metodología general aplicada	25
2.2. Repotenciación de la mesa vibratoria.....	25
2.2.1. Amplitud de vibración	26
2.2.1.1. Espesor de los discos excéntricos.....	26
2.2.1.2 Diagrama de Bode.....	28

2.2.2. Características de forma de la mesa vibratoria.....	31
2.3. Frecuencias a usarse	32
2.4. Selección del latón	33
2.5. Procesos de fundición de las probetas	34
2.6. Obtención de probetas	45
2.6.1. Ensayo de tracción.....	46
2.6.2. Ensayo de dureza	47
2.6.3. Ensayo de composición química	49
2.6.4. Ensayo de microestructura.....	50
3. RESULTADO Y DISCUSIÓN.....	52
3.1. Resultados	53
3.1.1. Ensayo de composición química	53
3.1.2. Resultado de microestructuras.....	53
3.1.3. Resultado del Ensayo de dureza.....	69
3.1.4. Resultado del ensayo de tracción.....	73
3.1.5. Resumen de Resultados Finales.....	75
3.2. Análisis de resultados	79
3.2.1. Análisis micro y macro-estructural.....	79
3.2.2. Análisis de la dureza	80
3.2.3. Análisis de la tracción.....	81
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	83
4.1. Conclusiones.....	83
4.2. Recomendaciones	84
Referencias Bibliográficas	85
Anexos.....	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 1

Figura 1.1. Diagrama de fase Cu-Zn.....	8
Figura 1.2. Influencia del incremento de Zn en las propiedades de los latones.	10
Figura 1.3. Estructura de la fase β'	10
Figura 1.4. Ilustración esquemática de un posible mecanismo de formación de dos dominios ordenados.....	11
Figura 1.5. Microestructura de Muntz Cu-40Zn recocido.....	12
Figura 1.6. Materiales metálicos fundidos a base de latón.....	13
Figura 1.7. Proceso de fundición.	13
Figura 1.8. Curva esfuerzo-deformación de ensayos de tracción desarrollado en una probeta plana solidificada estática y dinámicamente (3g alta amplitud).	18
Figura 1.9. Diagrama de masa-resorte en vibración libre.....	19
Figura 1.10. Diagrama de masa-resorte en vibración forzada.....	20
Figura 1.11. Mesa vibratoria.	21
Figura 1.12. Esquema del sistema mesa-molde con movimiento vibratorio.....	22
Figura 1.13. Diagrama de Bode de la mesa vibratoria.....	23

Capítulo 2

Figura 2.1. Esquema de la excentricidad de los discos.	27
Figura 2.2. Diagrama de Bode (Disco 0.55g).	30
Figura 2.3. Frecuencia vs Amplitud (Disco 0.55kg).	30
Figura 2.4. Mesa vibratoria en dos partes.	31
Figura 2.5. Mesa vibratoria actual.	32
Figura 2.6. Efecto de cobre y plomo en el latón de libre maquinado.	33
Figura 2.7. Proceso de obtención de probetas.....	34
Figura 2.8. Dimensionamiento de la altura estática.....	36

Capítulo 3

Figura 3.1. (a) CE-2 (b) CE-3. Aumento: 100X. Sin ataque químico	54
Figura 3.2. (a) CE-2 (b) CE-3. Aumento 100X. Con ataque químico.....	54
Figura 3.3. (a) CE-2 (b) CE-3. Aumento 500X. Con ataque químico.....	55
Figura 3.4.(a) CD1-2 (b) CD1-3. Aumento: 100X. Sin ataque químico.	55
Figura 3.5. (a) CD1-2 (b) CD1-3. Aumento: 100X. Con ataque químico.....	56
Figura 3.6. (a) CD1-2 (b) CD1-3. Aumento: 500X. Con ataque químico.....	56
Figura 3.7. (a) CD2-1 (b) CD2-2. Aumento: 100X. Sin ataque químico	57
Figura 3.8. (a) CD2-1 (b) CD2-2. Aumento: 100X. Con ataque químico.....	57
Figura 3.9. (a) CD2-1 (b) CD2-2. Aumento: 500X. Con ataque químico.....	58
Figura 3.10. (a) CD3-1 (b) CD3-2. Aumento: 100X. Sin ataque químico.	58

Figura 3.11. (a) CD3-1 (b) CD3-2. Aumento 100x. Con ataque químico.	59
Figura 3.12. (a) CD3-1 (b) CD3-2. Aumento: 500X. Con ataque químico.....	59
Figura 3.13. (a) CD4-2 (b) CD4-2. Aumento: 100X. Sin ataque químico.	60
Figura 3.14. (a) CD4-1 (b) CD4-2. Aumento: 100X. Con ataque químico.....	60
Figura 3.15. (a) CD4-1 (b) CD4-2. Aumento: 500X. Con ataque químico.....	61
Figura 3.16 (a) CD5-2 (b) CD5-3. Aumento: 100X. Sin ataque químico	61
Figura 3.17. (a) CD5-2 (b) CD5-3. Aumento: 100X. Con ataque químico.....	62
Figura 3.18. (a) CD5-2 (b) CD5-3. Aumento: 500X. Con ataque químico.....	62
Figura 3.19. (a) CD6-1 (b) CD6-2. Aumento: 100X. Sin ataque químico.	63
Figura 3.20. (a) CD6-1 (b) CD6-2. Aumento: 100X. Con ataque químico.....	63
Figura 3.21. (a) CD6-1 (b) CD6-2. Aumento: 100X. Con ataque químico.....	64
Figura 3.22 (a) CD7-1 (b) CD7-2. Aumento: 100X. Sin ataque químico.	64
Figura 3.23. (a) CD7-1 (b) CD7-2. Aumento: 100X. Con ataque químico.....	65
Figura 3.24. (a) CD7-1 (b) CD7-2. Aumento: 500X. Con ataque químico.....	65
Figura 3.25. (a) CD8-2 (b) CD8-3. Aumento: 100X. Sin ataque químico.	66
Figura 3.26. (a) CD8-2 (b) CD8-3. Aumento: 100X. Con ataque químico.....	66
Figura 3.27. (a) CD8-2 (b) CD8-3. Aumento: 500X. Con ataque químico.....	67
Figura 3.28. (a) CD9-2 (b) CD9-2. Aumento: 100X. Sin ataque químico.	67
Figura 3.29. (a) CD9-2 (b) CD9-3. Aumento: 100X. Con ataque químico.....	68
Figura 3.30 (a) CD9-2 (b) CD9-3. Aumento: 500X. Con ataque químico.....	68
Figura 3.31. Cambio del tamaño de grano de las probetas fundidas en las diferentes condiciones dinámicas.	76
Figura 3.32. Cambio de dureza con respecto al tamaño de grano de las probetas en condiciones: CE1, CD1, CD2, CD3, CD4.....	77
Figura 3.33. Cambio de dureza con respecto al tamaño de grano de las probetas en condiciones: CD5, CD6, CD7, CD8, CD9.....	78
Figura 3.34. Cambio de la resistencia a la tracción con respecto al tamaño de grano en cada una de las condiciones dinámicas.	78
Figura 3.35. Diagrama de fase Cu-Zn.....	79

ÍNDICE DE TABLAS

Capítulo 1

Tabla 1.1. Propiedades mecánicas de aleaciones Cu-Zn y Cu-Zn-Sn.	5
Tabla 1.2. Fases por el contenido de Zinc.	9
Tabla 1.3. Características de la mesa vibratoria.	24
Tabla 1.4. Características del variador de velocidad de la mesa vibratoria.	24

Capítulo 2

Tabla 2.1. Resultado de espesores para cada amplitud de vibración.....	28
Tabla 2.2. Propiedades mecánicas de probetas de latón.....	32
Tabla 2.3. Valores de frecuencia y amplitudes seleccionados.	33
Tabla 2.4. Composición química del Latón a usarse.....	34
Tabla 2.5. Características del horno de fundición.	35
Tabla 2.6. Valores de la constante b.....	37
Tabla 2.7. Coeficiente de eficiencia de alimentación.....	39
Tabla 2.8. Relaciones de las áreas transversales.	40
Tabla 2.9. Pruebas.	41
Tabla 2.10. Valores de contracción para la gran mayoría de metales:	42
Tabla 2.11. Tolerancias típicas para acabados superficiales.	43
Tabla 2.12. Distancia pieza-pieza y pieza-molde.	44
Tabla 2.13. Descripción de probetas.....	46
Tabla 2.14. Descripción máquina universal de ensayos.....	47
Tabla 2.15. Probetas para ensayo de dureza.	48
Tabla 2.16. Descripción del durómetro Rockwell	48
Tabla 2.17. Probetas para ensayo de composición química	49
Tabla 2.18. Descripción del Espectrómetro de chisca.....	49
Tabla 2.19. Probetas para ensayo de microestructura.....	50
Tabla 2.20. Descripción de la Máquina desbastadora de disco.....	51
Tabla 2.21. Descripción de la Máquina desbastadora y pulidora FORCIMAT	51

Capítulo 3

Tabla 3.1. Datos experimentales de las probetas.	52
Tabla 3.2. Composición química en CE	53
Tabla 3.3. Tamaño de grano CE.....	55
Tabla 3.4. Tamaño de grano CD1.....	56
Tabla 3.5. Tamaño de grano CD2.....	58
Tabla 3.6. Tamaño de grano CD3.....	59
Tabla 3.7. Tamaño de grano CD4.....	61
Tabla 3.8. Tamaño de grano CD5.....	62
Tabla 3.9. Tamaño de grano CD6.....	64
Tabla 3.10. Tamaño de grano CD7.....	65
Tabla 3.11. Tamaño de grano CD8.....	67
Tabla 3.12. Tamaño de grano CD9.....	68
Tabla 3.13. Durezas probetas CE.....	69

Tabla 3.14. Durezas probetas CD1.....	69
Tabla 3.15. Durezas probetas CD2.....	70
Tabla 3.16. Durezas probetas CD3.....	70
Tabla 3.17. Durezas probetas CD4.....	70
Tabla 3.18. Durezas probetas CD5.....	71
Tabla 3.19. Durezas probetas CD6.....	71
Tabla 3.20. Durezas probetas CD7.....	72
Tabla 3.21. Durezas probetas CD8.....	72
Tabla 3.22. Durezas probetas CD9.....	72
Tabla 3.23. Resultado de ensayos de tracción en las probetas en CE.....	73
Tabla 3.24. Resultado de ensayos de tracción en las probetas en CD1.....	73
Tabla 3.25. Resultado de ensayos de tracción en las probetas en CD2.....	73
Tabla 3.26. Resultado de ensayos de tracción en las probetas en CD3.....	73
Tabla 3.27. Resultado de ensayos de tracción en las probetas en CD4.....	74
Tabla 3.28. Resultado de ensayos de tracción en las probetas en CD5.....	74
Tabla 3.29. Resultado de ensayos de tracción en las probetas en CD6.....	74
Tabla 3.30. Resultado de ensayos de tracción en las probetas en CD7.....	74
Tabla 3.31. Resultado de ensayos de tracción en las probetas en CD8.....	75
Tabla 3.32. Resultado de ensayos de tracción en las probetas en CD9.....	75
Tabla 3.33. Tamaño de grano de fundiciones a diferentes condiciones	75
Tabla 3.34. Propiedades mecánicas de las probetas a las diferentes condiciones.	77

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objeto, caracterizar aleaciones de latón obtenidas por el proceso de fundición por colado dinámico con variación de la amplitud a determinadas frecuencias de una mesa vibratoria, mediante ensayos de laboratorio. Se fundió un latón aproximadamente con un porcentaje del 57% de Cu y 40% Zn, usando un molde de arena con resina y la mesa vibradora del laboratorio de fundición de la EPN. Las condiciones con las que se realizaron las fundiciones fueron: amplitudes que varían entre 0.02mm hasta 0.31mm, con frecuencias en la mesa vibratoria de 3Hz, 6Hz y 9Hz. Cuyas probetas obtenidas se compararon, con probetas obtenidas de una fundición normal (condición estática). Los resultados que arrojaron los ensayos son casi invariantes, al usar los tres discos excéntricos, con frecuencias de 3 Hz y 6 Hz, a excepción de la condición de 0.05mm de amplitud y 6 Hz de frecuencia, donde se obtuvo un aumento considerable de la fase β' , y apareció la fase α en forma acicular, cuyas propiedades mecánicas de dureza y resistencia a la tracción aumentaron considerablemente. Mientras al usar una frecuencia de 9Hz y con las diferentes amplitudes, se obtuvo un decrecimiento en el tamaño de grano de fase α , cuya estructura es dendrítica fina, y un pequeño aumento en la fase β' , a comparación de las primeras condiciones descritas. Como consecuencia, las propiedades mecánicas aumentaron y cumplieron el objetivo del trabajo.

Palabras claves: Colado dinámico, latón, propiedades mecánicas.

ABSTRACT

The purpose of this work is to characterize brass alloys obtained by the process of casting by dynamic casting with variation of the amplitude at certain frequencies of a vibrating table, by means of laboratory tests. A brass was melted with composition of 57% Cu and 40% Zn, using a sand mold with resin and the vibrating table of the EPN foundry laboratory. The conditions of specimens were: amplitudes since 0.02mm to 0.31mm, with frequencies in the vibrating of 3Hz, 6Hz and 9Hz. The samples obtained were compared, with specimens obtained from a normal casting (static condition). The results of the tests were almost invariant, when using the three different eccentrics discs with frequencies of 3 Hz and 6 Hz, except for the condition of 0.05mm amplitude and 6Hz frequency, where obtained a considerable increase of the β 'phase, and appeared the α phase in acicular form, mechanical properties of hardness and tensile strength increased considerably. While using a frequency of 9Hz with the different amplitudes, a decrease in the grain size of phase α was obtained, structure is fine dendritic, and a small increase in the β 'phase, compared to the first conditions. As a consequence, the mechanical properties increased and they fulfilled the objective of the work.

Keywords: Dynamic casting, brass, mechanical properties.

“CARACTERIZACIÓN DE UNA ALEACIÓN DE LATÓN OBTENIDA POR COLADO DINÁMICO CON VARIACIÓN DE AMPLITUD DE LA MESA VIBRATORIA”

INTRODUCCION

El proceso de fabricación de piezas metálicas mediante fundición no ha tenido un desarrollo relevante en el Ecuador, por lo cual la mayor cantidad de piezas son importadas desde otros países, (Proaño Sarauz & Sanchez de la Cruz, 2014). El proceso normal de fundición ocasiona varios defectos en las piezas fabricadas como: defectos externos, defectos volumétricos, no correspondencia de composición química y la estructura de la pieza fundida, propiedades mecánicas insatisfactorias entre otras (Titov. N. & Stepánov, T., 1981).

Por lo tanto, para obtener un elemento mecánico de buena calidad en la actualidad se requiere combinar el proceso de fundición con diferentes tratamientos térmicos mejorando así las propiedades mecánicas y la microestructura de las piezas obtenidas (Schimd, 2002), y al mismo tiempo aumentar de manera significativa el costo en su producción.

Mediante el proceso de colado dinámico se obtiene un cambio micro-estructural en las aleaciones (Sánchez Figueredo, 2012), cambios en la microestructura y propiedades mecánicas en las aleaciones de latón, esperando obtener amplitudes óptimas para mejorar la calidad de las piezas mecánicas.

Teniendo en cuenta que en estudios previos realizados en diferentes proyectos de titulación con un cambio de frecuencia en la máquina vibratoria no se obtuvieron mayores resultados en las propiedades de las aleaciones de latones, se recurre a determinar la influencia de la amplitud de la mesa vibratoria existente en el laboratorio de fundición de la EPN, con las mejores frecuencias obtenidas en el trabajo realizado anterior a este.

El colado dinámico posee diferentes variables que provocan cambios en la micro-estructura y propiedades mecánicas en elementos obtenidos, investigaciones previas sobre este tipo de colado, realizadas en la EPN han presentado importantes resultados basados en el estudio del cambio de la frecuencia de la mesa vibratoria, con lo que se detecta que es necesario efectuar cambios en la amplitud en una misma frecuencia de la máquina (Pizango Veintimilla & Quinga Vega, 2018).

Para poder lograr un cambio en la amplitud de la mesa vibratoria se requiere realizar variaciones en el disco excéntrico el cual se localiza en el eje del motor de la mesa, para llevar a cabo esta variación se propone realizar cambios en el espesor del disco. (Proaño Sarauz & Sanchez de la Cruz, 2014).

Se variará la amplitud de la mesa vibratoria a determinadas frecuencias, las cuales varían dependiendo de la velocidad del motor de la máquina (Pizango Veintimilla & Quinga Vega, 2018).

Seguidamente se variará también las frecuencias, las mismas que son menores a 9,78 Hz. Se obtendrá probetas por medio del colado dinámico (con los cambios anteriormente escritos) y estático, para posteriormente realizar ensayos destructivos y no destructivos en las probetas. Finalmente se realizará la comparación de las propiedades mecánicas de las probetas obtenidas de forma estática con las obtenidas por colado dinámico, brindando así un mejor conocimiento en los estudios realizados de fundiciones por medio del método de colado dinámico.

El presente estudio aportará con información para aprovechar de la mejor manera el uso de la mesa vibratoria, esperando mejorar las propiedades mecánicas en los elementos metálicos obtenidos por los procesos de fundición por colado dinámico (Abu-Dheir, Khraisheh, Saito, & Male, 2005), y las ventajas que se tiene al usar como método de fundición el colado dinámico.

Al no tener información directa acerca del aprovechamiento del colado dinámico y como las vibraciones mecánicas pueden afectar de manera positiva en la homogenización de la colada de metales durante la solidificación en el proceso de fundición (Proaño Sarauz & Sanchez de la Cruz, 2014), con el presente trabajo, se pretende aportar con información que permita desarrollar de forma satisfactoria el proceso de colado dinámico y sus ventajas sobre el proceso tradicional de colado estático.

Objetivo General

Caracterizar aleaciones de latón obtenidas por el proceso de fundición por colado dinámico con variación de la amplitud a determinadas frecuencias de una mesa vibratoria, mediante ensayos de laboratorio, para optimizar el proceso de colado dinámico en fundiciones de latón.

Objetivos Específicos

- Optimizar el uso de la mesa vibratoria del laboratorio de fundición de Ingeniería Mecánica con alternativas en el disco excéntrico del motor.
- Determinar la variación de las propiedades mecánicas y microestructura en las aleaciones de latón obtenidas en el proceso de fundición.
- Seleccionar un rango adecuado de amplitudes a determinadas frecuencias menores a 9,78 Hz, mediante pruebas realizadas en la mesa vibratoria.
- Analizar los cambios efectuados en la microestructura de las aleaciones de latón, mediante metalografías obtenidas de probetas.

1. MARCO TEORICO

1.1. Generalidades del Latón

Los latones representan aleaciones binarias de cobre y zinc combinados en diferentes proporciones que pueden oscilar entre 50 – 95% de Cu y 50 – 5% de Zn. Estas aleaciones poseen una elevada resistencia a la corrosión, e incluso en atmósferas marítimas poseen buenas propiedades lubricantes (Mora & Venegas, 2011), la temperatura de fusión que oscila entre aproximadamente 800 °C y 1000 °C, inferior a algunos materiales como el hierro, el cobre puro, los aceros, y otros.

Entre las características más destacables del latón tenemos la ductilidad y resistencia a la tracción, tiene una buena fusibilidad, es soldable y resistente a la corrosión y desgaste; sin embargo, no tiene buenas características de conducción eléctrica y no es magnético (Wadhwa & Dhaliwal, 2008). Gracias a la gran variedad de aleaciones de cobre y zinc permite obtener diferentes propiedades lo que hace al latón un material ideal para utilizarlo en diversas aplicaciones industriales.

1.1.1. Propiedades del latón

Para la demanda de latón a nivel industrial se requiere que el material posea buenas propiedades mecánicas.

La ductilidad y la resistencia mecánica en los latones varía dependiendo del contenido de zinc en la aleación, estas propiedades aumentan al aumentar el contenido de zinc llegando a un máximo al poseer un 30% de zinc, después de este punto la ductilidad disminuye, pero la resistencia a la tracción aumenta, alcanzando un máximo con 45% de zinc (Mora & Venegas, 2011). Como se puede mostrar en la Tabla 1.1, las propiedades mecánicas de los latones se ven afectados dependiendo del porcentaje de zinc en la aleación.

Tabla 1.1. Propiedades mecánicas de aleaciones Cu-Zn y Cu-Zn-Sn.

Aleación	Resistencia a la tracción máxima(MPa)	Resistencia a la cadencia (MPa)	Elongación en 50 mm (%)	Durezas HRB
Cu-10Zn	275	105	44	65
Cu-9.5Zn-0.5Sn	310	125	43	70
Cu-30Zn	395	205	48	86
Cu-29Zn-1Sn	400	230	40	87

Fuente: (Davis J. R., 2001)

Entre las características más importantes que el latón presenta se puede nombrar las siguientes (Copper Development Association, 1996):

- Versatilidad en obtención de piezas mediante fundición por molde perdido o molde metálico, por gravedad o presión.
- Con una concentración superior al 63% de cobre, presenta buena ductilidad usándose en su mayoría para trabajos en frío.
- Con aleaciones de plomo en proporciones del 3% presenta buenas propiedades de maquinabilidad.
- Presenta alta resistencia a la corrosión.
- Presenta buenas características térmicas y eléctricas, por lo que se lo puede encontrar en equipos eléctricos, domésticos e industriales.
- Posee buena resistencia al desgaste, por lo que se lo utiliza mucho en componentes como piñones, cojinetes, etc.
- Cuenta con una alta soldabilidad y puede ser soldado con otras aleaciones de cobre o con otros metales.
- Debido al efecto de restricción de crecimiento de microorganismos, el latón presenta propiedades anti-bacteriales.
- Es un material reciclable, pudiendo reutilizarse al momento de soldar para obtener nuevamente latón.

1.1.2. Tipos de Latón

Los latones comerciales, por su contenido de zinc, pueden dividirse en dos grandes grupos, latones para trabajo en frío (latones alfa) y latones para trabajos en caliente (alfa más beta). A continuación, se describirán diferentes tipos de latones.

1.1.2.1. Latones alfa

El latón alfa se denomina 'cold working brasses', esta aleación contiene más del 63% de cobre, que cristalizan en un sistema cúbico centrado en las caras. Sus características importantes son su gran ductilidad a temperatura ambiente, pudiendo ser deformado por laminación, cizallado etc. Su color varía por su contenido de cobre, de rojo en aleaciones altas en cobre, hasta amarillo para latones que contienen un 62% de cobre.

El latón cadrige también conocido 70/30 es el mejor latón alfa que contiene un 70% de zinc y 30% cobre. Dichos latones tienen una combinación óptima de propiedades como resistencia a la tracción, ductilidad, por ello son aptos para trabajo en frío (Mora & Venegas, 2011).

1.1.2.2. Latones beta

La fase beta está centrada en el diagrama Cu-Zn. Siendo estable entre 39% y 55% de Zn a 800°C. Entre el 45% y 49% de Zn el rango decrece a una temperatura de 500°C. La fase beta cristaliza en un sistema cúbico centrado en el cuerpo. Por lo general son utilizados como metales de aporte en soldaduras, tienen una alta dureza y una gran fragilidad (Mora & Venegas, 2011).

1.1.2.3. Latones alfa más beta

Los latones alfa más beta contienen un porcentaje de cobre que varía entre 54% y 62%. Están compuestos por dos fases, α y β' .

La fase β' es más dura y frágil comparada con α , en temperatura ambiente, por lo tanto es más complicado trabajar en frío. Aumentando la temperatura la fase beta adquiere gran plasticidad. La mayoría de estas aleaciones al calentarse adquieren una región monofásica beta, que tienen excelentes propiedades para el trabajo en caliente.

Las aleaciones alfa más beta tiene una gran resistencia a la tracción y al aumentar el contenido de zinc los precios disminuyen, a comparación con los latones alfa. Pero poseen una gran susceptibilidad a la corrosión por desinflación. Para trabajar en caliente su rango de temperatura es entre 650°C a 750°C (Davis J. R., 2001).

1.1.2.4. Latones Complejos

Conocidos como bronce al manganeso, también llamadas latones de alta resistencia a la tracción. Son latones cuya principal característica no se deben al manganeso, que suelen estar en pequeñas proporciones.

Se puede modificar las propiedades intrínsecas de las fases presentes o modificar la proporción entre las fases, por la presencia de varios elementos de aleación. Su composición puede ser ajustada para obtener dos tipos de estructuras con diferentes propiedades mecánicas.

Su composición base es la de latón muntz, cuyo porcentaje de cobre está comprendido entre 53% y 60%. Usualmente se añade metales como estaño, hierro, níquel, manganeso y aluminio. Para obtener propiedades requeridas y un buen comportamiento en las condiciones de servicio, se necesita ajustar muy bien las composiciones (Mora & Venegas, 2011).

1.1.3. Fases y microestructura del latón

1.1.3.1. Diagrama de fase cobre-zinc

Los latones se pueden presentar de forma binaria constituidos únicamente por cobre y zinc, y en una forma ternaria en los cuales a más de la presencia de cobre y zinc se adiciona uno o más aleantes (Pizango Veintimilla & Quinga Vega, 2018).

Se puede observar el amplio rango de solubilidad del zinc en el cobre en el estado sólido en la Figura 1.1, composiciones que tenga un porcentaje de hasta 32,5% de zinc, solidifica como una fase simple de solución sólida alfa (α). Al aumentar el contenido de zinc, encontramos una segunda solución sólida beta (β), siendo una fase intermedia (Galloso, 1996).

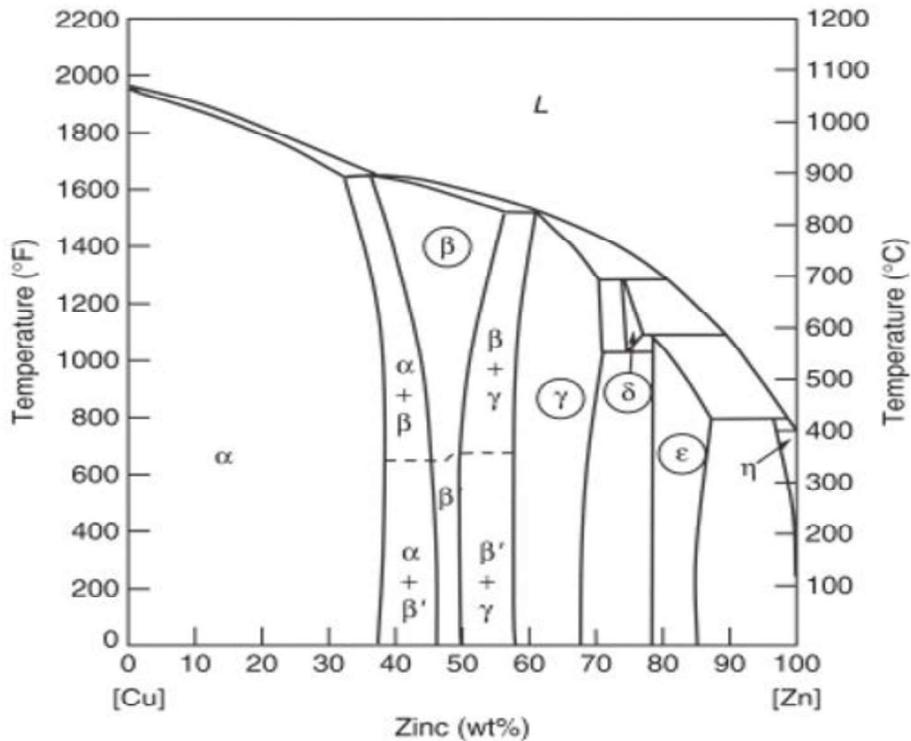


Figura 1.1. Diagrama de fase Cu-Zn.
Fuente: (Campell, 2012)

El zinc es un elemento barato relativamente, siendo un potente aleante en el cobre, mejorado la resistencia y dureza, mediante el mecanismo de endurecimiento por solución sólida. Se puede observar en el diagrama de fases Cu-Zn, que hasta un 15 % de zinc, solo se produce una ligera disminución en la temperatura de liquidus, donde las aleaciones binarias tienen rangos de solidificación muy estrechos. El zinc se pierde fácilmente por evaporación y oxidación, ya que posee una alta presión de vapor en las aleaciones fundidas. Por ello la presencia del óxido de zinc en la atmósfera de la fundición.

La fase alfa (α), se caracteriza por ser blanda y dúctil. Su estructura es cúbica de cara centrada (FCC), al igual que el cobre. La presencia de zinc distorsiona la red de cobre.

En esta aleación aparece una fase beta prima (β'), caracterizada por su dureza y fragilidad. Es una fase ordenada. Se obtiene una fase beta (β), al elevar la temperatura, la misma que tiene una gran plasticidad y una estructura cúbica de cuerpo centrado (BCC). Es una fase desordenada. Al aumentar el contenido de zinc en la aleación, presenta diferentes fases gamma (γ), delta (δ), completamente frágiles.

En la siguiente tabla se muestra las diferentes fases presentes por el contenido de zinc, en las aleaciones Cu-Zn.

Tabla 1.2. Fases por el contenido de Zinc.

Fases	Contenido de Zinc
Alfa(α)	Hasta 39%
Alfa más Beta prima ($\alpha+\beta'$)	37,5- 45%
Beta prima (β')	46%-50%
Gamma (γ)	Mayor a 50%Zn

Fuente (Galloso, 1996)

La ductilidad incrementa proporcionalmente al aumentar el contenido de zinc, en los latones alfa, hasta la presencia de la fase beta prima (β'). Del mismo modo la resistencia a la tracción aumenta gracias al aumento del contenido de zinc, esta propiedad desciende por la aparición de la fase gamma (γ).

El latón que tiene la mayor resistencia al choque es el latón alfa (α), que disminuye por la presencia del latón beta prima (β'), siendo muy frágil cuando se presenta la fase gamma (γ). En cambio la dureza aumenta con la presencia del latón beta prima (β') y aún más con la fase gamma (γ) (Galloso, 1996).

Las propiedades mecánicas de resistencia a la tracción, dureza y elongación como se describió anteriormente se ven afectadas por el contenido de zinc, esta variación se muestra en la Figura 1.2, con un incremento en el porcentaje de zinc estas propiedades mejoran, sin embargo, a partir de 50% de zinc la aleación se ve afectada negativamente teniendo un decremento significativo en sus propiedades, perdiendo la utilidad industrial ya que se tornan frágiles a una temperatura ambiente (Pizango Veintimilla & Quinga Vega, 2018).

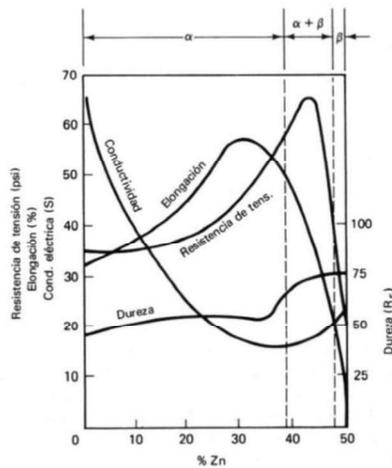


Figura 1.2. Influencia del incremento de Zn en las propiedades de los latones.
Fuente: (Floristán, 2009)

1.1.3.2. Microestructura

En el latón la presencia de la fase β que cristaliza en un sistema cúbico centrado en el cuerpo (BCC). Cuando supera una temperatura de 470°C los átomos de zinc se encuentran al azar en la red. A altas temperaturas la energía térmica hace vibrar los átomos, cuando el material empieza a enfriarse dichos átomos de zinc se posiciona preferencialmente, cuando ocurre aquello la fase beta se dice que esta ordenada, formando una superred. La fase ordenada se denomina beta prima (β'). Su estructura se muestra en la siguiente figura.

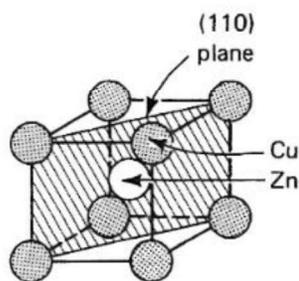


Figura 1.3. Estructura de la fase β' .
Fuente: (Davis, 2001)

El proceso de ordenamiento de la red cristalina es complejo, en algunas aleaciones no se pueden explicar. Partiendo de una aleación del 50% de zinc y 50 % de cobre, ya que su número de átomos es igual, se procura describir el proceso de ordenamiento, cerca de su temperatura crítica. Los átomos se mantienen en un estado de vibración por la energía térmica, permitiendo el movimiento de los átomos de un sitio a otro de la red. Dicho

desplazamiento se da por el movimiento de vacantes. Para superar la energía de atracción entre el cobre y el zinc, las vibraciones de la red deben ser lo suficientemente fuerte, esto no ocurre cuando la temperatura se encuentra por debajo de la temperatura crítica.

Existen regiones ordenadas también llamadas dominio, que actúan como núcleo de ordenamiento para aumentar la región. A partir de las fases desordenadas la fase ordenada crece.

El grado de ordenamiento es la perfección de ordenamiento de los dominios, cuando todos los dominios están ordenados su grado de ordenamiento es uno ($S=1$), dependiendo del orden de los átomos el grado de ordenamiento (S) varía en cero y uno.

Se toman en cuenta dos características:

- Unos pocos átomos se podrán ordenar, se ve el enfriamiento es demasiado rápido desde la fase beta (β). Existirán muchos núcleos, pocos átomos ordenados y sus dominios no estarán en contacto, por lo tanto, su aleación estará localmente ordenada.
- Contribuirá en la resistencia a la tracción, cuando el tamaño de los dominios es pequeño, existiendo varios límites de dominio.

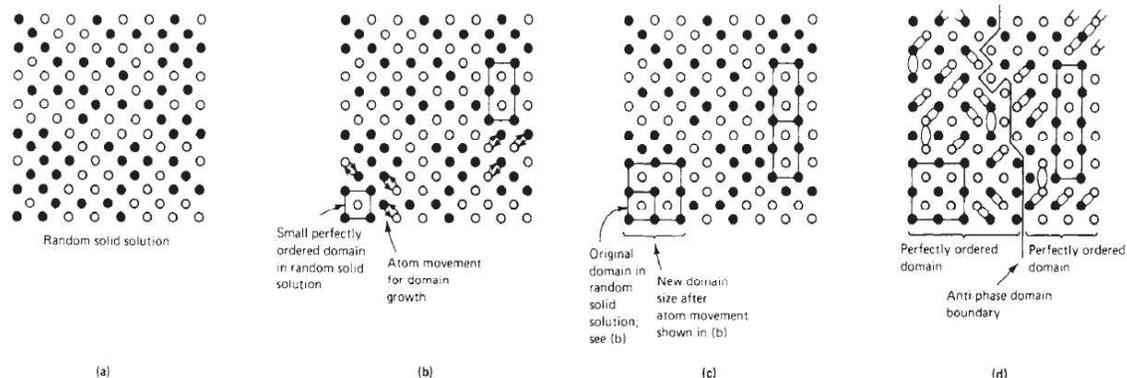


Figura 1.4. Ilustración esquemática de un posible mecanismo de formación de dos dominios ordenados.

Fuente: (Davis, 2001)

A nivel comercial no se desea obtener una fase β' , debido a su estructura frágil, por lo que se la combina con la fase α , la cual es dúctil y suave, aprovechando de esta manera las propiedades más destacables de las dos fases. Esta mezcla de fases permite al

material presentar una combinación de buenas capacidades de mecanizado y excelentes propiedades mecánicas. Un ejemplo de esta aleación es el latón de Muntz 60%Cu – 40%Zn. (Davis, 2001).

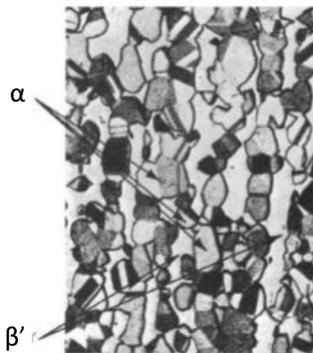


Figura 1.5. Microestructura de Muntz Cu-40Zn recocido.
Fuente: (Davis, 2001)

En la Figura 1.5, se puede observar la microestructura de Muntz, en donde se puede distinguir a la fase α en las regiones grises y oscuras correspondientes a estructuras de cuerpo de caras centradas, mientras que la fase β' se encuentra en las regiones más claras. La mezcla α y β' formadas depende del tratamiento térmico aplicado en la aleación, si se realiza un enfriamiento lento desde temperaturas de β a la temperatura ambiente se desarrollará aproximadamente la misma cantidad de α y β' . (Davis, 2001).

1.2. Procesos de fundición de latón

El proceso de fundición tiene por objetivo obtener piezas, por colada y solidificación en un molde, de un metal o aleación que ha sido llevado previamente al estado líquido por calentamiento en horno. Es decir este proceso consiste en fundir el metal, el cual se calienta en un horno hasta el punto de fusión y sobrecalentarlo, posteriormente se vierte la colada en moldes con forma de la pieza que se desea obtener, dejándolo solidificar y enfriar dentro del molde para finalmente retirar el molde de la pieza requerida (Coste, 1964).

Los latones son aleaciones de cobre y zinc, que son comunes para el uso de fundiciones, gracias a su alta colabilidad, buena conductividad térmica y eléctrica, resistencia a la corrosión, además son aleaciones fácilmente mecanizadas (Rodríguez, Castro, & del Real Romero, 2014).



Figura 1.6. Materiales metálicos fundidos a base de latón.
Fuente: (Rodríguez, Castro, & del Real Romero, 2014)

Por sus diversos métodos para la fundición de metales, hacen que este proceso sea uno de los más versátiles en su manufactura. Teniendo como ventajas importantes la obtención de elementos de geometría compleja, se puede producir piezas de pequeño y gran tamaño, existe métodos de fundición adaptables a la producción de masa. Existe también desventajas como: porosidades en elementos, baja precisión dimensional, y acabado superficial deficiente (Groover, 1997).

Todo el proceso de fundición en resumen se basa en siete operaciones escritas a continuación (Scorza, 2010):

- a. Fabricación del modelo, puede ser de madera o metálico.
- b. Construcción del molde, con la forma del elemento que se pretende fabricar.
- c. Fusión del metal.
- d. Colado de los moldes con el metal en estado líquido.
- e. Solidificación y enfriamiento.
- f. Desmolde de las piezas solidificadas en los moldes.
- g. Limpieza y acabado superficial del elemento.

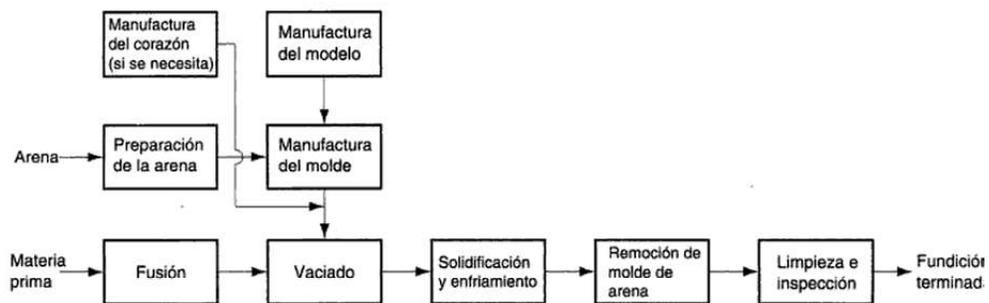


Figura 1.7. Proceso de fundición.
Fuente: (Groover, 1997)

Para el proceso se debe tomar en cuenta varios parámetros como por ejemplo la fluidez y contracción del material al ser colado, tiempo de solidificación, diseño mazarotas. Son parámetros que deben ser estrictamente analizados, para así obtener elementos que posean adecuadas propiedades químicas y mecánicas (Rodríguez, Castro, & del Real Romero, 2014).

1.2.1. Fusión y colada de las piezas de aleación de cobre

Para las fundiciones de latón se procede para la preparación de la aleación, se introduce en el crisol o en el horno lingotes de aleación previamente preparada, eventualmente chatarra de la misma aleación, añadiéndole un recubrimiento adecuado.

Cuando los lingotes estén fundidos se harán pequeñas adiciones de metales de corrección en el caso de latón zinc, y otros elementos si es necesario (Capello, 1966).

Es recomendable para la fundición del latón el uso del 20 al 40 % de chatarra y el resto de materiales puros nuevos. Si se desea una alta calidad se emplea una carga con gran contenido de materiales nuevos (Titov & Stepánov, 1981).

Conseguida la fusión, se recalienta hasta la temperatura que sea necesaria, para el tipo de aleación y espesores de la pieza a fundir.

1.2.2. Moldeo de las aleaciones de cobre

- a. Modelos:** Los modelos en la fundición de aleaciones de cobre no poseen una gran diferencia de los que se utilizan en la fundición de hierro, solo se debe tomar en cuenta la contracción de las aleaciones que varía del 10%-15% de su dimensión, y del exceso del metal para mecanizar, que varía de 3 a 10 mm.
Para series importantes y numerosas de piezas se utiliza fundición coquilla, caso contrario el moldeo en arena verde o en seco.
- b. Arenas:** Las arenas para la fundición de aleaciones cobre, exige menor refractariedad, por la baja temperatura de colado, pero mayor finura ya que las aleaciones poseen más fluidez y pueden penetrar entre los granos de arena haciéndose difícil la limpieza del elemento por el embronzamiento.
- c. Machos:** Cuando sus dimensiones y forma lo permitan el hacerlos con arena de molde es de gran factibilidad, para evitar el embronzamiento.

- d. **Secado:** Si se trata de arena verde se espolvorean los moldes con negro mineral seco, o se barniza con una suspensión de plumbagina en agua.

El secado de los moldes se realiza en estufas a una temperatura de 200-220 °C.

- e. **Bebederos y cargadores:** Los dispositivos de colada se prefiere que tenga forma de sifón, se requiere canales y entradas menos anchos por la fluidez de las aleaciones de cobre.

Por lo general las piezas de latón tienen dimensiones pequeñas, por lo que se acostumbra moldear varios modelos en una sola caja, conectados todos con una sola entrada al bebedero central.

Es necesario disponer cargadores en las piezas para la salida del aire y de los gases, y mazarotas en donde se tenga mayores espesores para la alimentación, cuando se trabaja con bronce de estaño.

Si se trabaja con fundiciones de latón y bronce de aluminio, se debe tomar precauciones especiales para obtener elementos limpios y sin rechupes, el modelo debe ser previsto con cargadores más abundantes, el bebedero se hará siempre en sifón, no directo, interponiendo entre éste y la pieza una trampa para las escorias, disminuyendo también la velocidad de entrada al molde. Si el elemento es de gran tamaño, es conveniente que se tenga dos o más bebederos. Toda agitación y turbulencia en el metal líquido provoca formación de películas de óxido en la superficie del molde.

En donde se tenga grandes espesores se debe disponer de abundantes mazarotas, y en lugares de difícil alimentación se debe tener coquillas y enfriadores adecuados.

- f. **Acabado:** Las piezas fundidas son sacadas de las cajas para ser rebajadas, operación que se realiza con herramientas neumáticas.

El acabado se puede ejecutar con la lima o cepillo duro (Capello, 1966).

1.2.3. Solidificación de aleaciones de cobre

La solidificación es la transformación del líquido dentro del estado cristalino sólido a través de la nucleación de la fase sólida y el posterior crecimiento hasta consumir el líquido. La reacción de solidificación es fundamental para muchos procesos tecnológicos como la fundición. El control de este proceso tiene que ver con la microestructura y sus propiedades consecuentes. (Ferry, 2006).

La fundición por moldeo se basa en contener la masa fundida en un molde el cual actúa como sitio inicial donde comienza la solidificación del metal. La conductividad térmica del

molde, su área de superficie por unidad de volumen del metal líquido, la forma, la composición, y la temperatura, afectarán a la transferencia de calor entre la masa fundida y la pared del molde, por lo tanto, esto influye en la microestructura de la solidificación.

El tamaño total de grano y la forma del grano en la solidificación viene dada por la relación entre la tasa de nucleación y la tasa de crecimiento, si la tasa de nucleación es alta y los núcleos no son consumidos por el crecimiento competitivo el tamaño de grano resultara bien. Por lo contrario, una tasa de nucleación baja dará un tamaño de grano final grueso. (Ferry, 2006).

La solidificación en molde generalmente ocurre en un flujo perpendicular a las paredes del molde, esto origina una nucleación con crecimiento dendrítico adicional perpendicular a la pared del molde.

En la solidificación de las aleaciones de cobre la estructura más predominante es la dendrítica la cual se ve afectada por causa de la velocidad de enfriamiento, la composición y la agitación durante la solidificación.

La velocidad de enfriamiento afecta en el espaciado de los brazos adyacentes en las dendritas, un aumento en la velocidad de enfriamiento conlleva a un espaciamiento más fino. El tiempo de solidificación por lo general es más útil al interpretar la estructura de las aleaciones de cobre independiente del contenido de soluto que posee la aleación.

Para muchas aleaciones de cobre se muestra un espaciamiento más fino entre los brazos de la microestructura dendrítica, por el aumento del contenido de soluto.

Aleaciones de cobre que contienen zinc en su composición contienen una segunda fase β en equilibrio en la estructura dendrítica α . Esta estructura se debe a las condiciones de enfriamiento del material resultando una estructura de grano equiaxial en el centro del metal. Las dendritas de la fase alfa en estas estructuras se encuentran distribuidas de mejor manera asociadas con la fase beta.

En algunas aleaciones de latón se presentan macrosegregaciones que se deben a altos rangos de enfriamiento, estas segregaciones se producen en las últimas etapas de la congelación a medida que el líquido rico en soluto llena los límites de los granos, este problema se evidencia de mejor manera en aleaciones con estaño, fosforo o plomo.

Para evitar problemas de segregaciones en la fundición de latón se ha aplicado agitaciones electromagnéticas para refinar el tamaño de grano, estas agitaciones han resuelto el problema de las “rasgadura caliente” el acero.

1.2.4. Defectos de las aleaciones

Los elementos pueden ser rechazados por defectos como sopladuras, rechupes, porosidades, que se encuentra durante y después del acabado.

Para acabar con los defectos no basta con aplicar buena arena de moldeo, la disposición de bebederos y mazarotas. Para las aleaciones es necesario prestar la máxima atención y cuidado a las operaciones de fusión, impidiendo un calor excesivo, que debe estar dentro de los límites del 3 al 4 %. (Capello, 1966).

1.3. Fundición por colado dinámico

La idea principal del colado dinámico, consiste en la aplicación de vibraciones a la pieza fundida mientras se solidifica consiguiendo de esta forma mejora en las propiedades y una disminución en los defectos de la pieza obtenida. La primera publicación relacionada con el uso de vibraciones en procesos metalúrgicos data de 1878 propuesta por Chernov (Antolí Fauria, 2012).

En el método de colado dinámico se ubica los moldes de fundición sobre una plataforma o mesa vibratoria y se realiza el vertido de la colada, manteniendo la vibración de la mesa hasta la solidificación total de la pieza. Mediante la vibración de la plataforma o mesa se obtiene una disminución de defectos e inclusiones no metálicas tales como escorias, poros y sopladuras en las piezas (Sánchez Figueredo, 2012).

Esta alternativa de fundición tiene una influencia directa en el cambio de la microestructura del metal, presentando un incremento o disminución en las propiedades mecánicas de la pieza obtenida. Investigaciones muestran que bajo ciertas condiciones dinámicas de frecuencia y amplitud, se logra alcanzar propiedades mecánicas que llegan a superar las propiedades que se pueden obtener en el colado estático, como se puede observar en la Figura 1.8. (Appendino, Crivellone, Mus, & Spriano, 2013).

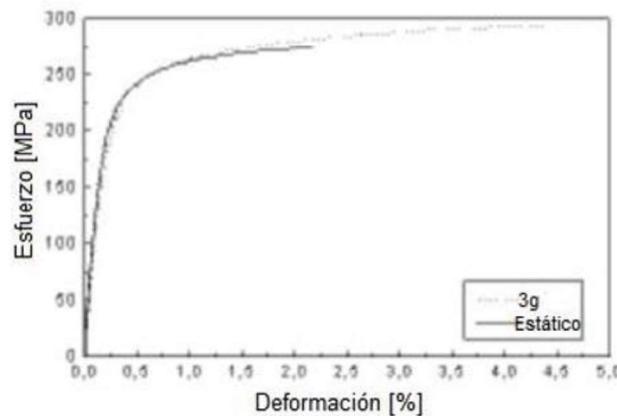


Figura 1.8. Curva esfuerzo-deformación de ensayos de tracción desarrollado en una probeta plana solidificada estática y dinámicamente (3g alta amplitud).
Fuente: (Appendino, Crivellone.Mus & Spriano, 2013)

En la investigación presentada por Appendino(2013) menciona que las propiedades mecánicas disminuyen con niveles de vibración de 3g y 5g con baja amplitud o 5g y 7g de alta amplitud.

1.4. Vibraciones

Una vibración mecánica es la oscilación repetida de una partícula o un cuerpo rígido en torno a una posición de equilibrio, en algunos casos conviene que existan movimientos vibratorios y se generan deliberadamente, en otros como en maquinaria o estructuras, la mayoría de vibraciones son nocivas y si no son controladas pueden causar daños materiales y personales (Riley & Sturges, 1996).

Por lo general se presenta una vibración mecánica cuando un sistema se separa de su posición de equilibrio estable. El sistema tiende a regresar a su posición inicial bajo la fuerza de recuperación. Generalmente el sistema pasa la posición inicial gracias a una velocidad que ha adquirido, este proceso puede repetirse indefinidamente, manteniéndose el sistema en movimiento de un lado para el otro de su posición de equilibrio. El tiempo que requiere un sistema para un ciclo completo se denomina periodo de vibración. Se define como frecuencia al número de ciclos por unidad de tiempo, y la amplitud vibratoria es el desplazamiento máximo del sistema desde su posición de equilibrio. (Beer, Jhonston, & Cornwell, 2010).

Se denomina una vibración libre cuando el movimiento se mantiene únicamente por medio de fuerzas restauradoras. Cuando se aplica una fuerza periódica al sistema, el movimiento se conoce como vibración forzada. Una vibración es no amortiguada cuando es posible ignorar los efectos de la fricción. Se debe tomar en cuenta que todas las vibraciones son en realidad amortiguadas hasta cierto grado. (Beer, Jhonston, & Cornwell, 2010).

1.4.1. Vibración libre no amortiguada (Movimiento armónico simple)

El movimiento armónico simple es aquel donde la aceleración es proporcional al desplazamiento respecto a un punto fijo y está dirigida hacia este. Las vibraciones que aparecen en aplicaciones técnicas en su mayoría pueden representarse mediante un movimiento armónico simple, otras vibraciones se aproximan a un movimiento armónico simple (Riley & Sturges, 1996).

Un cuerpo de masa m unido a un resorte de constante k . Cuando la masa está en equilibrio estático las fuerzas que actúan sobre ella es su peso \mathbf{W} y la fuerza ejercida por el resorte \mathbf{T} ($T = k\mathbf{e}$).

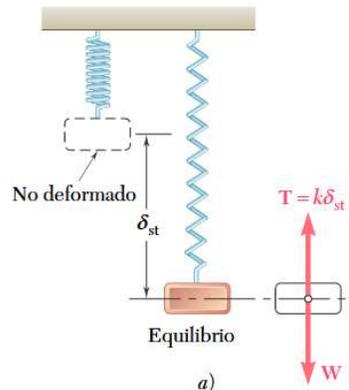


Figura 1.9. Diagrama de masa-resorte en vibración libre.
Fuente: (Beer, Jhonston, & Cornwell, 2010)

Supongamos que la partícula se desplaza una distancia desde su posición de equilibrio sin velocidad inicial, la partícula se moverá de un lado hacia el otro, se ha generado una vibración con una amplitud. La ecuación que gobierna este fenómeno es:

$$mx'' + kx = 0 \quad (\text{Ec.1.1})$$

La solución general se expresa como

$$x = C_1 \sin\left(\sqrt{\frac{k}{m}} t\right) + C_2 \cos\left(\sqrt{\frac{k}{m}} t\right) \quad (\text{Ec. 1.2})$$

Donde x es la posición de la partícula a cualquier tiempo, $\sqrt{\frac{k}{m}}$ se denomina como frecuencia circular natural w_n

1.4.2. Vibración forzada no amortiguada

Desde el punto de vista de las aplicaciones de ingeniería las vibraciones forzadas de un sistema son las más importantes. Ocurren cuando una fuerza se genera periódicamente en un determinado sistema. (Beer, Jhonston, & Cornwell, 2010).

Ahora supongamos que en un sistema masa resorte se aplica una fuerza periódica P , que tiene una magnitud $P = P_m \sin(w_f t)$, donde w_f es la frecuencia circular de la fuerza, se conoce también como frecuencia circular forzada.

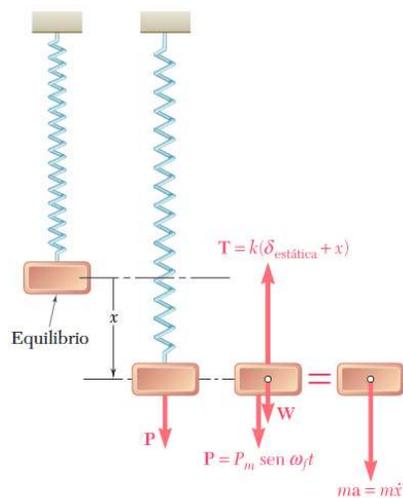


Figura 1.10. Diagrama de masa-resorte en vibración forzada.
Fuente: (Beer, Jhonston, & Cornwell, 2010)

La ecuación que gobierna este fenómeno es:

$$mx'' + kx = P_m \sin(w_f t) \quad (\text{Ec. 1.3})$$

La solución general de la ecuación escrita anteriormente se obtiene mediante la solución de la ecuación homogénea correspondiente más la solución particular de la ecuación. Dando como resultado general:

$$x = C_1 \sin(\sqrt{w_n}t) + C_2 \cos(w_n t) + x_m \sin(w_f t) \quad (\text{Ec.1.4})$$

Se puede observar que los primeros dos términos de la ecuación representa a una vibración libre del sistema, cuya frecuencia es la frecuencia natural del sistema, la cual depende de la constante k del resorte y la masa del cuerpo, las constantes C_1 y C_2 pueden determinarse a partir de las condiciones iniciales. El último término representa la vibración de estado estable producida por la fuerza aplicada, donde su frecuencia es la frecuencia forzada impuesta por la fuerza, cuya amplitud x_m depende de la razón de frecuencias w_f/w_n .

1.5. Mesa vibratoria

La mesa vibratoria está diseñada de tal forma de brindar estabilidad al momento de ser sometida a vibración, mediante la fijación al suelo por resortes de amortiguación. Mediante el acoplamiento directo del motor a la mesa vibratoria la transmisión de vibraciones es directa desde el motor al molde de arena, como se puede mostrar en la Figura 1.11.



Figura 1.11. Mesa vibratoria.
Fuente: (Proaño Sarauz & Sanchez de la Cruz, 2014)

1.5.1. Movimiento de la mesa vibratoria

La vibración de la mesa se lo considera como un movimiento vibratorio forzado amortiguado debido a que es un sistema que posee elasticidad inducido por los resortes, y oscilaciones que son producto de una fuerza externa proporcionado por el disco excéntrico que viene conectado al motor de la máquina, el amortiguamiento es debido a la fricción que presenta el equipo con el aire circundante y al amortiguamiento histérico en los resortes. (Sánchez Figueredo, 2012)

En la figura 1.12. se muestra el esquema del sistema de mesa-molde al que se le proporciona el movimiento vibratorio.

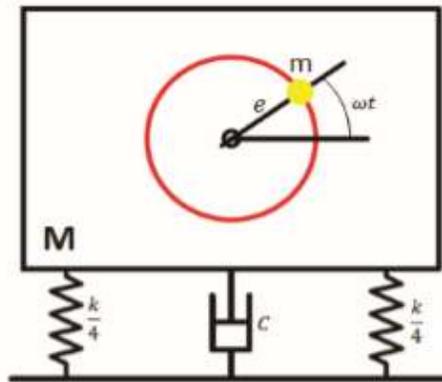


Figura 1.12. Esquema del sistema mesa-molde con movimiento vibratorio.
Fuente: (Proaño Sarauz & Sanchez de la Cruz, 2014)

El disco excéntrico representado en la Figura 1.12. es el encargado de provocar un movimiento y la vibración que se requiere en el equipo.

Por lo tanto, la ecuación que va a gobernar el movimiento es:

$$M\ddot{y} + c\dot{y} + k_v y = F_0 \cos \omega t \quad (\text{Ec.1.5})$$

Donde k_v representa la constante del sistema.

La ecuación 1.5 se trata de una función de segundo orden, para el análisis de la frecuencia y amplitud en el movimiento de la mesa, se hace uso de la función de transferencia del sistema, la cual viene dada por:

$$G(S) = \frac{\omega_n^2}{S^2 + 2\xi\omega_n S + \omega_n^2} \quad (\text{Ec.1.6})$$

En donde ξ representa el factor de amortiguamiento del sistema, mientras que ω_n pertenece a la frecuencia natural del sistema. Y es igual a:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_v}{M}} \quad (\text{Ec.1.7})$$

Para tener una idea del comportamiento de la mesa vibratoria se hace uso del diagrama de Bode, en el cual se representa la ganancia y la fase que presenta la función de salida del sistema masa, resorte, amortiguador de la mesa vibratoria.

En la Figura 1.13 se presenta el diagrama de Bode para el sistema de la mesa vibratoria.

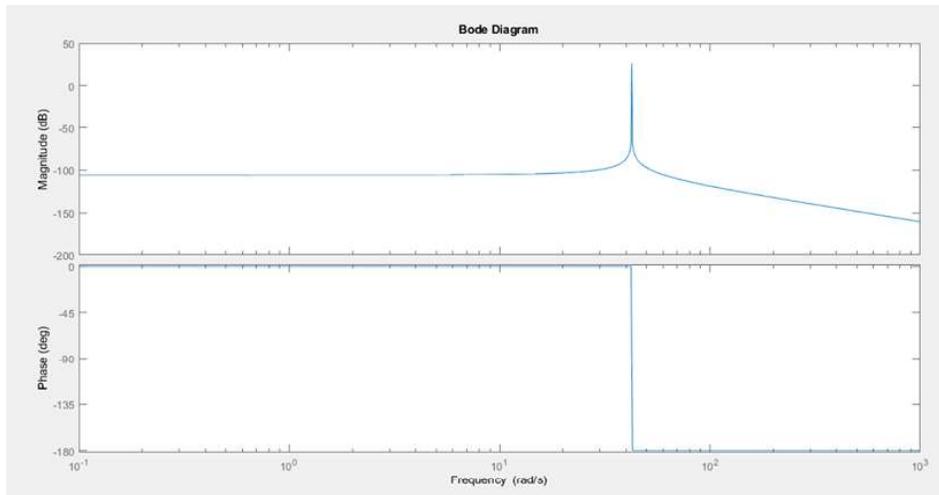


Figura 1.13. Diagrama de Bode de la mesa vibratoria.
Fuente: (Propia).

1.6. Diagnóstico actual de la mesa vibratoria del Laboratorio de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional

La mesa vibratoria que posee el laboratorio de fundición de la Escuela Politécnica Nacional, fue elaborada en el año 2014 con un sistema mecánico y eléctrico, cuyas partes principales se detallan a continuación:

Tabla 1.3. Características de la mesa vibratoria.

Elemento	Función	Características
Motor Trifásico SIEMENS	Generar la suficiente potencia para girar el eje excéntrico.	Máxima revolución RPM: 1020 RPM Voltaje: 220V
Guarda motor	Proteger el motor si existe una descarga eléctrica.	Corriente admitida: 1.6 a 2.4V
Resortes	Generar el movimiento longitudinal de la mesa	Carga aplicada: Carga de fatiga. Constante del resorte: 47 kg/cm Tipo de terminadas del resorte: Rebajados a escuadra
Eje Excéntrico	Genera el movimiento longitudinal a la mesa, para que funcionen los resortes.	

Fuente: (Pizango & Quinga, 2018)

Una previa repotenciación de la mesa vibratoria realizada en el año 2017, implementó una base, en la cual se encuentran soldados los soportes, donde se ajustan los resortes de tal forma que todo el ensamble tenga una vibración conjunta. También se implementó un variador de velocidad para el motor, obteniendo una variación de frecuencias vibratorias. La característica de este elemento se especifica en la siguiente tabla:

Tabla 1.4. Características del variador de velocidad de la mesa vibratoria.

Elemento	Función	Características
Variador de velocidades	Variar la velocidad del motor	Marca: WEG CFW 300
S-LDS220/2 Luz piloto LED	Mostrar si el sistema está habilitado para su función	Voltaje 220V AC Color: Verde
Selector	Permitir encender o apagar el sistema	Color: Negro
Ventilador con filtro	Ayudar a ventilar los componentes internos asegurando la integridad del variador	Voltaje:230 V Dimensiones: 124x124mm Potencia: 55-66 Mb/h
Borne para riel	Permitir conectar cualquier tipo de motor	Longitud: 16mm
Potenciómetro	Permitir variar las velocidades manualmente	
Gabinete metálico	Soportar los componentes internos del sistema del ventilador	Dimensiones: 300x400x200mm

Fuente: (Pizango & Quinga, 2018)

2. METODOLOGIA

2.1. Metodología general aplicada

El método que se detalla a continuación es empleado para determinar la influencia que tiene el colado dinámico en las propiedades mecánicas y en las microestructuras de las piezas obtenidas en latón, este método sigue los siguientes pasos:

- a. Dimensionamiento adecuado del disco excéntrico que permite modificar la amplitud de la mesa vibratoria mediante análisis físicos.
- b. Selección de una mezcla comercial del latón en función del balance del rango de propiedades requeridas para una aplicación, que posean características de maquinabilidad.
- c. Obtención de probetas con el proceso de fundición de colado estático, que nos permita caracterizar las diferentes propiedades mecánicas de las aleaciones de latón.
- d. Obtención de probetas con el proceso de fundición de colado dinámico, que nos permita caracterizar las diferentes propiedades mecánicas de las aleaciones de latón.
- e. Caracterización de probetas metálicas obtenidas en los procesos mencionados anteriormente, mediante ensayos no destructivos y destructivos.
- f. Evaluación de resultados obtenidos mediante procesos de comparación.

2.2. Repotenciación de la mesa vibratoria

En la investigación previa del colado dinámico realizado por Pizango J. y Quinga J. se pudo observar cómo afecta la mesa vibratoria en la microestructura y propiedades mecánicas en el proceso de fundición, con una influencia principal en el incremento del tamaño de grano y una disminución de la presencia de la fase β' . Estos resultados se obtuvieron mediante el uso de un rango de frecuencias de 0 Hz a 9 Hz y con una amplitud de 0,2, por lo cual se plantea realizar un cambio en la amplitud y frecuencia de la mesa vibratoria.

Para un cambio en la amplitud de la mesa vibratoria es necesario diseñar el disco excéntrico que se encuentra en el equipo, mediante el cálculo de la amplitud que se requiere en el colado dinámico.

2.2.1. Amplitud de vibración

La amplitud a la cual la mesa vibratoria del laboratorio de fundición se encuentra trabajando es de 0,02 cm, ya que a amplitudes mayores se presenta un alto riesgo de falla y fatiga en el diámetro del motor de la mesa vibratoria (Proaño Sarauz & Sanchez de la Cruz, 2014), por lo cual en el estudio realizado en el presente trabajo de investigación, se escoge dos diferentes discos para trabajar en una misma frecuencia.

2.2.1.1. Espesor de los discos excéntricos

Como se mencionó anteriormente, para lograr un cambio en la amplitud usando una misma frecuencia, se requiere el cálculo del diseño de dos nuevos discos excéntricos, los cuales proporcionan nuevas amplitudes en la mesa vibratoria.

Para la masa del sistema se emplea 103,7 kg (Proaño Sarauz & Sanchez de la Cruz, 2014), para este caso se emplea una amplitud de $y = \pm 0,01$ cm:

$$mxe = \frac{Yx \sqrt{\left[1 - \left(\frac{w}{w_n}\right)^2\right]^2 + (2\xi x \left(\frac{w}{w_n}\right))^2} x M}{\left(\frac{w}{w_n}\right)^2} \quad (\text{Ec 2.1})$$

$$mxe = \frac{0,01x \sqrt{[1 - (3)^2]^2 + (2 x 1,65x10^{-7}x3)^2} x 103,7}{3^2} \quad (\text{Ec 2.2})$$

$$mxe = 0,922 \text{ kg.cm}$$

Los nuevos discos excéntricos serán fabricados a partir A-36 que es el mismo material usado para el disco excéntrico que se encuentra trabajando en la mesa vibratoria, y también la separación entre centros será de 1,5 cm, con lo cual se logra una excentricidad de $e = 3,35$ cm como se muestra en la Figura 2.1:

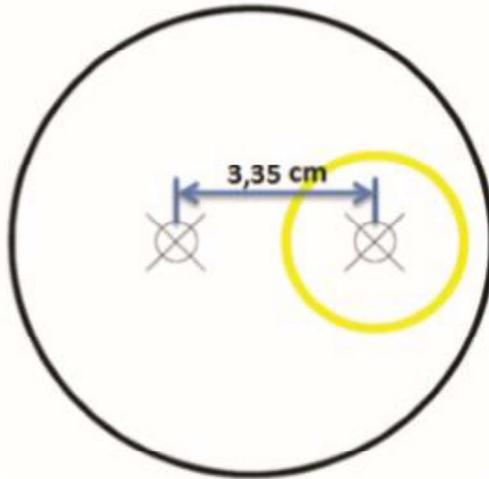


Figura 2.1. Esquema de la excentricidad de los discos.
Fuente: (Proaño Sarauz & Sanchez de la Cruz, 2014).

En la ecuación 2.3 se reemplaza la excentricidad de los centros dada:

$$m = \frac{0.922 \text{ kg.cm}}{3.35 \text{ cm}} = 0,275 \text{ kg}$$

La masa se lo puede representar con la siguiente ecuación:

$$m = V \times \rho \quad (\text{Ec 2.4})$$

En donde V es el volumen del cuerpo, y ρ es su densidad. De esta manera se tiene:

$$V = A \times t \quad (\text{Ec 2.5})$$

Donde A es el área del disco excéntrico, y t es el espesor que se desea encontrar.

Reemplazando la ecuación 2.5 en la ecuación 2.4, se obtiene:

$$m = A \times t \times \rho \quad (\text{Ec 2.6})$$

De la ecuación 2.6 se puede despejar el espesor del disco excéntrico que debemos determinar:

$$t = \frac{m}{A \times \rho} \quad (\text{Ec 2.7})$$

El área del disco excéntrico será:

$$A_{disco} = \pi \times R^2 \quad (\text{Ec 2.8})$$

El disco de acero tiene un radio de $R= 4,5 \text{ cm}$, por lo que el área tendría un valor de:

$$A_{disco} = 63,62 \text{ cm}^2$$

Se reemplaza los datos en la ecuación 2.7:

$$t = \frac{0,275 \text{ kg}}{63,62 \text{ cm}^2 \times 7,8 \times 10^{-3} \text{ kg/cm}^3} = 0,554 \text{ cm}$$

Este es el espesor que debe tener el disco excéntrico para lograr una amplitud de 0,01 cm en el sistema mesa-molde.

Este cálculo es exactamente igual para obtener el espesor que nos permita obtener una amplitud de 0,015 cm. A continuación, se muestra los valores obtenidos en la Tabla 2.1:

Tabla 2.1 Resultado de espesores para cada amplitud de vibración.

ω (rpm)	1020	1020	1020
ω (rad/s)	106,81	106,81	106,81
Amplitud Y (cm)	0,01	0,015	0,02
k (kg/cm)	134,14	134,14	134,14
Δ_{est} (cm)	0,77	0,77	0,77
Amortiguamiento ξ	0,07	0,07	0,07
m x e (kg.cm)	0,92	1,30	1,85
Excentricidad e (cm)	3,35	3,35	3,35
m (kg)	0,28	0,41	0,55
D (cm)	9	9	9
Espesor t (cm)	0,6	0,8	1,2

Fuente: (Propia)

2.2.1.2 Diagrama de Bode.

Para determinar las amplitudes a las cuales se encuentra trabajando la mesa vibratoria a diferentes frecuencias y con diferentes discos, se hace uso del analizador de vibraciones ADQ del laboratorio de análisis de esfuerzos de la EPN, cuyos resultados son comparados con la parte teórica del sistema dado por el diagrama de Bode obtenido en el programa Matlab.

Partiendo de la ecuación del movimiento del sistema (Ec.1.5), obtenemos la función de transferencia:

$$M\ddot{y} + c\dot{y} + k_v y = F_0 \cos wt$$

$$M[Y(S)S^2 - y(0)S - \dot{y}(0)] + cY(S)S - y(0) + k_v Y(S) = U(S)$$

Para la función de transferencia las condiciones iniciales son iguales a cero, por lo tanto, la ecuación de la función de transferencia se reduce a:

$$Y(S)[MS^2 + cS + k_v] = U(S)$$

Dado que la función de transferencia viene dada por la señal de entrada sobre la señal de salida se tiene:

$$G(S) = \frac{Y(S)}{U(S)}$$

$$G(S) = \frac{1}{[MS^2 + cS + k_v]}$$

Reemplazando los datos de la maquina se tiene:

$$G(S) = \frac{1}{[104.251 S^2 + 1.22 \times 10^{-3} S + 188000]}$$

Por lo que el diagrama de Bode para el disco de 0.55 kg en Matlab se presenta de la siguiente manera

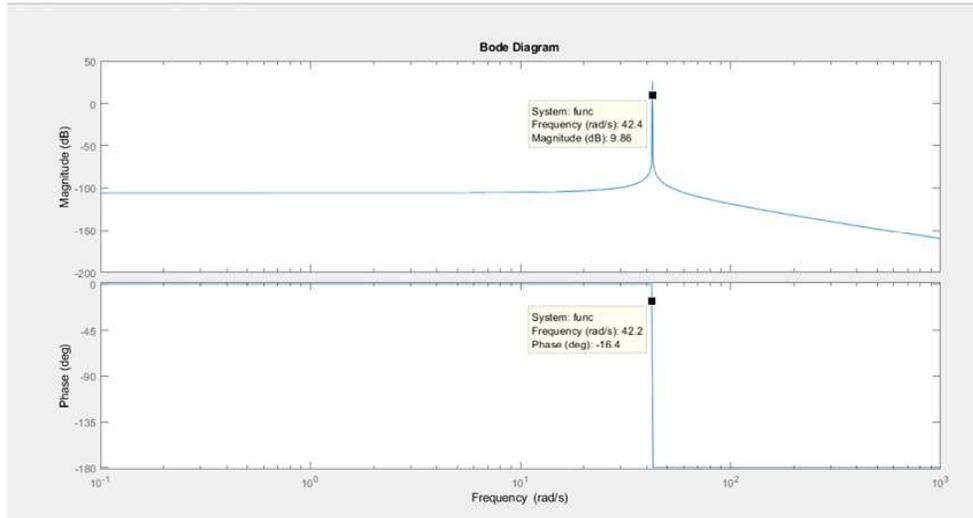


Figura 2.2. Diagrama de Bode (Disco 0.55g).
Fuente: (Propia)

Para los discos de 0.28 y 0.41 kg, el diagrama de Bode se presentan en el Anexo VII.

El uso del analizador de vibraciones arrojó los datos experimentales de la mesa vibratoria, con los cuales se obtuvo el grafico de frecuencias vs amplitud, además se logró determinar las amplitudes a las cuales la mesa se encuentra trabajando al momento de fundir las probetas en las diferentes condiciones dinámicas.

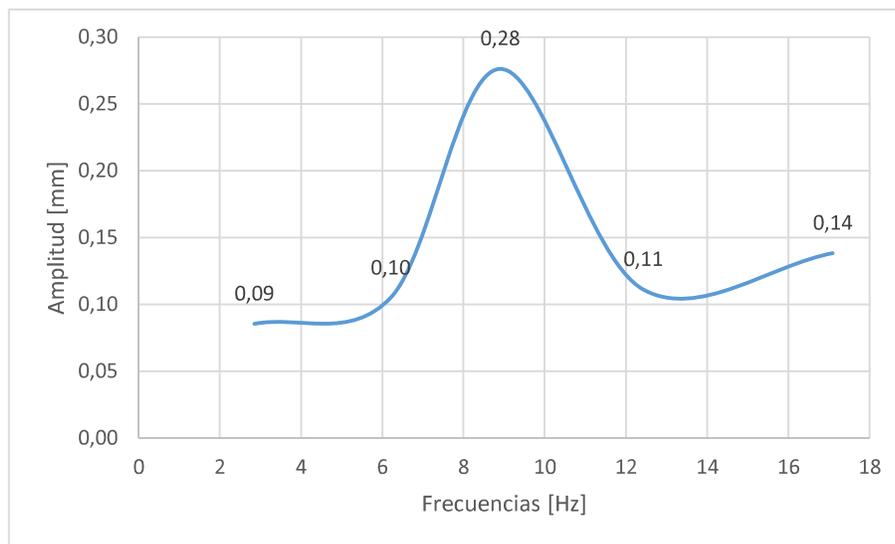


Figura 2.3. Frecuencia vs Amplitud (Disco 0.55kg).
Fuente: (Propia)

Para los discos de 0.28 y 0.41 kg, el diagrama de frecuencias vs amplitud se presentan en el Anexo VIII.

Mediante el uso del programa MAINTraQ Analyzer el cual proporciona una hoja de cálculo en Excel con los datos experimentales a los cuales se encuentra trabajando la mesa vibratoria al momento de fundir, se logra obtener las amplitudes usadas en la fundición de las probetas. Estos datos se encuentran presentes en el Anexo IX.

El comportamiento del sistema se puede observar en la Figura 2.2, el cual presenta el diagrama de Bode con las gráficas de ganancia y fase. Con respecto al diagrama de fase se nota un desfase en el sistema correspondiente a -180° a partir de 42,2 rad/s de frecuencia, por otro lado, en la gráfica de ganancia se puede observar un pico, ya que el sistema es poco amortiguado, esta ganancia en la amplitud se da a una frecuencia de 42,2 rad/s o 6,72Hz. En la parte experimental que se muestra en la Figura 2.3, se evidencia que existe un cambio en la amplitud a medida que se aumenta la frecuencia, la mayor amplitud se obtiene a una frecuencia alrededor de los 8,5 Hz.

Comparando las dos gráficas el comportamiento del sistema es similar, pero las mayores ganancias en la amplitud en cada gráfica se dan en diferentes frecuencias, esta variación puede ocurrir ya que al obtener las mediciones de amplitudes con el analizador de vibraciones, solo se hicieron en frecuencias determinadas, otra de las razones por las cuales se ven afectados estos dos diagramas, se debe a que el diagrama de bode es realizado de un sistema ideal, mas no de un sistema real.

2.2.2. Características de forma de la mesa vibratoria

La mesa vibratoria constaba de dos elementos, uno la máquina vibratoria y la segunda el panel de control, totalmente independientes como se puede observar en la Figura 2.4. Dicha máquina no tiene un lugar fijo en el laboratorio de fundición, para su uso se debe trasladar de un lugar a otro.



Figura 2.4. Mesa vibratoria en dos partes.
Fuente: (Propia)

Para mejorar la movilidad de la mesa vibratoria se unieron las dos partes, mediante una placa de 6 mm soldada en la base, añadiendo también cuatro ruedas que soportan 50 kg cada una. El traslado de la máquina es más fácil, más seguro para el operante.



Figura 2.5. Mesa vibratoria actual.
Fuente: (Propia)

2.3. Frecuencias a usarse

En estudios realizados por Pizango Veintimilla y Quinga Vega (2018), en una aleación de latón de libre maquinado bajo colado dinámico muestra un cambio en las propiedades del metal bajo ciertas condiciones como se muestra en la Tabla 2.2:

Tabla 2.2. Propiedades mecánicas de probetas de latón.

Identificación	Frecuencia	Amplitud	Dureza Promedio	Carga Máxima	Resistencia a la tracción	Alargamiento
Probeta	[Hz]	[mm]	[HRB]	[N]	[Mpa]	[%]
CE	0	0,2	30,32	33,47	284,55	24,25
CD1	9,78	0,2	27,91	32,25	272,30	19,20
CD2	14,73	0,2	20,11	23,84	196,60	12,70
CD3	19,63	0,2	12,13	22,20	187,40	10,70

Fuente: (Pizango Veintimilla & Quinga Vega, 2018)

Según los mismos estudios, en un rango superior a 9,78 Hz a una amplitud de 0,2 mm presenta una disminución notable de las propiedades mecánicas en las probetas, mientras que en un rango de 0 Hz a 9,78 Hz existe una estrecha diferencia en las propiedades mecánicas respecto a la condición estática obteniendo mejoras en las propiedades mecánicas de las probetas (Pizango Veintimilla & Quinga Vega, 2018). Por lo que se opta por seleccionar frecuencias de vibración en un rango de 0 Hz a 9,78 Hz. Los valores de frecuencia y amplitudes seleccionados se muestran en la Tabla 2.3:

Tabla 2.3. Valores de frecuencia y amplitudes seleccionados.

Identificación de condición de colado	Velocidad aplicada [RPM]	Frecuencia [Hz]	Amplitud [mm]
Condición estática: CE	0	0	0
Condición dinámica 1: CD1	180	3	0,02
Condición dinámica 2: CD2	180	3	0,01
Condición dinámica 3: CD3	180	3	0,09
Condición dinámica 4: CD4	360	6	0,31
Condición dinámica 5: CD5	360	6	0,05
Condición dinámica 6: CD6	360	6	0,10
Condición dinámica 7: CD7	540	9	0,09
Condición dinámica 8: CD8	540	9	0,21
Condición dinámica 9: CD9	540	9	0,28

Fuente: (propia)

2.4. Selección del latón

El latón posee una amplia variedad, los cuales se usan en el mercado, cada una posee diferentes propiedades y aplicaciones. La selección del latón a usarse está en función de las características requeridas de maquinabilidad. En la figura 2.6, se puede notar como el latón de libre maquinado varía sus características con el cambio de los porcentajes de Pb y Cu. (Proaño Sarauz & Sanchez de la Cruz, 2014).

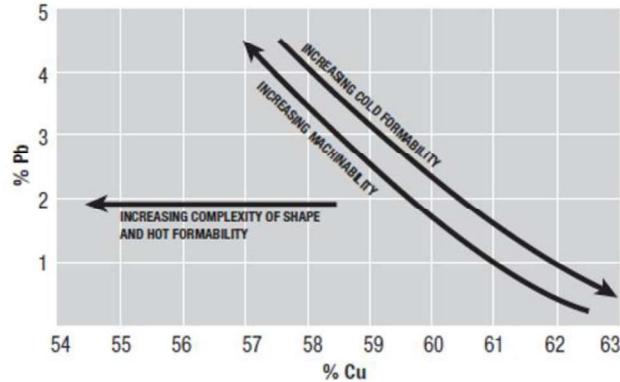


Figura 2.6. Efecto de cobre y plomo en el latón de libre maquinado.

Fuente: (Copper, Development, & Association, 1996)

Entre los aspectos importantes que se toma en cuenta en la selección del latón es el porcentaje de cobre y zinc que se requiere para mejorar la maquinabilidad del material y disminuir su conformado en frío, y al mismo tiempo mejorar su conformado en caliente. (Copper, Development, & Association, 1996). Al tener en cuenta que el latón de libre maquinado posee un 58% de Cu y 39% de Zn y que en el mercado se encuentra únicamente latones con un porcentaje menor al 50% de Zn, el latón a fundirse tendrá un porcentaje en peso de plomo, aluminio o níquel, de esta manera facilitar el maquinado de las probetas que se desea extraer. (Pizango Veintimilla & Quinga Vega, 2018).

Otro aspecto importante a tomar en cuenta al momento de elegir el material es la disponibilidad que se tiene en el mercado en nuestro país. El material elegido se trata de un latón $\alpha+\beta$. En la Tabla 2.4. se muestra el latón a usarse:

Tabla 2.4. Composición química del Latón a usarse.

Designación comercial	Composición química		
	% Cu	%Zn	%Sn
Latón de libre maquinado	53- 60	40	1- 1,50

Fuente: (Propia)

La aleación seleccionada se trata de un latón $\alpha+\beta'$, por la facilidad de ser maquinado, y por poseer propiedades mecánicas óptimas para trabajos industriales, las dos fases presentes en este tipo de latón nos ayudan a comparar los cambios en la microestructura que se pueden presentar, y analizar las diferentes propiedades mecánicas que se obtendrán en los ensayos de tracción y durezas, en las probetas obtenidas a diferentes condiciones, en las fundiciones.

Por otra parte, al tener una fase β' , este material no presenta una gran deformidad en frío, por un aumento en las propiedades mecánicas de dureza y de la resistencia a la tracción, por esta razón este material se encuentra fácilmente en el mercado debido a que se lo utiliza en grifería, construcción de estructuras y monumentos.

2.5. Procesos de fundición de las probetas

Para el proceso de fundición de las probetas, se deberá seguir una serie de pasos que se detallan en la Figura.2.7.



Figura 2.7. Proceso de obtención de probetas.
(Fuente: Propia)

2.5.1. Preparación del horno de fundición

El horno a usarse para la obtención de las probetas, se trata del horno a diésel del laboratorio de fundición de la Escuela Politécnica Nacional, con las características que se detallan en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5 Características del horno de fundición.

Características del horno.		Imagen
Altura externa	1,47 [m]	
Altura interna	0,43 [m]	
Diámetro exterior	0,98 [m]	
Diámetro interior	0,5 [m]	
Combustible	Diésel	
Temperatura máxima	1000 °C	

(Fuente: Propia)

2.5.2. Curado del crisol

Antes de comenzar la fundición del metal, se debe realizar un curado del crisol a usarse el cual consiste en eliminar humedad e impurezas presentes, que puedan afectar a la fundición, para esto se debe calentar el crisol en el interior del horno en un tiempo promedio de una hora.

2.5.3. Cantidad de diésel para el horno

El combustible que se va a usar para el horno es diésel. Tomando en cuenta el curado del crisol se considera un consumo aproximado de 28 litros por hora, considerando que se planea fundir 7 horas aproximadamente, la cantidad total de combustible usada será de 196-200 litros.

2.5.4. Molde a usarse

El molde a usarse para la fundición será un molde de resina, ya que se tiene un peso menor comparado a un molde metálico, sirve para la fundición del latón. La temperatura de precalentamiento oscila de 100°C a 300°C. Tiene algunas ventajas las cuales son:

- Acabados superficiales aceptables.
- Las probetas estarán horizontalmente, para un enfriamiento constante en toda la superficie.

- El molde es reusable.

2.5.5. Cálculo y diseño del sistema de alimentación

Para la obtención de molduras de calidad, una de las condiciones más importantes es el diseño del sistema de alimentación. Dicho sistema nos permite suministrar el material fundido con la mínima turbulencia, en el menor tiempo posible, asegurando dar un buen llenado del molde, obteniendo una moldura de dimensiones exactas, sin defectos superficiales, siendo mínimo el metal a usarse. (Titov & Stepánov, 1981).

2.5.5.1. Cálculo de la altura de presión del metal durante el llenado

La altura estática de presión se determina:

$$H_s = H_C - \frac{P^2}{2 * C} \quad (\text{Ec. 2.9})$$

Dónde:

H_s = Altura estática [mm].

H_C = Altura del canal vertical desde el lugar de suministro de la masa fundida al molde [mm].

C = Altura de la moldura [mm].

P = Altura de la moldura del lugar de suministro de la masa fundida al molde [mm].

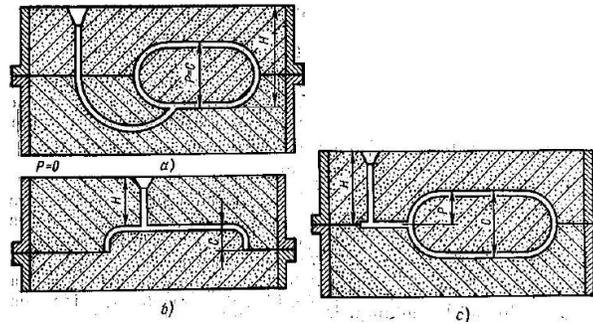


Figura 2.8. Dimensionamiento de la altura estática.
Fuente: (Titov & Stepánov, 1981)

Para nuestro caso $H_C = 75\text{mm}$; $C = 30\text{mm}$; $P = 15\text{mm}$

$$H_s = 75 - \frac{15^2}{2 * 30}$$

$$H_s = 71.25 \text{ mm}$$

2.5.5.2. Determinación de la velocidad y tiempo de llenado

El tiempo y la velocidad de llenado son dos factores importantes en la fundición de un material, que influye directamente en su calidad final.

El material, la complejidad de la fundición, grosor de la sección transversal a ser alimentada y tamaño de fundición, son variables que influyen en el tiempo de llenado. Si el tiempo de llenado se prolonga el colado alcanzaría un sobrecalentamiento, mientras si se acorta el flujo del material fundido sería muy turbulento. Las siguientes ecuaciones son de carácter netamente experimental y nos permitirán obtener el tiempo óptimo de llenado:

$$R = b * \sqrt{W} \quad (\text{Ec. 2.10})$$

Donde

R = Tasa de vertido [Kg/s].

b = Constante de la ecuación dependiendo del grosor de las paredes de la pieza [mm].

W = Peso total de la pieza en bruto, tomando en cuenta mazarotas, alimentación [Kg].

Tabla 2.6 Valores de la constante b .

Espesor	<6[mm]	6-12[mm]	>12[mm]
b	0,99	0,87	0,47

Fuente: (Ochoa Larreátegui & Jiménez Viscarra, 2018)

El grosor de las paredes de nuestras probetas es de 30 mm por lo tanto el valor de b es de 0,47. Se tiene un peso aproximado de 10 kg, donde se incluye el peso de los alimentadores, y del elemento.

$$R = 0,47 * \sqrt{10}$$
$$R = 1,49$$

Hay que tomar en cuenta valores experimentales respecto al material y a la forma del canal vertical, para ello se calcula la tasa de vertido ajustado (R_a):

$$R_a = \frac{R}{f * k} \quad (\text{Ec. 2.11})$$

k = Para materiales que no son fundición gris o maleable, puede ser 1.

f = 0,88-0,90 para canales cónicos; 0,70-0,75 para canales rectos.

Para el presente trabajo, $k = 1$ ya que se trabajará con latón, mientras $f = 0,75$.

$$R_a = \frac{1,486}{0,75 * 2}$$
$$R_a = 0,99 \left[\frac{kg}{s} \right]$$

Entonces el tiempo óptimo de llenado para nuestro molde sería:

$$t = \frac{W}{R_a} \quad (\text{Ec. 2.12})$$
$$t = \frac{10}{0,99}$$
$$t = 10,10s$$

2.5.5.3. Dimensionamiento del bebedero

Para garantizar el correcto llenado del molde, se requiere dimensionar el ducto o ductos por donde fluirá el material fundido. Para esto se necesita calcular:

Área de la sección transversal del canal de ataque:

$$A_c = \frac{W}{d * t * c_c * \sqrt{2 * g * H_s}} \quad (\text{Ec. 2.13})$$

A_c = Área de la sección transversal del canal de ataque.

W = Peso total de la fundición [kg].

d = Densidad del metal fundido [kg/mm³].

t = Tiempo óptimo de vertido [s].

c_c = Coeficiente de eficiencia de alimentación.

g = Gravedad [m/s²]

H_s = Altura estática [mm].

Tabla 2.7 Coeficiente de eficiencia de alimentación.

Tipo del sistema	Estrangulador cónico	Estrangulador recto
Un solo canal con una sola entrada de alimentación	0,90	0,73
Dos canales con múltiples entradas de alimentación	0,90	0,73
Dos canales con múltiples entradas de alimentación con curvas a 90°	0,85	0,70

Fuente: (Ochoa Larreátegui & Jiménez Viscarra, 2018)

La densidad aproximada del latón que se va a usar es $d=8,7$ [kg/mm³], mientras el coeficiente según la Tabla 2.7 es $C_c=0.73$:

$$A_c = \frac{10}{8,7 * 10^{-6} * 10,1 * 0,73 * \sqrt{2 * 9800 * 71,25}}$$

$$A_c = 131,92 \text{ mm}^2$$

Nuestra sección transversal es circular por lo tanto el radio es:

$$A_c = \pi * r_c^2 \quad (\text{Ec. 2.14})$$

$$r_c = 6,50 \text{ mm}$$

2.5.5.4. Dimensionamiento de los canales y entradas de alimentación

El cálculo de canales de alimentación depende de una relación llamada “Gating Ratios”, que se refiere a las relaciones de las áreas transversales del bebedero, canal de alimentación y entrada de alimentación.

Las relaciones recomendadas para diferentes materiales se encuentran en la siguiente tabla:

Tabla 2.8 Relaciones de las áreas transversales.

Aluminio	1:2:1
	1:3:3
	1:4:4
Bronce al Aluminio	1:2,88:4,8
Latón	1:1:1
	1:1:3
	1,6:1,3:1
Cobre	2:8:1
	3:9:1
Fundición dúctil	1,15:1,1:1
	1,25:1,13:1
Fundición gris	2:1,5:1
	2:3:1
Magnesio	1:2:2
	1:4:4
Fundición maleable	1:2:9,5
	1,5:1:2,5
	2:1:4,9
Acero	1:1:7
	1:2:1
	1:2:1,5

Fuente: (Rao, 2013)

La relación de los elementos Bebedero: Canal de Alimentación: Entrada de Alimentación, para un sistema no presurizado usando un material de latón es 1,6:1,3:1.

Por lo tanto, el área total sección transversal del bebedero es:

$$A_b = A_c * 1,6 \quad (\text{Ec. 2.15})$$

$$A_b = 131,2 * 1,6$$

$$A_b = 211,07 \text{ mm}^2$$

Se tendrá tres canales de alimentación, el área transversal de un canal es:

$$A_{b1} = A_b / 3 \quad (\text{Ec. 2.16})$$

$$A_{b1} = \frac{211,07}{3} = 70,36 \text{ mm}^2$$

Asumiendo que el área transversal del bebedero es semicircular su radio es:

$$A_{b1} = \frac{\pi * r_b^2}{2} \quad (\text{Ec. 2.17})$$

$$r_b = 6,70 \text{ mm}$$

2.5.6. Fabricación del molde de resina

Para la fabricación del molde se usó una resina fenólica uretano, y realizaron algunas pruebas, con una muestra de 500 gr de arena sílice con diferentes porcentajes de resina que se muestra la Tabla 2.9. Las resinas se obtuvieron del laboratorio de fundición de la facultad de Ingeniería Mecánica.

Tabla 2.9. Pruebas.

Prueba	Parte A (g)	Parte B (g)	Catalizador (g)	Observación
1	3,50	3,50	1	Información AkzoNobel
2	7	5	1	Frágil
3	15	6	3	Frágil
4	15	6	6	Frágil
5	15	6	10	Frágil
6	15	15	15	Frágil
7	30	12	15	Dureza aceptable
8	30	20	15	Aceptado

Fuente (Propia)

Se pudo comprobar que el porcentaje de resina, que cumple con las propiedades del proyecto para el molde que se va usar es: 6% en peso de la arena sílice para la parte A, 4% en peso de arena sílice para la parte B y, 3% en peso de arena sílice para el catalizador.

2.5.7. Sobredimensionamiento por contracción

Debido al cambio de estado físico de líquido a sólido que sufre el metal en el proceso de fundición, estos se contraen considerablemente debido a las vibraciones interatómicas las cuales son amplificadas por el aumento de energía, al aumentar la temperatura, para poder llegar al estado líquido, y el posterior enfriamiento para obtener la pieza sólida final. (Jiménez Viscarra Víctor Javier, 2018).

La contracción ocurre en tres pasos:

1. Contracción líquida durante el enfriamiento antes de la solidificación.
2. Contracción durante el cambio de líquido a sólido, conocido como contracción por solidificación.
3. Contracción térmica de la fundición solidificada durante el enfriamiento hasta la temperatura ambiente. (Groover, 1997).

Tabla 2.10. Valores de contracción para la gran mayoría de metales.

Material	Dimensiones del modelo [mm]	Espesor de la sección [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
Hierro Maleable	---	6	11,8
	---	9	10,5
	---	12	9,2
	---	15	7,9
	---	18	6,6
	---	22	4,0
	---	25	2,6
Acero al Carbón	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: (Rao, 2013).

Para el bronce se tiene un valor de 20 a 23 mm/m por lo que hemos decidido tomar un promedio de 21,5 mm/m, esta contracción es uniforme en toda la pieza.

El factor de dimensionamiento por contracción está dado por el siguiente calculo:

$$\Delta x = 20 \left[\frac{mm}{m} \right] * \frac{L}{1000} [m] \quad (\text{Ec. 2.18})$$

$$\Delta x = \frac{20 * L}{1000} mm \quad (\text{Ec. 2.19})$$

Longitud final tomando en cuenta la contracción del metal:

$$Lf = L + \Delta x \quad (\text{Ec. 2.19})$$

$$Lf = \frac{1020 * L}{1000} \quad (\text{Ec. 2.20})$$

El sobredimensionamiento uniforme en todas direcciones está dado por:

$$f = \frac{Lf}{L} \quad (\text{Ec.2.21})$$

$$f = \frac{\frac{1020 * L}{1000}}{L}$$

$$f = 1,020$$

2.5.8. Sobredimensionamiento por maquinado

Debido a que el acabado superficial de las piezas obtenidas por fundición es de baja calidad, se procede a maquinar las superficies para de esta manera darles funcionalidad a las piezas. Por lo cual, se toma en cuenta tolerancias de material adicional necesarias para el maquinado.

Las tolerancias típicas para maquinado y acabados superficiales se presenta en la Tabla 2.11:

Tabla 2.11: Tolerancias típicas para acabados superficiales.

Proceso de fundición	Tamaño de la parte	Tolerancias		Rugosidad superficial	
		[pulg]	[mm]	[μpulg]	[μm]
Fundición de arena				250-1000 (6 – 25)	
Aluminio	Pequeño	±0,020	(±0,5)		
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)		
	Grande	±0,080	(±2,0)		

Fuente: (Groover, 1997)

2.5.9. Determinación de las dimensiones de la caja de moldeo

Para determinar las dimensiones de la caja de moldeo se toma en cuenta ciertos factores que van a intervenir directamente como su ubicación, medidas de mazarotas, dimensiones del sistema de alimentación.

Para la caja de moldeo se necesita tomar en cuenta el espesor de la arena entre la pieza y las paredes para asegurar una resistencia a las presiones estáticas y dinámicas del metal fundido. (Jiménez Viscarra Víctor Javier, 2018).

Tabla 2.12: 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 de 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: (Goyos, pag 61.)

El ancho máximo de las probetas es aproximadamente de 30 mm en posición horizontal, por lo que la caja de moldeo tendrá una altura de 150 mm.

Para el ancho de la caja se tomará un valor de 400 mm, y profundidad de 440 mm.

2.5.10. Características del fundente

El fundente usado es el bórax el cual se usa en la fabricación de aceros y materiales no ferrosos, el cual se emplea 200 gr por cada 10 kg de latón fundido.

Este fundente presenta diversas ventajas que se mencionan a continuación:

- Reduce la temperatura de fusión.
- Aumenta la fluidez del metal líquido.
- Reduce la corrosión del material refractario y del horno.
- Mantiene limpia la colada durante la fundición y el vertido.

2.5.11. Cantidad de latón fundido

El latón que se va a usar se trata de un latón ya procesado, lo cual nos garantiza que todas las fundiciones tengan una misma composición, para lo cual se usa 12 kg de latón para cada fundición.

2.5.12. Temperatura de colado

La temperatura de fusión del latón está en el rango de 930-980°C, por lo que se requiere una temperatura aproximada de 1000°C para que el material llegue a su estado líquido al molde de arena y se solidifique dentro de él.

2.5.13. Tiempo de colado

El tiempo de colado del metal fundido debe ser corto de tal forma que el material fluya por el molde con rapidez y de mejor manera sin tener problemas en la fundición, además se debe tener en cuenta el precalentamiento del molde de arena para obtener mejores resultados.

2.5.14. Tiempo de extracción del molde

Para la extracción de las probetas del molde permanente se espera que el material fundido se solidifique en la máquina vibratoria, por lo que el tiempo de extracción requerido es de 45 a 60 min.

2.5.15. Tiempo y tipo de enfriamiento

El tiempo de enfriamiento se entiende como el tiempo requerido para poder manipular las piezas fundidas sin dificultad, este tiempo es un aproximado de 15-20 minutos.

2.6. Obtención de probetas

Después de la fundición, obtenidas ya las probetas desarrollaremos ensayos escritos a continuación, para lo cual se necesitará preparar las probetas:

- Ensayo de tracción, con NORMA ASTM E8.
- Ensayo Rockwell de dureza.
- Ensayo de micro estructura.
- Composición química.

2.6.1. Ensayo de tracción

El ensayo de tracción es uno de los más comúnmente utilizando. Es un ensayo mecánico donde el material ensayado se deforma hasta la rotura de la probeta, con la acción de una fuerza uniaxial a lo largo del eje principal, aumentando de manera constante. (Guerrero, 2011).

Las probetas a ensayar deben presentar dimensiones especificadas según la norma ASTM E8, las cuales se presenta en la Tabla 2.13.

Tabla 2.13 Descripción de probetas.

Designación	Descripción	Espécimen
G	Longitud calibrada	$50 \pm 0,1$ mm
D	Diámetro	$12,5 \pm 0,2$ mm
R	Radio filete	10mm
A	Longitud de la sección reducida	56mm
L	Longitud total aproximada	145mm
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 extremos 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 1/4 - 10 UNC - 2A, longitud de la rosca recomendada 1 pulgada.	

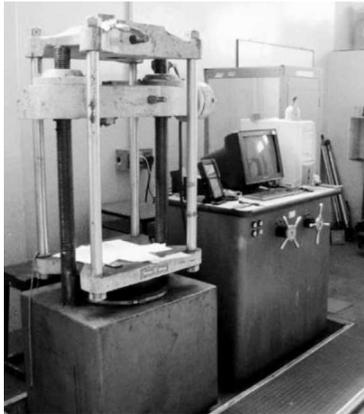
Fuente: (Norma ASTM E8)

2.6.1.1. Equipo para ensayo de tracción

La facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional dispone del Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones, el cual tiene el equipamiento para realizar ensayos de tracción. Los instrumentos para el ensayo son:

- Un marcador metálico.
- Un calibre de rey (apreciación 0,01mm).
- Máquina universal de ensayos, cuyas características están especificadas en la Tabla 2.14.

Tabla 2.14. Descripción máquina universal de ensayos.

Máquina universal de ensayos	
FABRICANTE: Tinius Olsen	TIPO/MODELO: Super L-120
ORIGEN FABR.: USA	APLICACIÓN DE CARGA: Hidráulico
ORIGEN PROVEEDOR: Tinius Olsen	ALMACENAMIENTO: LAEV
MEDICIONES: Altura: 2126 mm Ancho: 915 mm Espesor: 788 mm Peso: 2132 kg	
Datos Técnicos Generales Capacidad: 3000 kN Velocidad de ensayo: 0 – 766 mm/s	
	

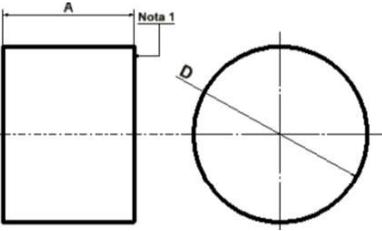
Fuente: (Propia)

2.6.2. Ensayo de dureza

Existen tres principios de comprobación de la dureza según: Brinell, Rockwell y Vickers. En este caso se trabajará con el método de comprobación según Rockwell, por la disponibilidad del equipamiento que existe en la Facultad de Ingeniería Mecánica, el cual nos permite la lectura directa del índice de dureza como diferencia de las profundidades de penetración en el reloj de comprobación.

Para realizar el ensayo se necesitará probetas cilíndricas, las cuales están detalladas en la Tabla 2.15.

Tabla 2.15. Probetas para ensayo de dureza.

Probeta		
	Designación	Valor
	A longitud mínima	15mm
	D diámetro mínima	25mm
	Nota 1. Desbastar las caras superior e inferior, deben ser paralelas	

Fuente: (Pizango Veintimilla & Quinga Vega, 2018)

2.6.2.1. Equipo para ensayo de dureza

Los ensayos de dureza se realizan en el Laboratorio de Metalografía, que se encuentra en la Facultad de Ingeniería Mecánica.

Para ello se necesita:

- Patrón de calibración Qualitest 66,27 +/- 1,0 HRB.
- Patrón de calibración Qualitest 47,59 +/- 1,0 HCR.
- Durómetro Rockwell, sus características se detallan en la Tabla 2.16.

Tabla 2.16. Descripción del durómetro Rockwell.

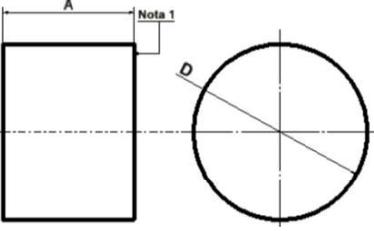
Durómetro Rockwell		
	Descripción	Especificación
	Marca	HRADROCKER
	Modelo	150.A
	Aplicación de carga	Sistema hidráulico
	Capacidad de carga	60, 100,150 kgf
	Indentador	Punta de acero de 1/6 in.

Fuente: (Pizango Veintimilla & Quinga Vega, 2018)

2.6.3. Ensayo de composición química

Los ensayos de composición química se realizarán con el objetivo de atestiguar que todas las probetas a ensayar contengan las mismas composiciones químicas, garantizando que las propiedades mecánicas no varíen por la diferencia de composición. Las probetas, las cuales se va a analizar la composición química serán cilíndricas y se detallan en la Tabla 2.17.

Tabla 2.17. Probetas para ensayo de composición química.

Probeta		
	Designación	Valor
	A longitud mínima	30 mm
	D diámetro mínima	25 mm

Fuente: (Pizango Veintimilla & Quinga Vega, 2018)

2.6.3.1. Equipo para ensayo de composición química

El laboratorio de Fundición que se localiza en la Facultad de Ingeniería Mecánica nos permite realizar ensayos de composición química. Dicho laboratorio tiene a su disposición el Espectrómetro de chisca, cuyas características están escritas en la Tabla 2.18.

Tabla 2.18. Descripción del Espectrómetro de chisca.

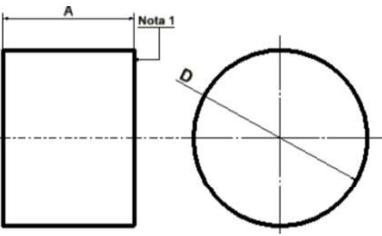
Espectrómetro de chisca		
	Descripción	Especificación
	Marca	BRUKER
	Modelo	Q210N
	Voltaje	100/240 V.
	Frecuencia	50/60 Hz.
	Peso	20 kg.

Fuente: (Pizango Veintimilla & Quinga Vega, 2018)

2.6.4. Ensayo de microestructura

El ensayo de microestructura nos permitirá observar y comparar los cambios microestructurales que se obtendrán en las diferentes fundiciones del latón, donde se verificara la influencia que se tiene al variar la amplitud y la frecuencia de vibración. Se va analizar las caras longitudinales y transversales de las probetas y comparar los cambios efectuados. El detalle de las probetas a analizar se encuentra en la Tabla 2.19.

Tabla 2.19. Probetas para ensayo de microestructura.

Probeta	
	Designación
	A longitud mínima
	D diámetro mínima
	Nota 1. Se requiere preparar las caras longitudinal y axial para su análisis.

Fuente: (Pizango Veintimilla & Quinga Vega, 2018)

2.6.4.1. Equipo para ensayo de microestructura

En la Facultad de Ingeniería Mecánica se encuentra el Laboratorio de Metalografía donde se realiza ensayos microestructurales, donde se dispone de los instrumentos necesarios que son:

- Sierras.
- Calibre pie de rey (apreciación 0,01 mm).
- Máquina desbastadora de disco, cuyas características están en la Tabla 2.20.
- Máquina desbastadora y pulidora FORCIMAT, sus especificaciones se detallan en la Tabla 2.21.

Tabla 2.20. Descripción de la Máquina desbastadora de disco.

Máquina desbastadora de disco		
	Descripción	Especificación
	Marca	BUEHKER
	Modelo	121-0M-84
	Voltaje	220 V.
	Frecuencia	50/60 Hz.
	Potencia del motor	0,75 HP.

Fuente: (Pizango Veintimilla & Quinga Vega, 2018)

Tabla 2.21. Descripción de la Máquina desbastadora y pulidora FORCIMAT.

Máquina desbastadora y pulidora FORCIMAT		
	Descripción	Especificación
	Marca	FORCIMAT
	Modelo	FORIPOL 2V
	Serie	N20161076
	Voltaje	220 V.
	Dimensiones	96x67x71 mm
	Potencia del motor	1 HP.

Fuente: (Pizango Veintimilla & Quinga Vega, 2018)

Para la determinación del tamaño de grano en las metalografías se usó el software “STREAM ESSENTIAL” en el laboratorio de Metalografía de la Escuela Politécnica Nacional. Este software proporciona diferentes módulos de trabajo para poder obtener información importante para el análisis metalográfico.

El módulo de Grain Intercept (Interpretación de Granos) sigue la norma ASTM E12, nos permite medir la longitud y el área promedio de los granos. En el Anexo V se detalla el procedimiento a seguir para determinar el tamaño de grano.

3. RESULTADO Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se muestran los resultados obtenidos en los ensayos citados en el capítulo anterior, se presenta en primer lugar el ensayo de la composición química el cual ayuda a representar y demostrar la influencia de cada una de las condiciones a las cuales fueron sometidas la probetas, posteriormente se analiza los ensayos usados para la caracterización de las propiedades mecánicas, finalizando con la discusión de la microestructura que presentan las probetas de las fundiciones realizadas a las diferentes condiciones dinámicas.

Tabla 3.1. Datos experimentales de las probetas.

Identificación		Velocidad del motor	Vibración		Temperatura	
			Frecuencia	Amplitud	Molde de arena-resina	Colado
Condición de colado	Probeta	[rpm]	[Hz]	[mm]	[°C]	[°C]
CE	CE-1	0	0	0	100	1000
	CE-2					
	CE-3					
CD1	CD1-1	180	3	0,02	100	1000
	CD1-2					
	CD1-3					
CD2	CD2-1	180	3	0,01	100	1000
	CD2-2					
	CD2-3					
CD3	CD3-1	180	3	0,09	100	1000
	CD3-2					
	CD3-3					
CD4	CD4-1	360	6	0,31	100	1000
	CD4-2					
	CD4-3					
CD5	CD5-1	360	6	0,05	100	1000
	CD5-2					
	CD5-3					
CD6	CD6-1	360	6	0,1	100	1000
	CD6-2					
	CD6-3					
CD7	CD7-1	540	9	0,09	100	1000
	CD7-2					
	CD7-3					
CD8	CD8-1	540	9	0,21	100	1000
	CD8-2					
	CD8-3					
CD9	CD9-1	540	9	0,28	100	1000
	CD9-2					
	CD9-3					

Fuente: (Propia)

3.1. Resultados

3.1.1. Ensayo de composición química

En la Tabla 3.2 se detalla los resultados en la composición química con los elementos más importantes de 3 muestras aleatorias (una por cada frecuencia usada) de las probetas obtenidas por fundición y a diferentes condiciones de frecuencia y amplitud.

Tabla 3.2. Composición química.

Componente	Muestra		
	M1	M2	M3
	Valor [%]	Valor [%]	Valor [%]
Zinc [Zn]	36,78	27,10	42,02
Cobre [Cu]	59,87	68,39	54,86
Plomo [Pb]	0,24	1,13	0,06
Estaño [Sn]	0,31	0,82	0,10
Manganeso [Mn]	0,56	0,37	0,78
Hierro [Fe]	1,08	0,62	1,14
Níquel [Ni]	0,26	0,79	0,15
Silicio [Si]	0,01	-	-
Aluminio [Al]	0,87	0,77	0,89
Total [%]	99,99	99,99	99,99

Fuente: (Propia)

3.1.2. Resultado de microestructuras

Después de haber realizado los ensayos de metalografías de las probetas seleccionadas se presentan los resultados en las microestructuras presentes en las funciones en las diversas condiciones seleccionadas.

a. Condición Estática

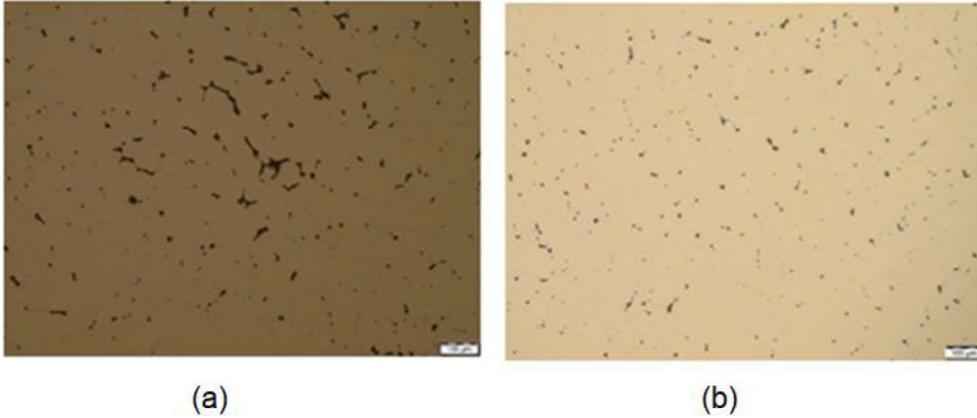


Figura 3.1. (a) CE-2 (b) CE-3. Aumento: 100X. Sin ataque químico
Se presentan manchas negras aleatorias siendo poros, las cuales se ubican en las probetas CE-2 y CE-3.
Fuente: (Propia)

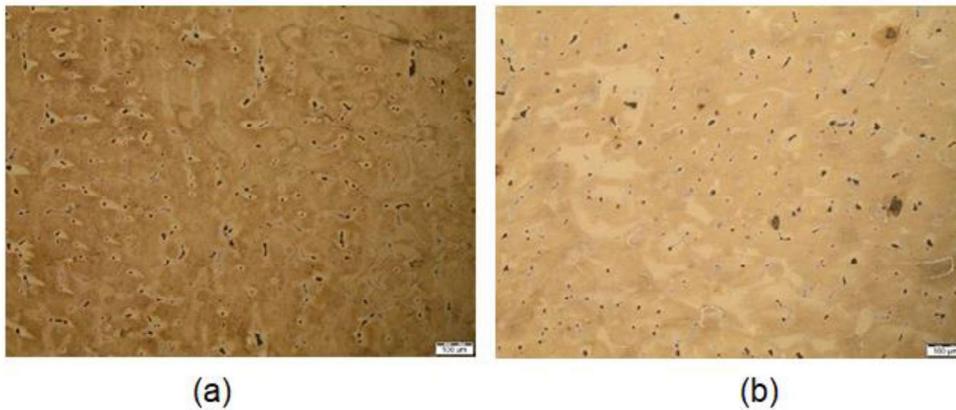
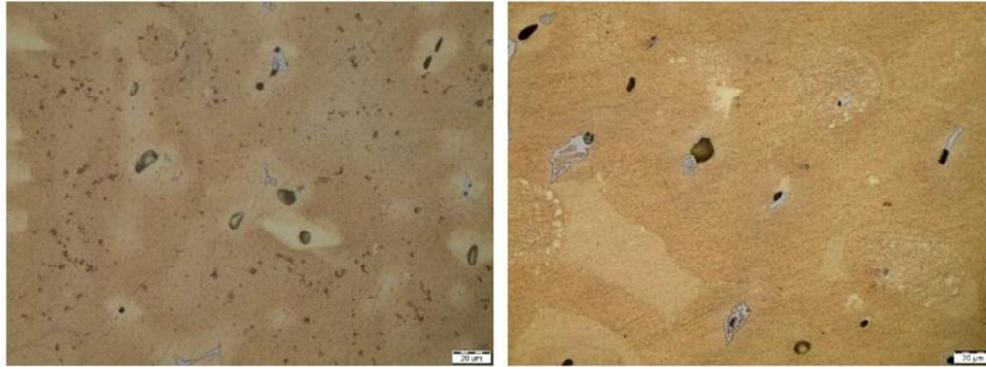


Figura 3.2. (a) CE-2 (b) CE-3. Aumento 100X. Con ataque químico.
Se puede observar claramente partículas de color negro que se presenta cuando hay existencia de microrechupes, plomo, hierro en las dos muestras, y la existencia de una sola fase alfa, cuyo cambio de coloración se debe a la velocidad de enfriamiento.
Fuente: (Propia)



(a)

(b)

Figura 3.3. (a) CE-2 (b) CE-3. Aumento 500X. Con ataque químico.

Se observa de mejor manera manchas negras que se da comúnmente por la existencia de micro rechupes, y elementos como el plomo y hierro, además se muestran pequeñas partículas de color gris a la mezcla de estaño y hierro revelado por el ataque químico. Del mismo modo la existencia de una sola fase alfa, cuyo cambio de coloración existe por la velocidad de enfriamiento.

Fuente: (Propia)

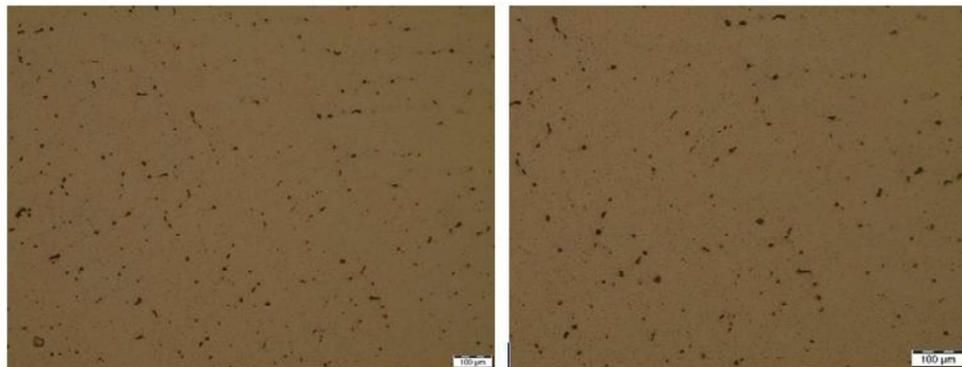
En la Tabla 3.3 se muestran el tamaño de grano que se obtuvo en las probetas fundidas en condiciones estáticas después de medir las macrografías que se presenta en el Anexo III.

Tabla 3.3. tamaño de grano CE.

Id.	No. De tamaño de grano ASTM, G	Diámetro promedio [mm]	Área promedio de grano [mm ²]
CE	M-8	2,25	5,04 x 10 ⁻³

Fuente: (Propia)

b. Condición dinámica 1



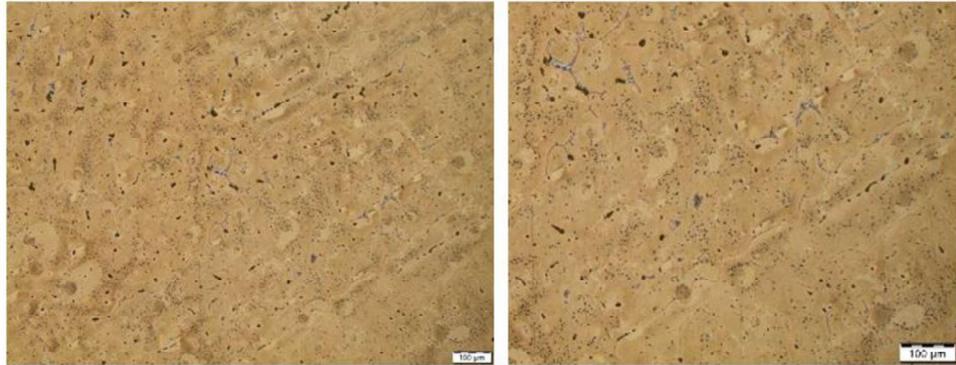
(a)

(b)

Figura 3.4.(a) CD1-2 (b) CD1-3. Aumento: 100X. Sin ataque químico.

Se presentan manchas negras de forma circular pertenecientes a poros y microrechupes, las cuales se ubican aleatoriamente en las probetas CD1-2 y CD1-3.

Fuente: (Propia)

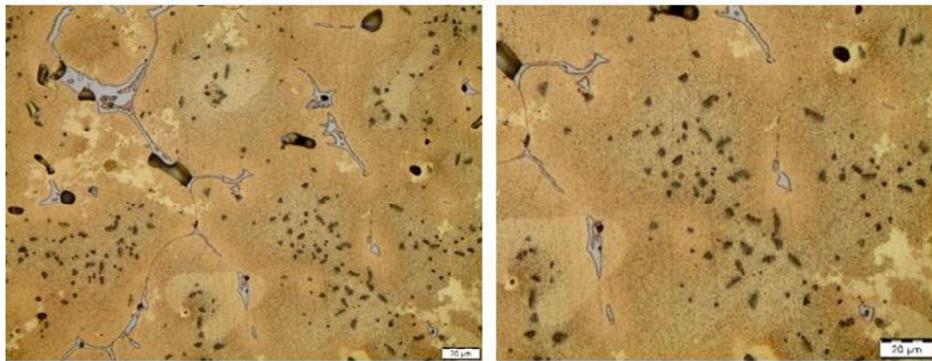


(a)

(b)

Figura 3.5. (a) CD1-2 (b) CD1-3. Aumento: 100X. Con ataque químico. Presentan manchas negras de forma asimétricas siendo microrechupes o poros, también presentes por la existencia de hierro y plomo, las cuales se ubican aleatoriamente en la fase alfa de las probetas CD1-2 y CD1-3.

Fuente: (Propia)



(a)

(b)

Figura 3.6. (a) CD1-2 (b) CD1-3. Aumento: 500X. Con ataque químico. Se observa partículas de color negro algunos de ellas por la presencia de elementos aleantes como el plomo y hierro. Algunas de las partículas de color negro pertenecen a microrechupes o poros. El estaño generalmente provoca la presencia de manchas de color más claro en este caso de color gris. En las probetas CD1-2 y CD1-3 evidencian una fase alfa, cuyo cambio de color se debe a la velocidad de enfriamiento.

Fuente: (Propia)

En la Tabla 3.4 se muestran el tamaño de grano que se obtuvo en las probetas fundidas en CD1 después de medir las macrografías que se presenta en el Anexo III.

Tabla 3.4. Tamaño de grano CD1.

Id.	No. De tamaño de grano ASTM, G	Diámetro promedio [mm]	Área promedio de grano [mm ²]
CD1-2	M-7	3,17	10,08 x10 ⁻³

Fuente: (Propia)

c. Condición dinámica 2

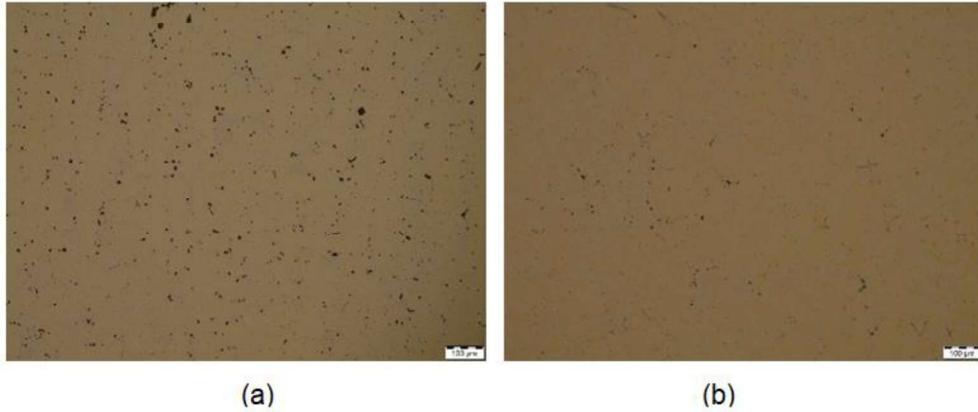


Figura 3.7. (a) CD2-1 (b) CD2-2. Aumento: 100X. Sin ataque químico
Se presentan manchas negras de forma circular por la presencia de poros, las cuales se ubican aleatoriamente en las probetas CD2-1 y CD1-2.

Fuente: (Propia)

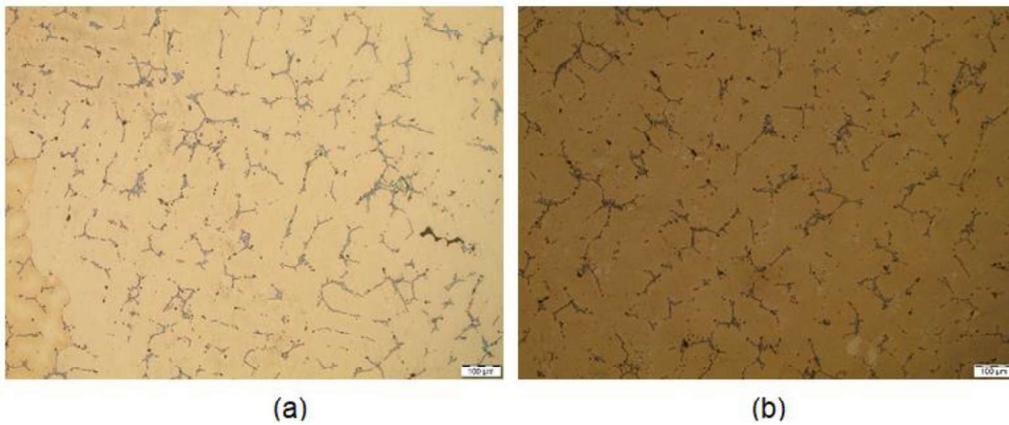
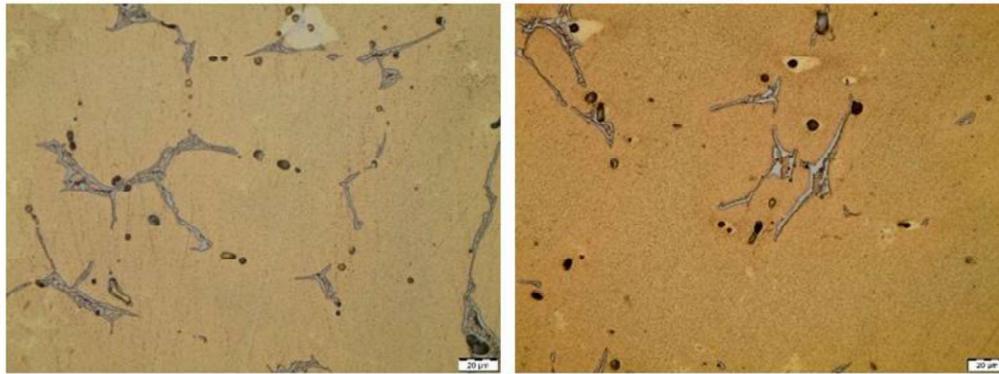


Figura 3.8. (a) CD2-1 (b) CD2-2. Aumento: 100X. Con ataque químico
En las probetas CD2-1 CD2-2 existe una gran presencia de líneas grises, las cuales están presentes por la presencia de estaño. Se observa la presencia de la fase alfa.

Fuente: (Propia)



(a)

(b)

Figura 3.9. (a) CD2-1 (b) CD2-2. Aumento: 500X. Con ataque químico. En las probetas CD2-1 CD2-2 existe una gran presencia de líneas grises, las cuales se deben a la presencia de estaño en el material. Se puede observar de mejor manera la presencia de plomo, hierro y microrechupes los cuales se presenta de color más oscuro y de menor cantidad. Se observa la presencia de la fase alfa.

Fuente: (Propia)

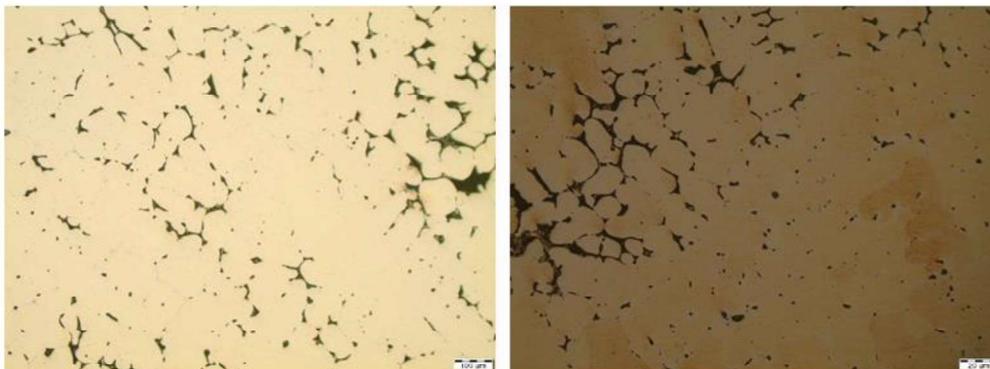
En la Tabla 3.5 se muestran el tamaño de grano que se obtuvo en las probetas fundidas en CD2 después de medir las macrografías que se presenta en el Anexo III.

Tabla 3.5. tamaño de grano CD2.

Id.	No. De tamaño de grano ASTM, G	Diámetro promedio [mm]	Área promedio de grano [mm ²]
CD2	M-8	2,25	5,04 x 10 ⁻³

Fuente: (Propia)

d. Condición dinámica 3

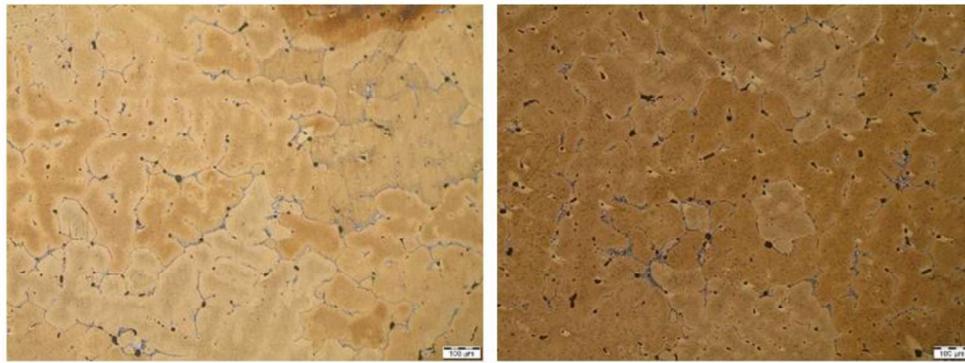


(a)

(b)

Figura 3.10. (a) CD3-1 (b) CD3-2. Aumento: 100X. Sin ataque químico. Existe una gran cantidad de franjas negras las cuales se producen por la presencia de microrechupes y elementos aleantes en el material.

Fuente: (Propia)



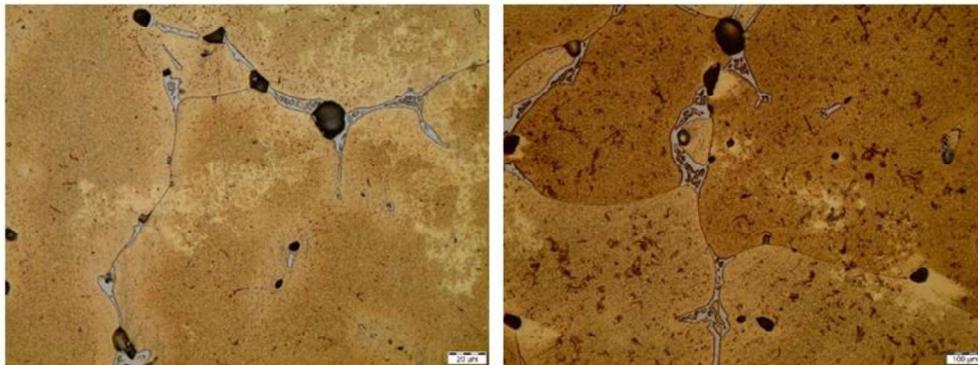
(a)

(b)

Figura 3.11. (a) CD3-1 (b) CD3-2. Aumento 100x. Con ataque químico.

Se observa claramente la presencia de una sola fase alfa, cuya variación de color se debe a la velocidad de enfriamiento. También se observan franjas de color gris por la presencia de estaño, y algunas manchas oscuras siendo microtechupes y el contenido de plomo y hierro.

Fuente: (Propia)



(a)

(b)

Figura 3.12. (a) CD3-1 (b) CD3-2. Aumento: 500X. Con ataque químico.

Se observa la presencia de la fase alfa, con una variación de color debida a la velocidad de enfriamiento. También se observan franjas de color gris por la presencia de estaño en el material, y algunas manchas oscuras siendo estas por microrechupes existentes y por el contenido plomo y hierro.

Fuente: (Propia)

En la Tabla 3.6 se muestran el tamaño de grano que se obtuvo en las probetas fundidas en CD3 después de medir las macrografías que se presenta en el Anexo III.

Tabla 3.6. tamaño de grano CD3.

Id.	No. De tamaño de grano ASTM, G	Diámetro promedio [mm]	Área promedio de grano [mm²]
CD3	M-4	$8,98 \times 10^{-3}$	$80,64 \times 10^{-3}$

Fuente: (Propia)

e. Condición dinámica 4

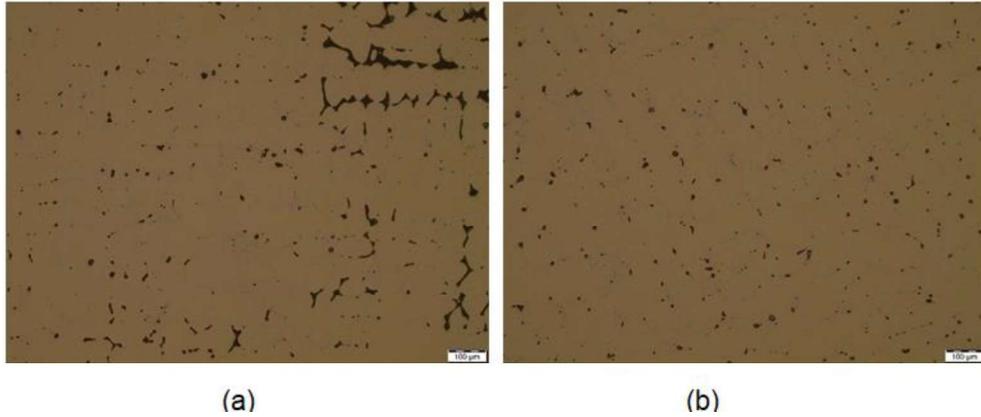


Figura 3.13. (a) CD4-2 (b) CD4-2. Aumento: 100X. Sin ataque químico. Existe una gran cantidad de franjas negras las cuales se producen por la presencia de microrechupes y elementos aleantes en el material.

Fuente: (Propia)

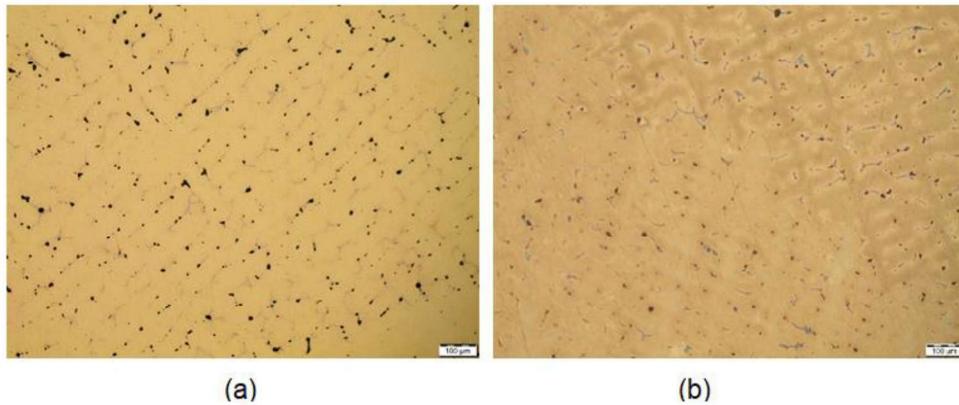
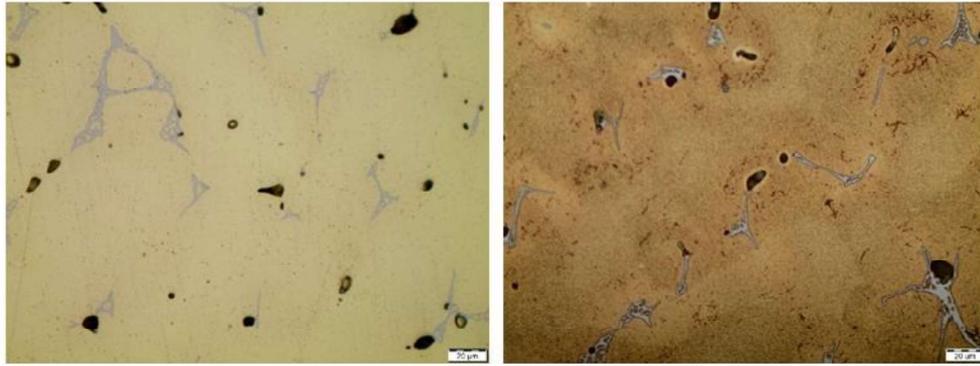


Figura 3.14. (a) CD4-1 (b) CD4-2. Aumento: 100X. Con ataque químico. Se observa la presencia de dendritas. Se aprecia también manchas de color negro por la presencia de plomo, hierro y microrechupes.

Fuente: (Propia)



(a)

(b)

Figura 3.15. (a) CD4-1 (b) CD4-2. Aumento: 500X. Con ataque químico. Se observa una fase alfa. También se observan manchas de color negro por la presencia de elementos de plomo, hierro, y otras manchas oscuras siendo microrechupes. También se observan franjas de color gris por la presencia de estaño en el material.

Fuente: (Propia)

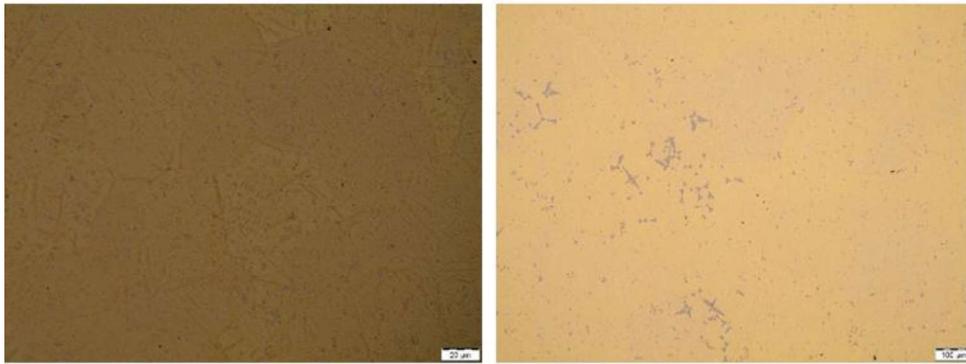
En la Tabla 3.7 se muestran el tamaño de grano que se obtuvo en las probetas fundidas en CD4 después de medir las macrografías que se presenta en el Anexo III.

Tabla 3.7. tamaño de grano CD4.

Id.	No. De tamaño de grano ASTM, G	Diámetro promedio [mm]	Área promedio de grano [mm ²]
CD4	M-8	2,25	5,04 x 10 ⁻³

Fuente: (Propia)

f. Condición dinámica 5

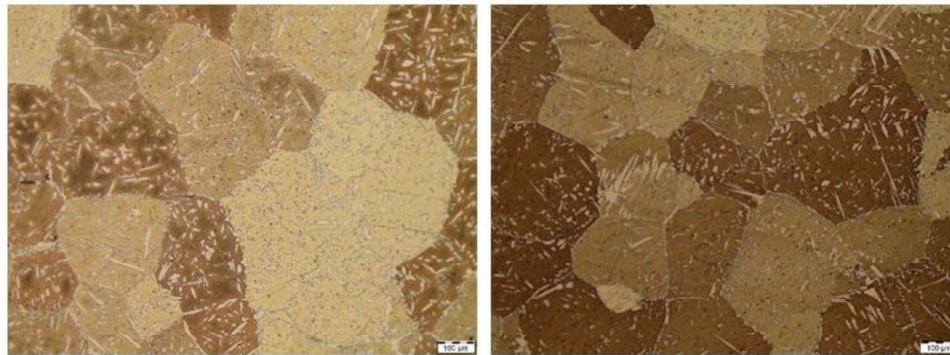


(a)

(b)

Figura 3.16 (a) CD5-2 (b) CD5-3. Aumento: 100X. Sin ataque químico. En ambas probetas se observan manchas de diferente coloración por la presencia de elementos aleantes.

Fuente: (Propia)

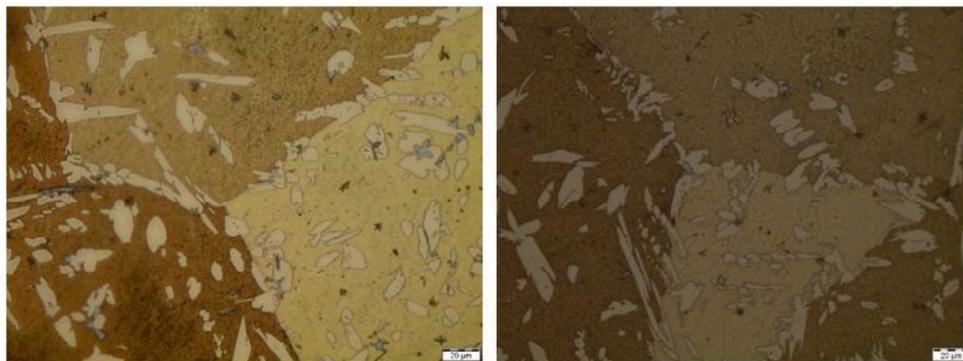


(a)

(b)

Figura 3.17. (a) CD5-2 (b) CD5-3. Aumento: 100X. Con ataque químico. Se observa claramente dos fases, pequeñas agujas que tienen una fase alfa sólida dentro una matriz de fase beta más oscura.

Fuente: (Propia)



(a)

(b)

Figura 3.18. (a) CD5-2 (b) CD5-3. Aumento: 500X. Con ataque químico. La fase alfa tiene una forma acicular sólida de color claro, la cual está dentro de una matriz de fase beta de color más oscuro, cuyo color varía por la velocidad de enfriamiento. Se observan pequeñas manchas negras las cuales aparecen por la presencia de microrechupes o plomo, se muestran manchas grises pertenecientes al estaño contenido en el material. El tamaño de grano de los granos aciculares de la fase alfa es aproximadamente 20um.

Fuente: (Propia)

En la Tabla 3.8 se muestran el tamaño de grano que se obtuvo en las probetas fundidas en CD5 después de medir las micrografías (Anexo IV).

Tabla 3.8. tamaño de grano CD5.

Id.	No. De tamaño de grano ASTM, G	Diámetro promedio [mm]	Área promedio de grano [mm²]
CD5	1.69	0,20068	0,04055

Fuente: (Propia)

g. Condición dinámica 6

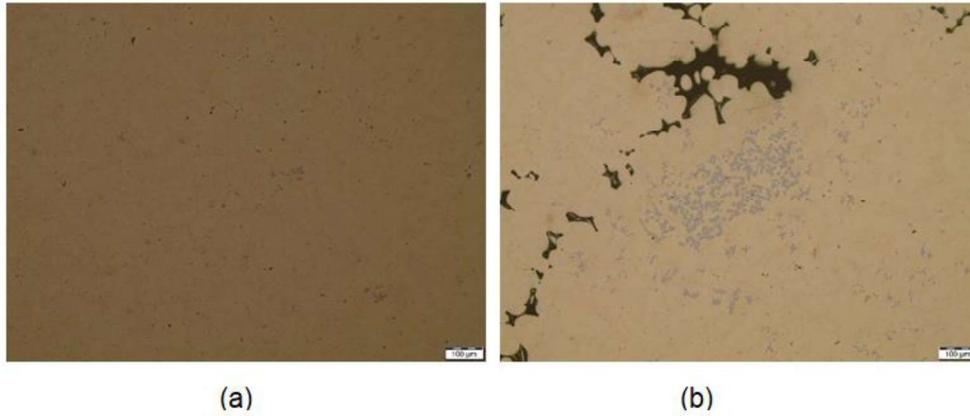


Figura 3.19. (a) CD6-1 (b) CD6-2. Aumento: 100X. Sin ataque químico. Se observan pequeños puntos negros por la presencia de poros. Mientras en la probeta CD6-2 se presenta manchas de diferente coloración por la presencia de aleantes en el material.

Fuente: (Propia)



Figura 3.20. (a) CD6-1 (b) CD6-2. Aumento: 100X. Con ataque químico. Se observa una gran cantidad de granos de forma acicular sólida de fase alfa, los granos se encuentran dentro de una matriz de fase beta de color más oscuro. Se muestran manchas de color negro pertenecientes a microrechupes y porosidades en el material.

Fuente: (Propia)

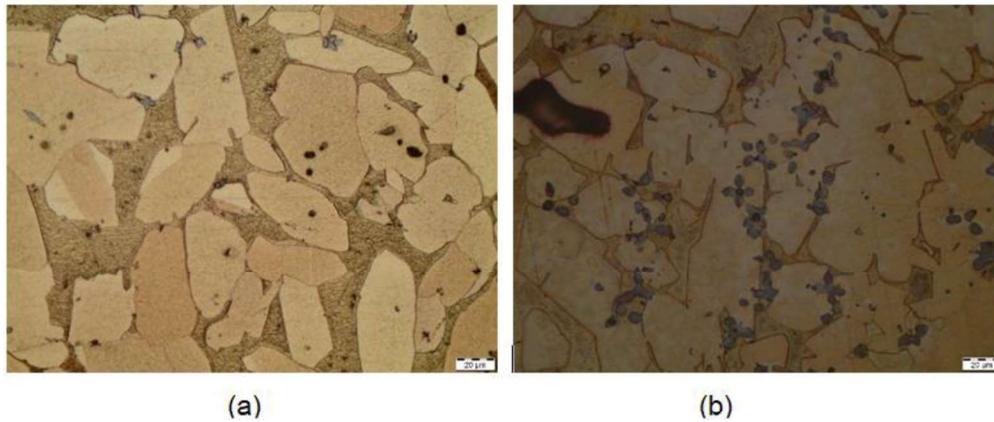


Figura 3.21. (a) CD6-1 (b) CD6-2. Aumento: 100X. Con ataque químico.
 Se observa los granos de fase alfa, dentro de la matriz de fase beta de color más oscuro, también presente pequeñas incrustaciones de color gris, por la presencia de estaño, y puntos negros por la presencia de microrechupes, o aleantes de plomo o hierro. En la probeta CD5-2, se presenta del mismo modo las dos fases, con mayor presencia de incrustaciones de color gris por el estaño, y negras por el plomo o hierro y microrechupes.

Fuente: (Propia)

En la Tabla 3.9 se muestran el tamaño de grano que se obtuvo en las probetas fundidas en CD6 después de medir las micrografías (Anexo IV).

Tabla 3.9. tamaño de grano CD6.

Id.	No. De tamaño de grano ASTM, G	Diámetro promedio [mm]	Área promedio de grano [mm ²]
CD6	7.08	0,03169	0,00100

Fuente: (Propia)

h. Condición dinámica 7

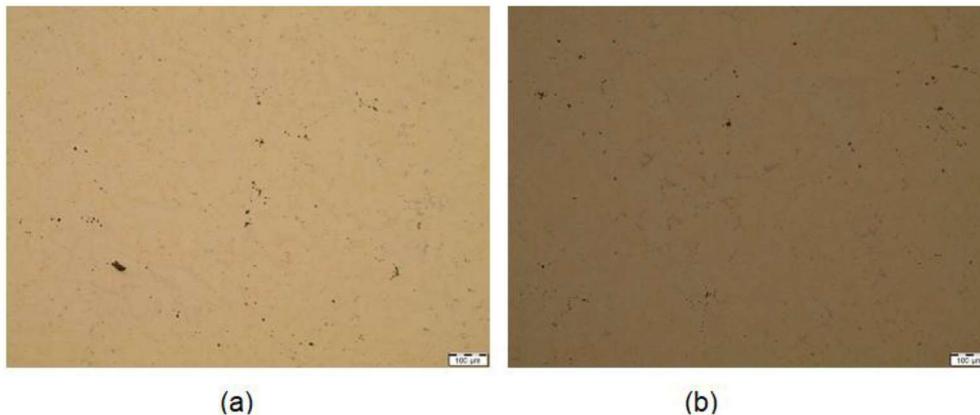
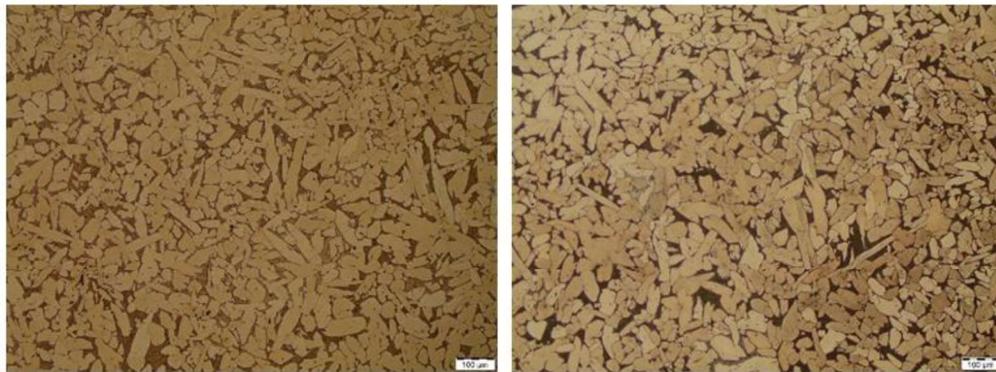


Figura 3.22 (a) CD7-1 (b) CD7-2. Aumento: 100X. Sin ataque químico.
 En ambas probetas, se pueden notar pequeños poros que se encuentran ubicados en diferentes zonas.

Fuente: (Propia)

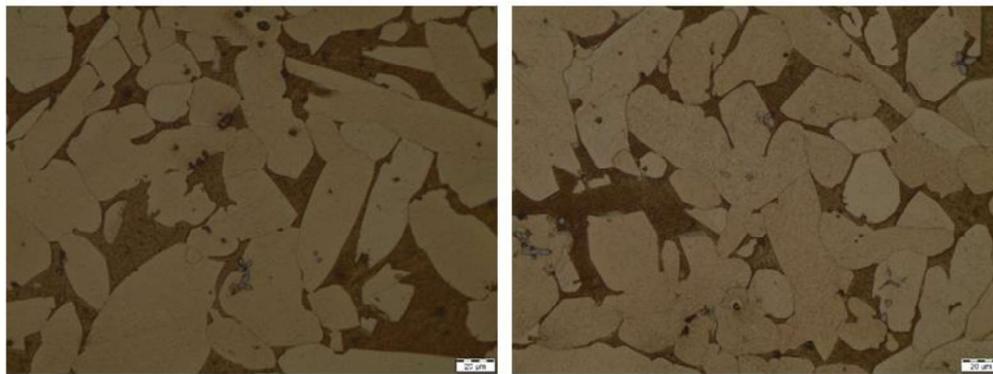


(a)

(b)

Figura 3.23. (a) CD7-1 (b) CD7-2. Aumento: 100X. Con ataque químico. En ambas probetas se puede diferenciar la existencia de dos fases, una fase alfa de gran cantidad de granos en forma acicular de color más claro, y su matriz de fase beta de color más obscuro.

Fuente: (Propia)



(a)

(b)

Figura 3.24. (a) CD7-1 (b) CD7-2. Aumento: 500X. Con ataque químico. En ambas probetas se puede diferenciar de mejor manera la existencia de dos fases, una fase alfa de color más claro, y su matriz de fase beta de color más obscuro. De la misma forma se observa incrustaciones de color gris por el estaño, y manchas negras generalmente producidas por el plomo y hierro, o microrechupes.

Fuente: (Propia)

En la Tabla 3.10 se muestran el tamaño de grano que se obtuvo en las probetas fundidas en CD7 después de medir las micrografías (Anexo IV).

Tabla 3.10. tamaño de grano CD7.

Id.	No. De tamaño de grano ASTM, G	Diámetro promedio [mm]	Área promedio de grano [mm²]
CD7	7.5	0,0267	0,00071

Fuente: (Propia)

i. Condición dinámica 8

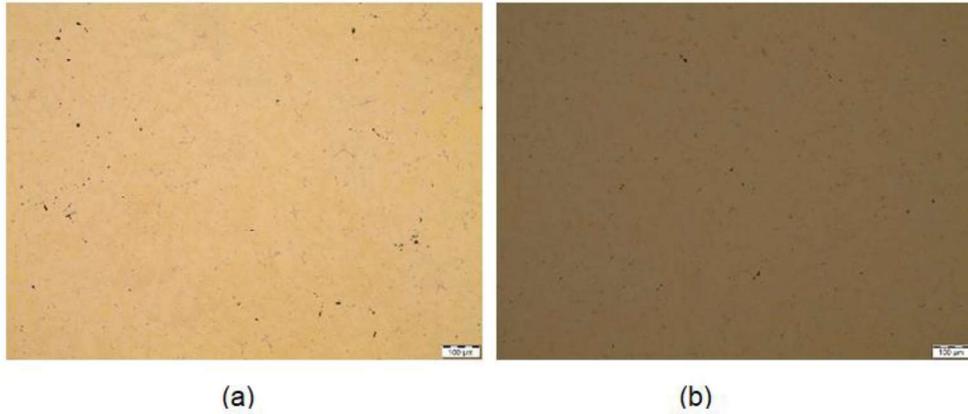


Figura 3.25. (a) CD8-2 (b) CD8-3. Aumento: 100X. Sin ataque químico.
Se pueden diferenciar pequeños poros debidos a microrechupes que se encuentran ubicados en diferentes zonas.

Fuente: (Propia)

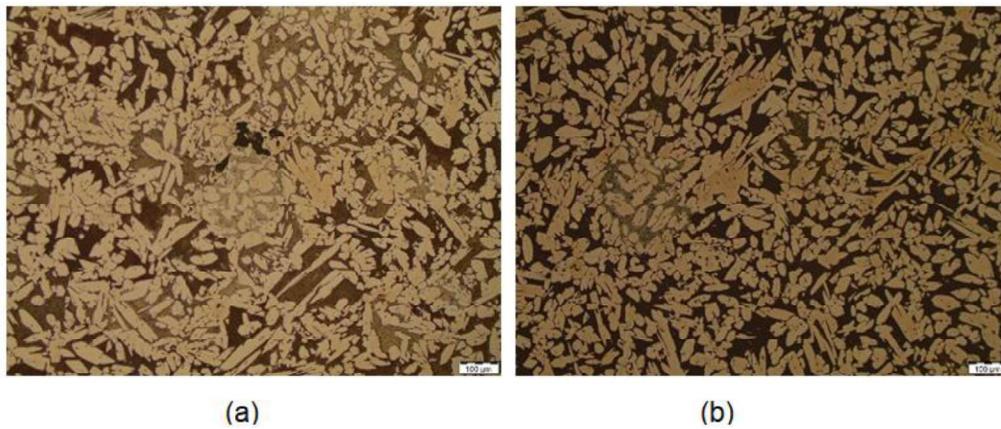
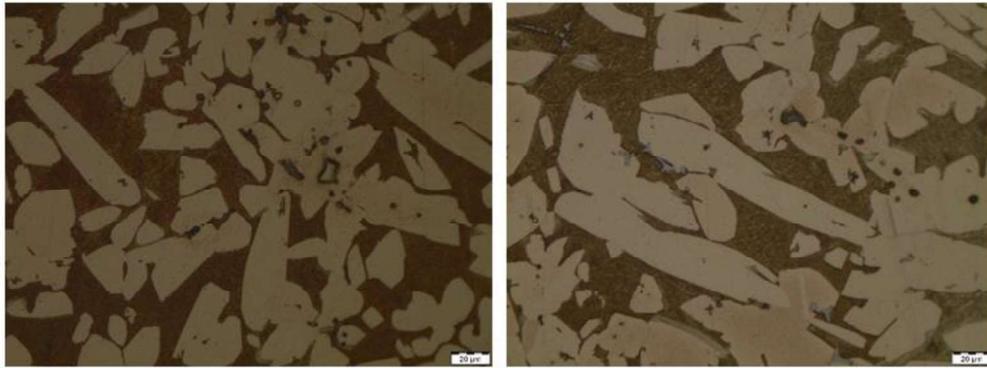


Figura 3.26. (a) CD8-2 (b) CD8-3. Aumento: 100X. Con ataque químico.
Se diferencia en ambas muestras las fases alfa y beta, la fase alfa de forma acicular en gran cantidad de granos con una coloración claro, y su matriz de fase beta de color más oscuro.

Fuente: (Propia)



(a)

(b)

Figura 3.27. (a) CD8-2 (b) CD8-3. Aumento: 500X. Con ataque químico. Se evidencia dos fases diferentes, alfa y beta, la fase alfa con una coloración más claro, dentro de su matriz de fase beta de color más oscuro. Se observan pequeñas incrustaciones de color gris debido al estaño, y manchas negras producidas por el plomo y hierro, o microrechupes.

Fuente: (Propia)

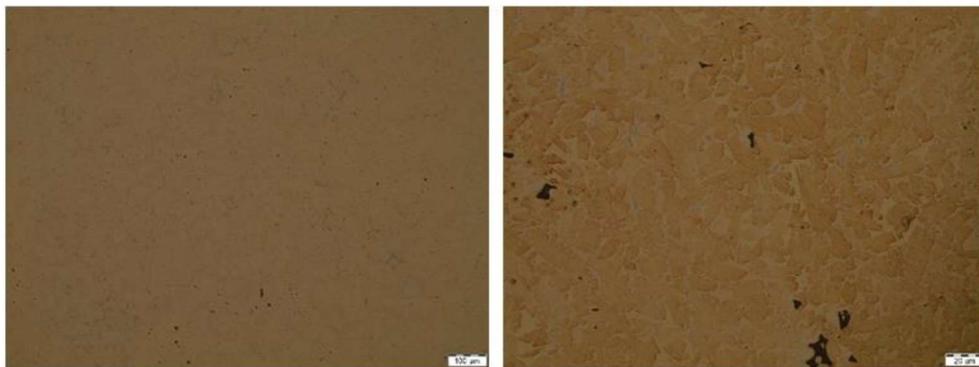
En la Tabla 3.11 se muestran el tamaño de grano que se obtuvo en las probetas fundidas en CD8 después de medir las micrografías (Anexo IV).

Tabla 3.11. tamaño de grano CD8.

Id.	No. De tamaño de grano ASTM, G	Diámetro promedio [mm]	Área promedio de grano [mm ²]
CD8	8.09	0,02243	0,00050

Fuente: (Propia)

j. Condición dinámica 9.

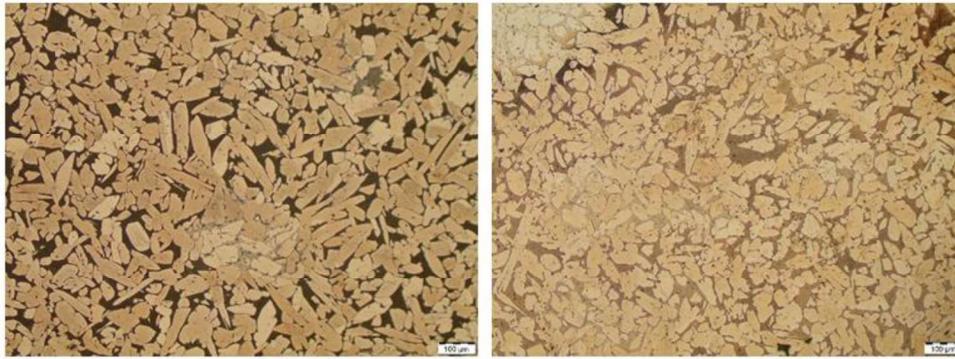


(a)

(b)

Figura 3.28. (a) CD9-2 (b) CD9-2. Aumento: 100X. Sin ataque químico. En la probeta CD9-2 presenta pequeñas porosidades, mientras que en la probeta CD9-3 se observa su tamaño de grano, con algunos microrechupes de color negro.

Fuente: (Propia)

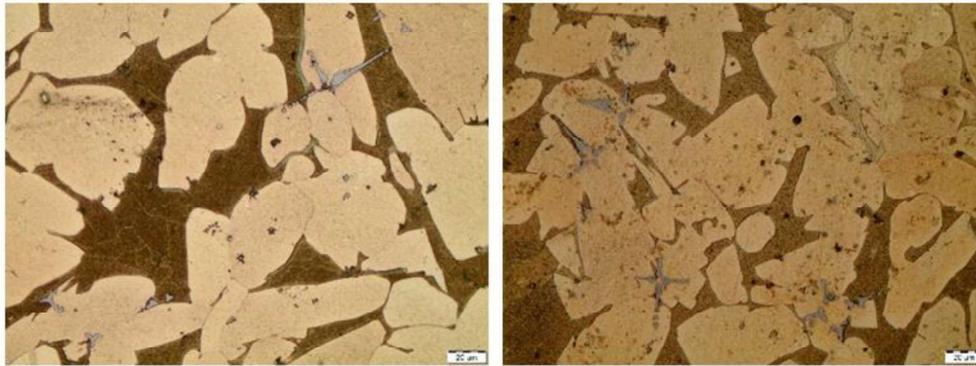


(a)

(b)

Figura 3.29. (a) CD9-2 (b) CD9-3. Aumento: 100X. Con ataque químico. Se aprecian las fases alfa y beta, la fase alfa con una gran cantidad de granos de forma acicular, mientras su matriz de fase beta de color más oscuro.

Fuente: (Propia)



(a)

(b)

Figura 3.30 (a) CD9-2 (b) CD9-3. Aumento: 500X. Con ataque químico. Se observan dos fases completamente diferenciadas, alfa y beta, la fase alfa con una coloración más clara, dentro de su matriz de fase beta de color más oscuro. Se observan pequeñas incrustaciones de color gris por el elemento de estaño, y negras producidas por el plomo y hierro, o microrechupes.

Fuente: (Propia)

En la Tabla 3.12 se muestran el tamaño de grano que se obtuvo en las probetas fundidas en CD9 después de medir las micrografías (Anexo IV).

Tabla 3.12. tamaño de grano CD9.

Id.	No. De tamaño de grano ASTM, G	Diámetro promedio [mm]	Área promedio de grano [mm²]
CD9	6.92	0,03276	0,00108

Fuente: (Propia)

3.1.3. Resultado del Ensayo de dureza

En la Tabla 3.13 se presenta la dureza obtenida de las probetas fundidas en condiciones estáticas, por tratarse de probetas con bajas durezas las escalas de esta dureza pertenece a Rockwell H.

Tabla 3.13. Durezas probetas CE.

	CE-2	CE-3
	Dureza HRH	Dureza HRH
	91	83
	90	83
	94	87
	91	85
	89	84
	92	86
Promedio	91	85

Fuente: (Propia)

En la Tabla 3.14 se presenta la dureza obtenida de las probetas fundidas en CD1, por tratarse de probetas con bajas durezas las escalas de esta dureza pertenece a Rockwell H.

Tabla 3.14. Durezas probetas CD1.

	CD1-2	CD1-3
	Dureza HRH	Dureza HRH
	94	98
	95	94
	95	94
	94	95
	94	98
	92	97
Promedio	94	96

Fuente: (Propia)

En la Tabla 3.15 se presenta la dureza obtenida de las probetas fundidas en CD2, por tratarse de probetas con bajas durezas las escalas de esta dureza pertenece a Rockwell H.

Tabla 3.15. Durezas probetas CD2.

	CD2-1	CD2-2
	Dureza HRH	Dureza HRH
	98	96
	89	98
	52	94
	73	97
	66	98
	78	98
Promedio	76	97

Fuente: (Propia)

En la Tabla 3.16 se presenta la dureza obtenida de las probetas fundidas en CD3, por tratarse de probetas con bajas durezas las escalas de esta dureza pertenece a Rockwell H.

Tabla 3.16. Durezas probetas CD3.

	CD3-1	CD3-2
	Dureza HRH	Dureza HRH
	81	83
	67	92
	72	81
	53	74
	95	90
	80	94
Promedio	75	86

Fuente: (Propia)

En la Tabla 3.17 se presenta la dureza obtenida de las probetas fundidas en CD4, por tratarse de probetas con bajas durezas las escalas de esta dureza pertenece a Rockwell H.

Tabla 3.17. Durezas probetas CD4.

	CD4-1	CD4-2
	Dureza HRH	Dureza HRH
	92	90
	93	91
	95	93
	87	93
	76	94
	90	94
Promedio	89	93

Fuente: (Propia)

En la Tabla 3.18 se presenta la dureza obtenida de las probetas fundidas en CD9, en las probetas en estas condiciones la dureza pertenece a durezas Rockwell B.

Tabla 3.18. Durezas probetas CD5.

	CD5-2	CD5-3
	Dureza HRB	Dureza HRB
	76	73
	72	76
	75	76
	76	72
	76	71
	74	72
Promedio	75	73

Fuente: (Propia)

En la Tabla 3.19 se presenta la dureza obtenida de las probetas fundidas en CD6, en las probetas en estas condiciones la dureza pertenece a durezas Rockwell B.

Tabla 3.19. Durezas probetas CD6.

	CD6-1	CD6-2
	Dureza HRB	Dureza HRB
	46	48
	52	44
	51	46
	53	51
	50	44
	52	48
Promedio	51	47

Fuente: (Propia)

En la Tabla 3.20 se presenta la dureza obtenida de las probetas fundidas en CD7, en las probetas en estas condiciones la dureza pertenece a durezas Rockwell B.

Tabla 3.20. Durezas probetas CD7.

	CD7-1	CD7-2
	Dureza HRB	Dureza HRB
	50	51
	50	50
	44	52
	47	53
	48	51
	46	52
Promedio	48	52

Fuente: (Propia)

En la Tabla 3.21 se presenta la dureza obtenida de las probetas fundidas en CD8, en las probetas en estas condiciones la dureza pertenece a durezas Rockwell B.

Tabla 3.21. Durezas probetas CD8.

	CD8-2	CD8-3
	Dureza HRB	Dureza HRB
	60	60
	59	58
	59	59
	67	57
	60	58
	60	59
Promedio	61	59

Fuente: (Propia)

En la Tabla 3.22 se presenta la dureza obtenida de las probetas fundidas en CD9, en las probetas en estas condiciones la dureza pertenece a durezas Rockwell B.

Tabla 3.22. Durezas probetas CD9.

	CD9-2	CD9-3
	Dureza HRB	Dureza HRB
	52	48
	52	44
	50	38
	52	44
	51	46
	53	47
Promedio	52	45

Fuente: (Propia)

3.1.4. Resultado del ensayo de tracción

Los resultados de los ensayos de tracción realizados en las probetas fundidas en condiciones estáticas se pueden observar en la Tabla 3.23.

Tabla 3.23. Resultado de ensayos de tracción en las probetas en CE.

Identificación	Diámetro promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción	
	[mm]	[lbf]	[N]	[Ksi]	[MPa]
CE-2	12.77	3323	14781	16,7	115,4
CE-3	12.96	2121	9434	10,4	71,5

Fuente: (Propia)

Los resultados de los ensayos de tracción realizados en las probetas fundidas en CD1 se pueden observar en la Tabla 3.24.

Tabla 3.24. Resultado de ensayos de tracción en las probetas en CD1.

Identificación	Diámetro promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción	
	[mm]	[lbf]	[N]	[Ksi]	[MPa]
CD1-2	12,78	1580	7027	7,9	54,8
CD1-3	12,74	2685	11942	13,6	93,7

Fuente: (Propia)

Los resultados de los ensayos de tracción realizados en las probetas fundidas en CD2 se pueden observar en la Tabla 3.25.

Tabla 3.25. Resultado de ensayos de tracción en las probetas en CD2.

Identificación	Diámetro promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción	
	[mm]	[lbf]	[N]	[Ksi]	[MPa]
CD2-1	12,77	2712	12063	13,7	94,2
CD2-2	12,72	1487	6613	7,5	52,0

Fuente: (Propia)

Los resultados de los ensayos de tracción realizados en las probetas fundidas en CD3 se pueden observar en la Tabla 3.26.

Tabla 3.26. Resultado de ensayos de tracción en las probetas en CD3.

Identificación	Diámetro promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción	
	[mm]	[lbf]	[N]	[Ksi]	[MPa]
CD3-1	12,87	2318	10313	11,5	79,3
CD3-2	12,75	2417	10752	12,2	84,2

Fuente: (Propia)

Los resultados de los ensayos de tracción realizados en las probetas fundidas en CD4 se pueden observar en la Tabla 3.27.

Tabla 3.27. Resultado de ensayos de tracción en las probetas en CD4.

Identificación	Diámetro promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción	
	[mm]	[lbf]	[N]	[Ksi]	[MPa]
CD4-1	12,92	1608	7154	7,9	54,6
CD4-2	12,73	1406	6256	7,1	49,2

Fuente: (Propia)

Los resultados de los ensayos de tracción realizados en las probetas fundidas en CD5 se pueden observar en la Tabla 3.28.

Tabla 3.28. Resultado de ensayos de tracción en las probetas en CD5.

Identificación	Diámetro promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción	
	[mm]	[lbf]	[N]	[Ksi]	[MPa]
CD5-2	12,78	8714	38760	43,8	302,2
CD5-3	12,81	4235	18837	21,2	146,2

Fuente: (Propia)

Los resultados de los ensayos de tracción realizados en las probetas fundidas en CD6 se pueden observar en la Tabla 3.29.

Tabla 3.29. Resultado de ensayos de tracción en las probetas en CD6.

Identificación	Diámetro promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción	
	[mm]	[lbf]	[N]	[Ksi]	[MPa]
CD6-1	12,87	4043	17982	20,0	138,2
CD6-2	12,65	3825	17016	19,6	135,4

Fuente: (Propia)

Los resultados de los ensayos de tracción realizados en las probetas fundidas en CD7 se pueden observar en la Tabla 3.30.

Tabla 3.30. Resultado de ensayos de tracción en las probetas en CD7.

Identificación	Diámetro promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción	
	[mm]	[lbf]	[N]	[Ksi]	[MPa]
CD7-1	12,80	4491	19978	22,5	155,3
CD7-2	12,83	3072	13667	15,3	105,7

Fuente: (Propia)

Los resultados de los ensayos de tracción realizados en las probetas fundidas en CD8 se pueden observar en la Tabla 3.31.

Tabla 3.31. Resultado de ensayos de tracción en las probetas en CD8.

Identificación	Diámetro promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción	
	[mm]	[lbf]	[N]	[Ksi]	[MPa]
CD8-2	12,76	5259	23391	26,5	182,9
CD8-3	12,82	4794	21325	24,0	165,2

Fuente: (Propia)

Los resultados de los ensayos de tracción realizados en las probetas fundidas en CD9 se pueden observar en la Tabla 3.32.

Tabla 3.32. Resultado de ensayos de tracción en las probetas en CD9.

Identificación	Diámetro promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción	
	[mm]	[lbf]	[N]	[Ksi]	[MPa]
CD9-2	12,75	5065	22531	25,6	176,5
CD9-3	12,50	4386	19509	23,1	159,0

Fuente: (Propia)

3.1.5. Resumen de Resultados Finales

En la Tabla 3.33 se presentan las mediciones del tamaño de grano obtenidas en las probetas en las diferentes condiciones dinámicas medidas en las estructuras metalográficas de las muestras ensayadas.

Tabla 3.33. Tamaño de grano de fundiciones a diferentes condiciones.

Condición	No. Tamaño de grano ASTM, G	Diámetro promedio [mm]	Área promedio de Grano [mm ²]	Porcentaje crecimiento de grano respecto a CE [%]
CE	M-8	2,25	5,04	-
CD1	M-7	3,17	10,08	40,89
CD2	M-8	2,25	5,04	0
CD3	M-4	8,98	80,64	299,11
CD4	M-8	2,25	5,04	0
CD5	1.69	0,02000	0,04055	91,08
CD6	7.08	0,03169	0,00100	98,59
CD7	7.50	0,02670	0,00071	98,81
CD8	8.09	0,02243	0,00050	99,03
CD9	6.92	0,03276	0,00108	98,54

Fuente: (Propia)

En la Figura 3.31. Se puede apreciar el cambio en el tamaño de grano de cada una de las probetas ensayadas en las diferentes condiciones dinámicas a las cuales fueron fundidas.

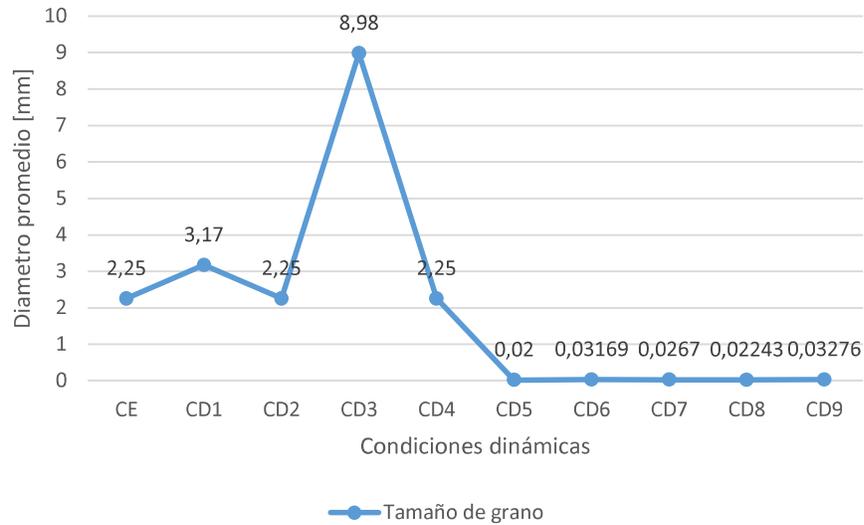


Figura 3.31. Cambio del tamaño de grano de las probetas fundidas en las diferentes condiciones dinámicas.

Fuente: (Propia)

En la Tabla 3.34 se muestra un cuadro resumen de las propiedades mecánicas obtenidas en cada condición dinámica de fundición, de forma de facilitar el análisis de los resultados obtenidos.

Tabla 3.34. Propiedades mecánicas de las probetas a las diferentes condiciones.

Condición	Id.	Dureza	Carga registrada		Resistencia a la tracción	
			[lbf]	[N]	[Ksi]	[MPa]
CE	CE-2	91HRH	3323	14781	16,70	115,40
	CE-3	85HRH	2121	9434	10,40	71,50
CD1	CD1-1	94HRH	1580	7027	7,90	54,80
	CD1-2	96HRH	2685	11942	13,60	93,70
CD2	CD2-1	76HRH	2712	12063	13,70	94,20
	CD2-2	97HRH	1487	6613	7,50	52,00
CD3	CD3-1	75HRH	2318	10313	11,50	79,30
	CD3-2	86HRH	2417	10752	12,20	84,20
CD4	CD4-1	89HRH	1608	7154	7,90	54,60
	CD4-2	93HRH	1406	6256	7,10	49,20
CD5	CD5-2	75HRB	8714	38760	43,80	302,20
	CD5-3	73HRB	4235	18837	21,20	146,20
CD6	CD6-1	51HRB	4043	17982	20,00	138,20
	CD6-2	47HRB	3825	17016	19,60	135,40
CD7	CD7-1	48HRB	4491	19978	22,50	155,30
	CD7-2	52HRB	3072	13667	15,30	105,70
CD8	CD8-2	61HRB	5259	23391	26,50	182,90
	CD8-3	59HRB	4794	21325	24,00	165,20
CD9	CD9-2	52HRB	5065	22531	25,60	176,50
	CD9-3	45HRB	4386	19509	23,10	159,00

Fuente: (Propia)

En la Figura 3.32 y Figura 3.33 se muestra el cambio en la dureza con respecto al tamaño de grano obtenido en las probetas ensayadas, fundidas en las diferentes condiciones dinámicas.

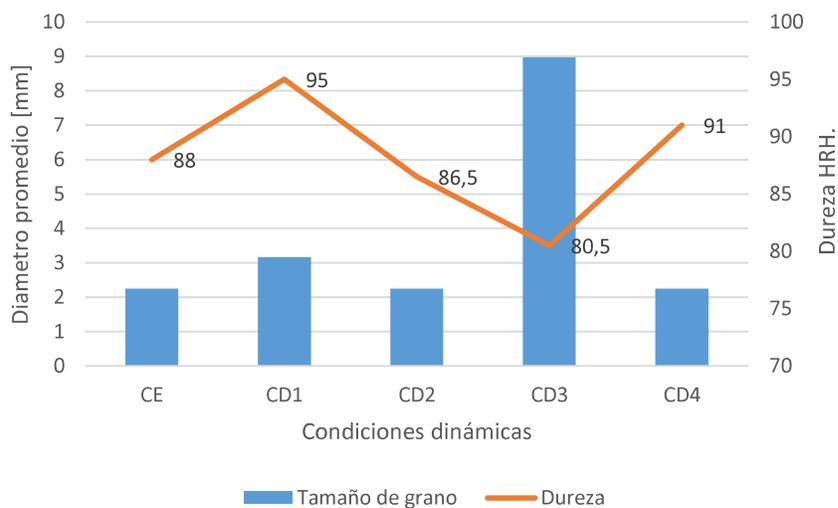


Figura 3.32. Cambio de dureza con respecto al tamaño de grano de las probetas en condiciones: CE1, CD1, CD2, CD3, CD4.

Fuente: (Propia)

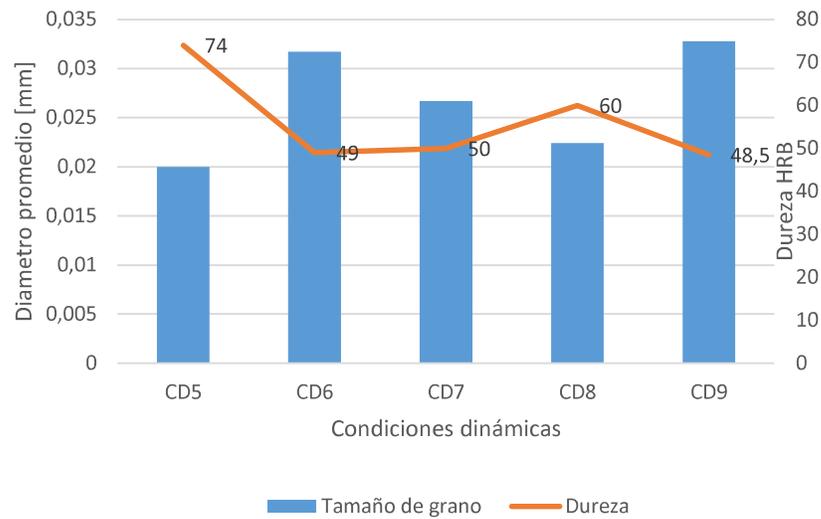


Figura 3.33. Cambio de dureza con respecto al tamaño de grano de las probetas en condiciones: CD5, CD6, CD7, CD8, CD9.
Fuente: (Propia)

En la Figura 3.34 se presenta el cambio en la resistencia de tracción con respecto al tamaño de grano obtenidas en las probetas ensayadas, fundidas en las diferentes condiciones dinámicas.

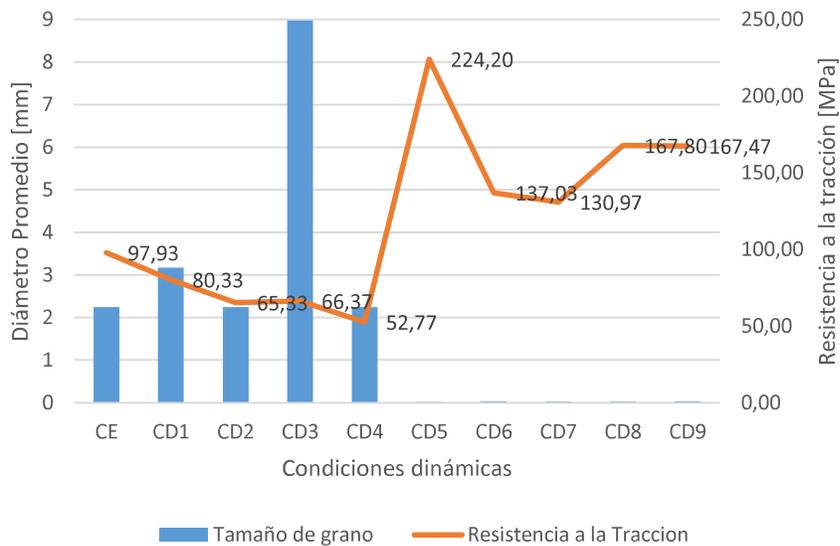


Figura 3.34. Cambio de la resistencia a la tracción con respecto al tamaño de grano en cada una de las condiciones dinámicas.
Fuente: (Propia)

3.2. Análisis de resultados

3.2.1. Análisis micro y macro-estructural

El latón con el cual se trabajó se trata de un latón del tipo $\alpha+\beta$, esta aleación tiene un punto de fusión de aproximadamente de 950 °C, como se muestra en la Figura 3.1.

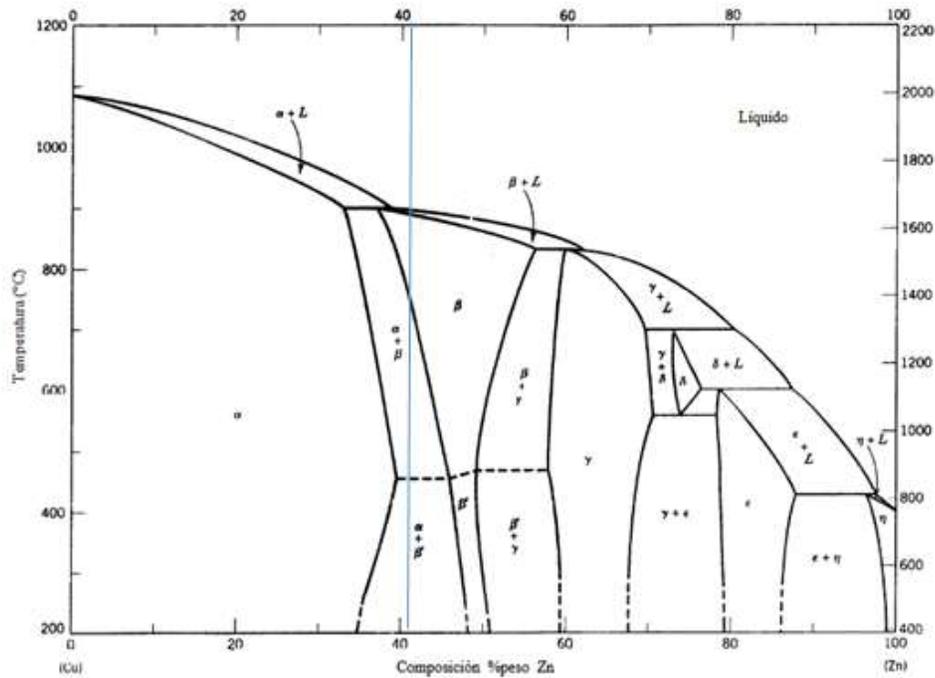


Figura 3.35. Diagrama de fase Cu-Zn.
Fuente: (Davis J. , 2001)

Para la solidificación de las probetas obtenidas se comienza en una fase líquida, conforme va disminuyendo su temperatura alrededor de los 900°C se constituye una fase β + líquido, a los 870°C se produce una reacción peritética del estado β + líquido a fase β , posteriormente a una temperatura aproximada de 750°C se presenta una reacción eutectoide donde aparece una fase α la misma que aumenta a medida que la temperatura desciende. Al alcanzar una temperatura ambiente se nota que la fase β pasa a ser una fase β' la cual coexiste con la fase α . La fase alfa es un constituyente de color claro acicular y la constituyente beta presenta una tonalidad oscura, como se muestra en la Figura 3.23.

Como se puede notar en trabajos de colado dinámico como el de S.S. Mishra, S.S. Sahu y V. Ray en su trabajo de “Efectos del colado dinámico en las propiedades mecánicas y metalúrgicas de una aleación de Al-Cu”, uno de los principales efectos de la vibración en

la solidificación de la fundición se presenta en la refinación del grano en la microestructura del metal, mientras mayor es la tasa de transferencia de calor el grano es más fino, al incrementar la intensidad de la vibración produce una mayor transferencia de calor por lo que el grano en la microestructura se presenta más fino (S.S. Mishra, 2015). El mismo efecto se puede constatar en el trabajo de Rigoberto P. Sánchez-Figueroa, Asdrubal B. García-Domínguez, en donde se logró una mejor estructura de la matriz ferrita y mayor perlita en la fundición de hierro con grafito esferoidal, mejorando la microestructura del material y por ende aumentando las propiedades mecánicas en la fundición. (Rigoberto P. Sánchez-Figueroa, 2015).

En el presente trabajo se puede observar en la Figura 3.3, 3.6, 3.9, 3.12, 3.15, correspondientes a las probetas en las condiciones CE, CD1 CD2, CD3, CD4, predomina una fase alfa por lo que sus propiedades mecánicas son menores, conforme se aumenta la amplitud en la maquina vibratoria y en una misma velocidad se nota una mejoría en la microestructura ya que el tamaño de grano de la fase alfa disminuye y se presenta en una matriz beta, aumentando las propiedades mecánicas del material, como se nota en la Figura 3.21, 3.24, 3.27, 3.30.

En la condición CD5 perteneciente a la amplitud 0,15 mm y una frecuencia de 6 Hz (360 rpm del motor) se puede observar un gran cambio en la microestructura del metal al presentar pequeñas agujas de solución alfa sólida en una matriz de fase beta predominante en la microestructura, por lo tanto, presenta mejores propiedades mecánicas, como se aprecia en la Figura 3.18.

El efecto de la microestructura afecta directamente en las características mecánicas del metal lo cual se puede constatar de mejor manera en la Figura 3.31, donde se presenta el cambio en el tamaño de grano de las microestructuras en cada probeta.

3.2.2. Análisis de la dureza

Como ya se ha mencionado anteriormente, con el colado dinámico se ha notado una mejora en las propiedades mecánicas de las funciones. La dureza es una de las propiedades mecánicas que se ve afectada por la vibración en la colada, como se presenta en el trabajo de Premvrat Kumar y Sandeep Katiyar, "Efectos del colado dinámico en las propiedades mecánicas de la aleación de aluminio A-1100", en donde se consiguió una mejora en la dureza en la aleación A1100 al ser colada con efecto de la vibración (Premvrat Kumar, 2018). De la misma forma se encuentra una mejoría en la dureza en una aleación de aluminio y cobre al usar el colado dinámico en el trabajo de

Rahul Kumar, Md. Salim Ansari, Sudhansu Sekhar Mishra, Amitesh Kuma, “Efecto del colado dinámico en la microestructura y propiedades mecánicas de la soldadura durante la salificación”.

Para la dureza en este caso en las condiciones CE, CD1, CD2, CD3, CD4, predomina una fase alfa con un tamaño de grano grande, por lo tanto, al predominar esta fase las propiedades mecánicas disminuyen como se constata en la dureza la cual presenta valores muy bajos en escala de Rockwell H.

Al aumentar la frecuencia y amplitud de las vibraciones de la meza se puede notar que en las condiciones CD6, CD7, CD8, CD9, el tamaño de grano de la fase alfa disminuye, y predomina en una matriz beta, por lo cual la dureza aumenta considerablemente teniendo durezas de Rockwell B.

En la condición CD5, se nota claramente la forma acicular de la fase alfa, con un tamaño de grano menor a las demás probetas, y ubicada en una matriz beta la misma que predomina en estas condiciones de frecuencia y amplitud. Sabiendo que la fase β' se caracteriza por su dureza, la dureza en estas probetas es la mayor comparada a las demás, por lo cual se puede notar una gran diferencia y mejoría en la dureza al usar el colado dinámico en comparación con el colado estático en la fundición.

Como se conoce que la dureza se relaciona directamente con la microestructura del metal, en la Figura 3.32 y 3.33 se puede notar el cambio de la dureza con respecto al tamaño de grano que presentan las probetas extraídas de las fundiciones realizadas.

3.2.3. Análisis de la tracción

En condiciones de frecuencia de 3 Hz y con amplitudes de 0,1 mm, 0,15 mm, y 0,2 mm y en frecuencia 6 Hz y 0,1 mm de amplitud, en comparación con la condición estática, se puede notar una disminución en la resistencia a la tracción, debido que a estas condiciones se aumentan las porosidades internas en la fundición, volviendo al material más frágil.

Desde una frecuencia de 6 Hz, y una amplitud de 0,15 mm, se puede observar que la distribución y tamaño de grano sufren un gran cambio en su estructura, por ello la resistencia a la tracción aumenta considerablemente.

En cambio, en condiciones de frecuencia de 9 Hz a medida que la amplitud va aumentando la resistencia a la tracción va aumentando, debido a la disminución del

grano, por lo que se nota que el efecto de vibración en las probetas en estas condiciones aumenta la resistencia a la tracción en el material.

Los resultados obtenidos se pueden corroborar en los trabajos antes mencionados en donde se puede notar una mejoría notable en las propiedades mecánicas incluyendo la resistencia de tensión de las aleaciones usadas, como por ejemplo en el trabajo de Premvrat Kumar y Sandeep Katiyar, "Efectos del colado dinámico en las propiedades mecánicas de la aleación de aluminio A-1100", se obtuvo un incremento en la resistencia a la tensión y ductilidad en la aleación de aluminio A1100, con un máximo de 0,267 M.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- Al emplear dos discos excéntricos de masas 0,275 kg y 0,413 kg, respectivamente, adicionales al ya existente de 0,551 kg, en el motor de la mesa vibratoria del laboratorio de fundición de Ingeniería Mecánica, se optimizó el uso de la misma, obteniendo nuevas amplitudes en un rango de 0,02mm hasta 0,31 mm respectivamente que fueron usadas al momento de colar la fundición del latón en la mesa.
- Después de haber realizado los ensayos de metalografías de las probetas seleccionadas se concluye que:
 - a. En las metalografías obtenidas no se nota diferencia al momento de usar diferentes amplitudes con la frecuencia de 3 Hz; en esta microestructura predomina la fase α en forma dendrítica.
 - b. En la microestructura, al momento de variar la amplitud en la frecuencia de 6 Hz; se nota la existencia de la fase β de manera clara y la fase α con su forma acicular contenida en la matriz de fase β .
 - c. En las metalografías obtenidas no se nota diferencia al momento de usar diferentes amplitudes con la frecuencia de 9 Hz; en esta microestructura se puede notar la fase α con su forma acicular y la fase β como matriz.
- Con respecto a la dureza en las fundiciones:
 - a. No se nota una mejoría en la frecuencia de 3 Hz en donde las durezas de las probetas no presentan diferencia con las condiciones estáticas, presentando durezas de escalas HRH, las cuales son suaves debido a la presencia de la fase α en la mayor parte de la fundición,
 - b. En cambio, una vez que se usa frecuencias de 6 Hz y 9 Hz, se puede notar una gran mejoría en la dureza de las probetas con respecto a la condición estática del colado, debido a la refinación de grano en la microestructura por la presencia de la vibración en el colado del latón con lo cual se distingue la presencia de la matriz β la cual contiene a la fase α .
- La resistencia a la tracción mejora al variar la amplitud de la mesa vibratoria en las frecuencias de 6 Hz y 9 Hz, mientras que en la frecuencia de 3 Hz no se nota una

mejoría en la resistencia a la tracción con respecto a la condición estática, ya que la microestructura en esta frecuencia se asemeja a la presente en las condiciones estáticas, en donde se aprecia el dominio de la fase α en las fundiciones.

- Después de las pruebas en la mesa vibratoria se nota un punto óptimo en el proceso de colado en la condición CD5 al usar una frecuencia de 6 Hz y una amplitud de 0,05 mm, con lo cual se obtiene una mejoría considerable en las propiedades mecánicas y microestructura en la fundición.

4.2. Recomendaciones

- Para futuros usos de la mesa vibratoria con los diferentes discos excéntricos se recomienda, mejorar el ajuste de los discos de menor grosor al eje del motor.
- Se recomienda utilizar frecuencias en un intervalo de 6 Hz a 9 Hz con amplitudes de 0,15 mm a 0,2 mm para obtener un mejor refinamiento del grano en la microestructura del material.
- Se recomienda utilizar diferentes tipos de latón para corroborar el punto óptimo donde se presenta las mejores propiedades mecánicas en la fundición, en la condición CD5 a 6 Hz y 0,05 mm, obtenida en el presente trabajo de investigación.
- Para proyectos de investigación futuros en la mesa vibratoria se recomienda el uso del molde permanente, de tal manera que se lo pueda usar más de una vez, minimizando así los tiempos en la obtención de las probetas.
- Se recomienda un estudio de las variables de la fundición con respecto a la tasa de enfriamiento y la solidificación para las condiciones dinámicas en donde se han encontrado una mejora en las propiedades mecánicas del material fundido.
- Se debe tomar en cuenta que al variar las frecuencias varían también las amplitudes del sistema, por lo que se recomienda hacer un análisis del comportamiento del sistema que está usando en la máquina vibratoria.

Referencias Bibliográficas

- Appendino, P., Crivellone, G., Mus, C., & Spriano, S. (2013). Dynamic solidification of sandcast aluminium alloys. *Metallurgical Science and Tecnology*.
- Beer, F., Jhonston, R., & Cornwell, P. (2010). *Mecánica vectorial para ingenieros DINÁMICA* (Novena ed.). Mexico.
- Capello, E. (1966). *Tecnología de la Fundición*. Italia.
- Castro, G. (Febrero de 2009). *Departamento de ingeniería mecánica F.I.U.B.A.* Obtenido de http://campus.fi.uba.ar/file.php/295/Material_Complementario/Fundiciones.pdf
- Copper, Development, & Association. (1996). *The Brasses: Properties and Applications* Publication No. 117. Copper Development Association.
- Coste. (1964). *Curso Elemental de Fundición* .
- Davis, J. (Agosto de 2001). *ASM Specialty Handbook*.
- Davis, J. R. (2001). *Copper and copper alloys*. ASM international.
- Ferry, M. (2006). *Direct Strip Sasting of Metals and Alloys* . England.
- Galloso, A. C. (1996). *BRONCES AL MANGANESO*. Lima, Perú.
- Gatonbrass. (2016). *Die Casting: Complete Handbook For All Metal Die Casting*. Recuperado el 23 de Mayo de 2018, de <http://www.gatonbrass.com/die-casting/>
- Groover, M. P. (1997). *Fundamentos de Manufactura Moderna: Materiales, Procesos y Sistemas*. Pearson.
- Guerrero, V. (2011). *Nuevos materiales: Aplicaciones Estructurales e Industriales*. Quito.
- Hamburg, G. (s.f.). *Métodos de ensayo mecánicos*. Obtenido de https://gunt.de/images/download/Mtodos-de-ensayo-mecnicos-conocimientos-bsicos_spanish.pdf
- Jiménez Viscarra Víctor Javier, O. L. (Enero de 2018). *DISEÑO Y FABRICACION DE UN SISTEMA DESOPORTE Y CONEXIÓN PARA UN PROTOTIPO DE BOMBA DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO*. Quito.
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2008). *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*. Mexico.
- Mora, E., & Venegas, E. (2011). *Caracterización del Latón*. Oruro.
- Norma ASTM E8. (s.f.).
- Ochoa Larreátegui, D., & Jiménez Viscarra, V. (2018). *Diseño y Abricación por fundición del sistema de soporte y conexión para un prototipo de bomba de dezplazamiento psitivo*. Quito.
- Pizango Veintimilla , J. P., & Quinga Vega, J. J. (Marzo de 2018). *Caracterización de una aleación de latón obtenida por colado dinámico con variación de frecuencia* . Quito, Pichiccha , Ecuador .

- Premvrat Kumar, S. K. (junio de 2018). Effect of mechanical mould vibration on the properties of sand casting aluminium (A-1100) alloy. India.
- Proaño Sarauz, B. S., & Sanchez de la Cruz, J. S. (Septiembre de 2014). Diseño y construcción de una mesa vibratoria para utilizarla en colado dinámico. Quito, Pichincha, Ecuador.
- Rao, N. P. (2013). Manufacturing technology: Foundry, Forming and Welding. *Volumen I, Cuarta*. Nwe Delhi: McGraw Hill.
- Rigoberto P. Sánchez-Figueroa, A. B.-D. (julio de 2015). Influencia del vertido Vibratorio en la Resistencia a la traccion del hierro con Grafito Esferoidal. Holguín, Cuba.
- Riley, W., & Sturges, L. (1996). *Ingeniería Mecánica DINÁMICA*. REVERTE S.A.
- Rodríguez, J., Castro, L., & del Real Romero, J. (2014). *Procesos industriales para materiales metálicos* (Segunda ed.). Madrid.
- S.S. Mishra, S. S. (Septiembre de 2015). Effect of Mold Vibration on Mechanical and Metallurgical Properties of Al-Cu Alloy. Bhubaneswar, India.
- Sánchez Figueroa, R. (2012). *Aumento en la competitividad; sostenibilidad y sustentabilidad de los fundidos metálicos por el método de vertido vibratorio*. Cuba.
- Scorza, R. (2010). *wordpress*. Recuperado el 22 de Mayo de 2018, de <https://ferrosos.files.wordpress.com/2010/10/tecnologia-de-la-fundicion.pdf>
- Titov, N., & Stepánov, Y. (1981). *Tecnología del proceso de fundición*. Moscú.
- Upton, B. (2013). *Pressure Diecasting: Metals—Machines—Furnaces*. Elsevier.
- Wadhwa, A. S., & Dhaliwal, E. H. (2008). *A Textbook of Engineering Material and Metallurgy*. Firewall Media.

Anexos

ANEXO I.

INFORME DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL MATERIAL SELECCIONADO.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE MATERIALES
LABORATORIO DE FUNDICIÓN



INFORME TÉCNICO

Solicitado por: Ing. Fausto Oviedo Msc.

Tipo de Trabajo: Espectrometría por chispa

Fecha: 01 de agosto del 2018

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

Descripción: Ensayo de espectrometría por chispa en dos probetas de latón

1. ANTECEDENTES.

Se recibe en el Laboratorio de Fundición de la Escuela Politécnica Nacional dos probetas sueltas de distintas dimensiones y formas.

Se solicita realizar la prueba 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	Imagen
Probetas de Latón	P1: M1	
	P2: M2	





ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE MATERIALES
LABORATORIO DE FUNDICIÓN



3. 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
Elemento	Valor [%]	Valor [%]
Zinc [Zn]	41,19	6,336
Plomo [Pb]	0,057	4,347
Estaño [Sn]	1,054	>3,000
Hierro [Fe]	0,033	0,153
Níquel [Ni]	0,027	0,286
Azufre[S]	-	0,030
Arsénico[As]	-	0,022
Cobre [Cu]	57,63	84,27
TOTAL [%]	99,99	>98,44

Nota: Para el caso de la muestra M2 el valor restante del estaño es igual a 1.56 que correspondería a un valor total de 4,56 % de Sn, lo cual resultaría el 100% de la composición total del espécimen

Ing. Luis G. Huilca

Técnico Responsable



Ing. Oscar Sotomayor

Jefe del Laboratorio de Fundición.

ANEXO II.
INFORME DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS PROBETAS FUNDIDAS.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE MATERIALES
LABORATORIO DE FUNDICIÓN



INFORME TÉCNICO

Solicitado por: Ing. Fausto Hernán Oviedo F. Msc.

Tipo de Trabajo: Espectrometría por chispa

Fecha: 18 de febrero del 2018

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

Descripción: Ensayo de espectrometría por chispa en probetas metálicas

1. ANTECEDENTES.

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

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

2. IDENTIFICACIÓN DE LAS PROBETAS.

Las probetas para los análisis correspondientes son identificadas como se muestra a continuación:

Nombre	Identificación	Imagen
Probeta Metálica	P1: M2	
Probeta Metálica	P2: M15	





ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE MATERIALES
LABORATORIO DE FUNDICIÓN



Probeta Metálica	P3: M18	
------------------	---------	--

3. ANTECEDENTES TÉCNICOS

3.1. Limpieza Superficial: Según la norma EN 15079: 2015 “Copper and copper alloys – Analysis by spark optical emission spectrometry (S - OES)”

3.1.1. Apparatus for sample surface preparation: Apartado 5.2

3.1.2. Surface preparation: Apartado 7.1

3.2. Método: Cu 120 Cu - Zn

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 (At least two number of sparks: apartado 7.3.3)

	M2	M15	M18
Componente	Valor [%]	Valor [%]	Valor [%]
Zinc [Zn]	36,78	27,10	42,02
Plomo[Pb]	0,238	1,127	0,058
Estaño [Sn]	0,314	0,824	0,099
Manganeso[Mn]	0,562	0,367	0,779
Hierro [Fe]	1,081	0,618	1,139
Níquel [Ni]	0,264	0,791	0,145
Silicio[Si]	0,010	-----	-----
Aluminio [Al]	0,869	0,769	0,887
Cobre [Cu]	59,87	68,39	54,86
TOTAL [%]	99,99	99,99	99,99





ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE MATERIALES
LABORATORIO DE FUNDICIÓN



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: 2

Analysis Time: 18.02.2019 12:28:01

Method: Cu120

	Zn [%]	Pb [%]	Sn [%]	P [%]	Mn [%]
Ø	36,78	0,238	0,314	<0,0050	0,562
	Fe [%]	Ni [%]	Si [%]	Al [%]	S [%]
Ø	1,081	0,264	0,010	0,869	<0,0030
	As [%]	Bi [%]	Se [%]	Cu [%]	
Ø	<0,0040	0,0057	<0,0050	59,87	

18.02.2019 12:29

1/1

Bruker Analysis Report



Sample: 15

Analysis Time: 18.02.2019 12:13:22

Method: Cu120

	Zn [%]	Pb [%]	Sn [%]	P [%]	Mn [%]
Ø	27,10	1,127	0,824	<0,0050	0,367
	Fe [%]	Ni [%]	Si [%]	Al [%]	S [%]
Ø	0,618	0,791	0,0060	0,769	<0,0030
	As [%]	Bi [%]	Se [%]	Cu [%]	
Ø	0,0085	<0,0050	<0,0050	68,39	

Bruker Analysis Report



Sample: 18

Analysis Time: 18.02.2019 12:44:51

Method: Cu120

	Zn [%]	Pb [%]	Sn [%]	P [%]	Mn [%]
Ø	42,02	0,058	0,099	<0,0050	0,779
	Fe [%]	Ni [%]	Si [%]	Al [%]	S [%]
Ø	1,139	0,145	0,0077	0,887	<0,0030
	As [%]	Bi [%]	Se [%]	Cu [%]	
Ø	<0,0040	0,0051	<0,0050	54,86	

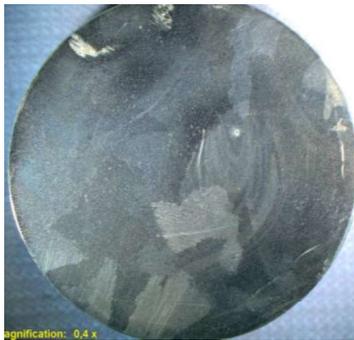
**ANEXO III.
MACROGRAFÍAS.**



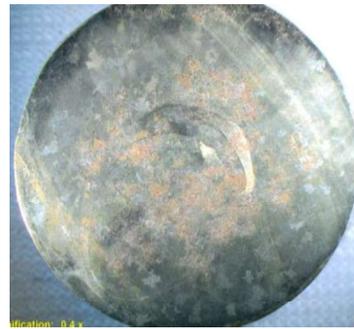
Macrografía probeta CE0.2_4X



Macrografía probeta CD1.2_4X



Macrografía probeta CD2.2_4X



Macrografía probeta CD3.1_4X



Macrografía probeta CD4.1_4X

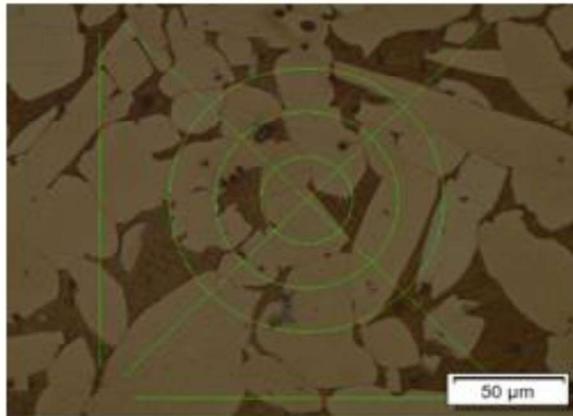
ANEXO IV.

INFORME DE LA MEDICIÓN DE GRANO.

Grain Size according to Intercept Method ASTM E 112-12
(Summary)

Analysis summary:

Reference	Sample 01		
Group			
Sample Comment			
Date	15/02/2019 12:03:54		
Standard	ASTM E 112-12		
ASTM Grain Size Number G	7,50		+/- 0.00
Mean Intercept Length [μm]		23,78	
Average Number of Intercepts		66,00	
Number of Intercepts per Unit Length [1/mm]		42,05	



Sample Information:

Reference: Sample 01
Group:

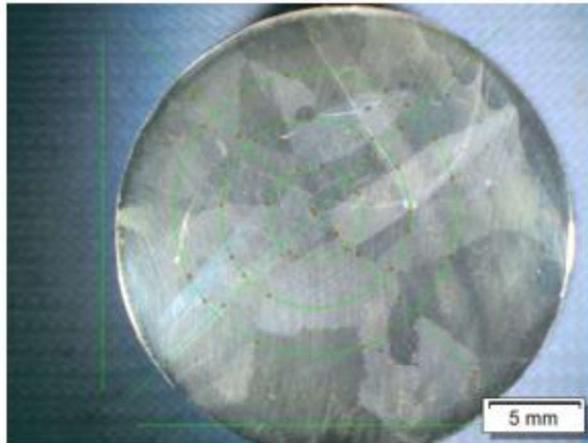
Image Results:

Image Name	P2_CA_500X.tif	
Number of Intercepts		66
Pattern Length		1569,66
Image Comment		

Grain Size according to Intercept Method ASTM E 112-12
(Summary)

Analysis summary:

Reference	Sample 01	
Group		
Sample Comment		
Date	15/02/2019 16:03:52	
Standard	ASTM E 112-12	
ASTM Grain Size Number G	-7	+/- 0.00
Mean Intercept Length [µm]	4265,39	
Average Number of Intercepts	46,00	
Number of Intercepts per Unit Length [1/mm]	0,23	



Sample Information:

Reference: Sample 01

Group:

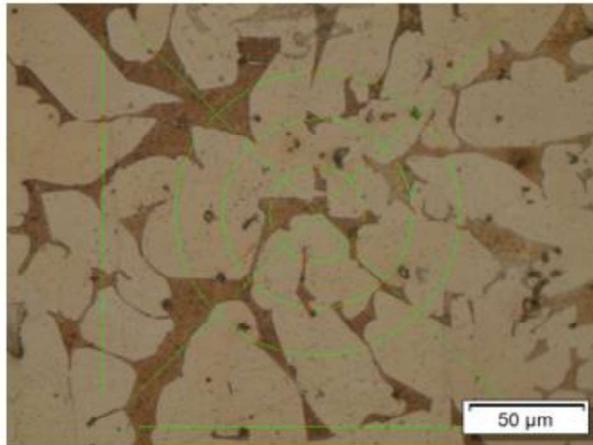
Image Results:

Image Name	P4_CA_4X.jpg	
Number of Intercepts		46
Pattern Length		196208,00
Image Comment		

Grain Size according to Intercept Method ASTM E 112-12
(Summary)

Analysis summary:

Reference Group	Sample 01	
Sample Comment		
Date	15/02/2019 11:45:21	
Standard	ASTM E 112-12	
ASTM Grain Size Number G	7,41	+/- 0.00
Mean Intercept Length [µm]		24,53
Average Number of Intercepts		64,00
Number of Intercepts per Unit Length [1/mm]		40,77



Sample Information:

Reference: Sample 01

Group:

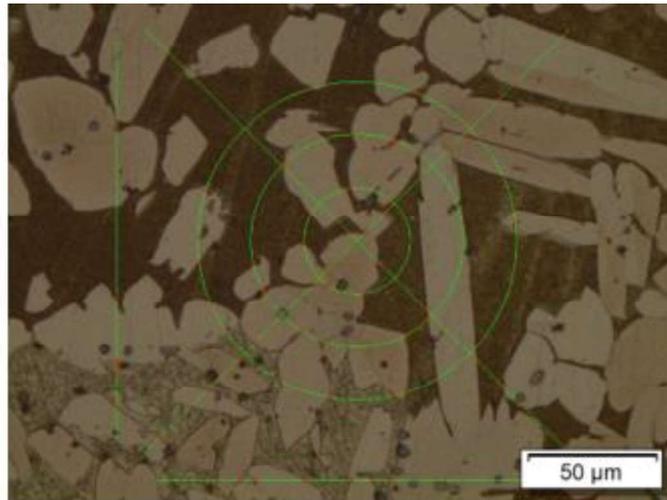
Image Results:

Image Name	P5_CA_500X.tif	
Number of Intercepts		64
Pattern Length		1569,66
Image Comment		

Grain Size according to Intercept Method ASTM E 112-12
(Summary)

Analysis summary:

Reference	Sample 01	
Group		
Sample Comment		
Date	15/02/2019 12:07:20	
Standard	ASTM E 112-12	
ASTM Grain Size Number G	8,09	+/- 0.00
Mean Intercept Length [µm]		19,38
Average Number of Intercepts		81,00
Number of Intercepts per Unit Length [1/mm]		51,60



Sample Information:

Reference: Sample 01

Group:

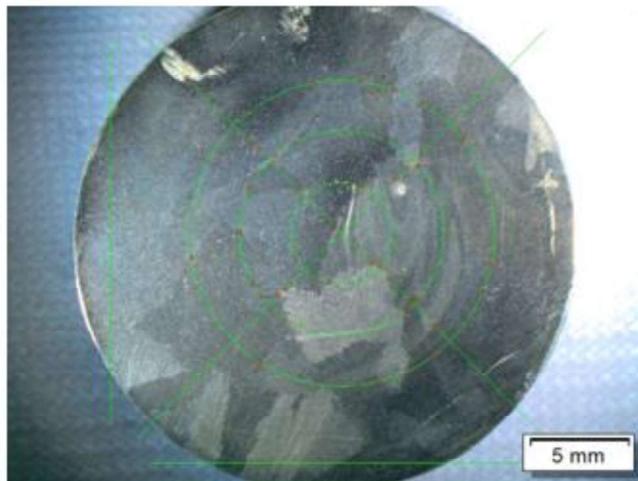
Image Results:

Image Name	P7_CA_500X.tif	
Number of Intercepts		81
Pattern Length		1569,66
Image Comment		

Grain Size according to Intercept Method ASTM E 112-12
(Summary)

Analysis summary:

Reference	Sample 01	
Group		
Sample Comment		
Date	15/02/2019 15:57:02	
Standard	ASTM E 112-12	
ASTM Grain Size Number G	-8	+/- 0.00
Mean Intercept Length [µm]	4905,20	
Average Number of Intercepts	40,00	
Number of Intercepts per Unit Length [1/mm]	0,20	



Sample Information:

Reference...: Sample 01

Group...

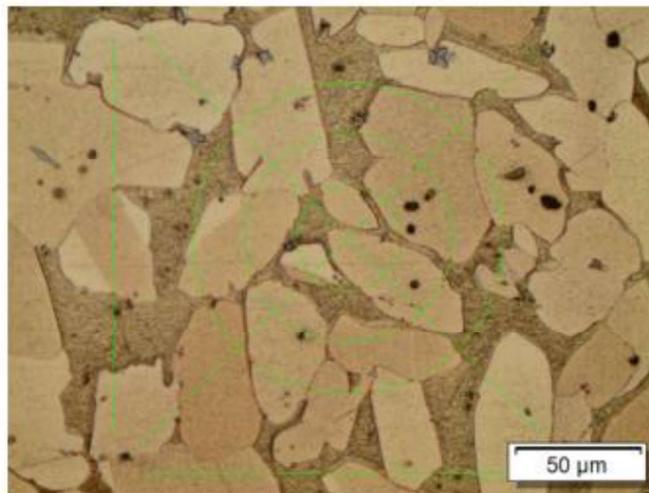
Image Results:

Image Name	P9_CA_4X.jpg	
Number of Intercepts	40	
Pattern Length	196208,00	
Image Comment		

| Grain Size according to Intercept Method ASTM E 112-12
(Summary)

Analysis summary:

Reference	Sample 01	
Group		
Sample Comment		
Date	15/02/2019 11:59:40	
Standard	ASTM E 112-12	
ASTM Grain Size Number G	7,08	+/- 0.00
Mean Intercept Length [μm]		27,54
Average Number of Intercepts		57,00
Number of Intercepts per Unit Length [1/mm]		36,31



Sample Information:

Reference: Sample 01

Group:

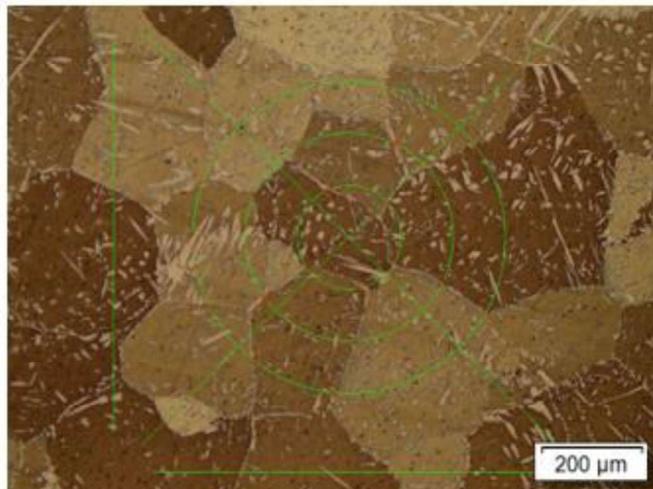
Image Results:

Image Name	P11_CA_500X.tif	
Number of Intercepts		57
Pattern Length		1569,66
Image Comment		

Grain Size according to Intercept Method ASTM E 112-12
(Summary)

Analysis summary:

Reference	Sample 01	
Group		
Sample Comment		
Date	15/02/2019 11:56:03	
Standard	ASTM E 112-12	
ASTM Grain Size Number G	1,69	+/- 0,00
Mean Intercept Length [μm]		178,37
Average Number of Intercepts		44,00
Number of Intercepts per Unit Length [1/mm]		5,61



Sample Information:

Reference: Sample 01

Group:

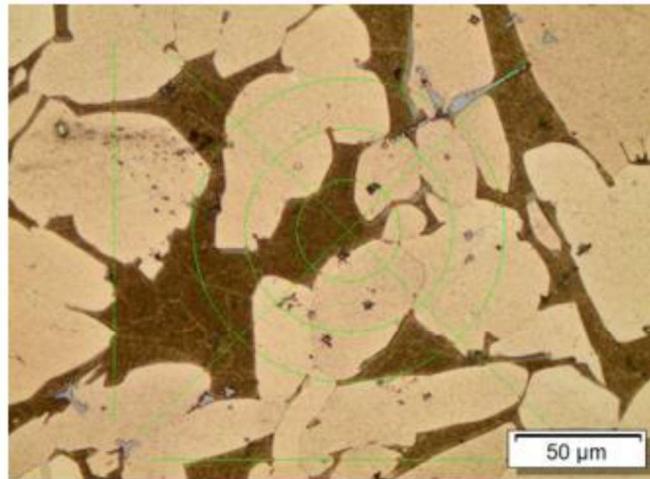
Image Results:

Image Name	P13_CA_100X.tif	
Number of Intercepts		44
Pattern Length		7848,32
Image Comment		

Grain Size according to Intercept Method ASTM E 112-12
(Summary)

Analysis summary:

Reference	Sample 01	
Group		
Sample Comment		
Date	15/02/2019 12:10:22	
Standard	ASTM E 112-12	
ASTM Grain Size Number G	6,92	+/- 0.00
Mean Intercept Length [µm]		29,07
Average Number of Intercepts		54,00
Number of Intercepts per Unit Length [1/mm]		34,40



Sample Information:

Reference: Sample 01

Group:

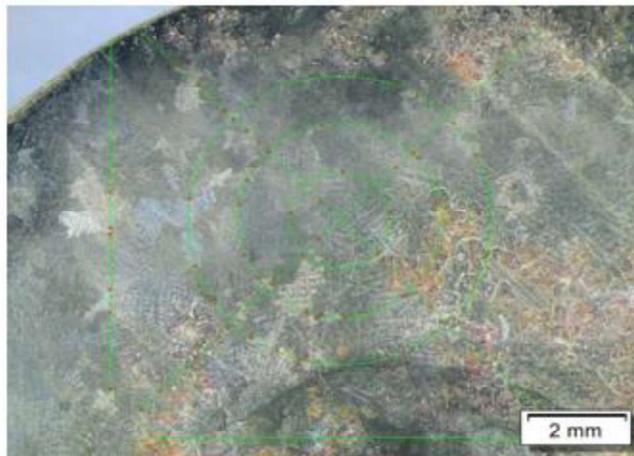
Image Results:

Image Name	P14_CA_500X.tif	
Number of Intercepts		54
Pattern Length		1569,66
Image Comment		

Grain Size according to Intercept Method ASTM E 112-12
(Summary)

Analysis summary:

Reference	Sample 01	
Group		
Sample Comment		
Date	15/02/2019 16:00:58	
Standard	ASTM E 112-12	
ASTM Grain Size Number G	-4	+/- 0.00
Mean Intercept Length [µm]		1353,16
Average Number of Intercepts		58,00
Number of Intercepts per Unit Length [1/mm]		0,74



Sample Information:

Reference: Sample 01

Group:

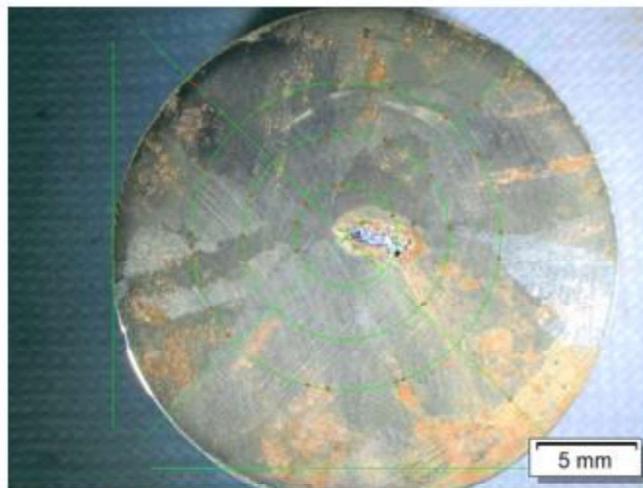
Image Results:

Image Name	P16_CA_4X.tif	
Number of Intercepts		58
Pattern Length		78483,20
Image Comment		

Grain Size according to Intercept Method ASTM E 112-12
(Summary)

Analysis summary:

Reference	Sample 01	
Group		
Sample Comment		
Date	15/02/2019 15:52:53	
Standard	ASTM E 112-12	
ASTM Grain Size Number G	-8	+/- 0.00
Mean Intercept Length [μm]	5030,97	
Average Number of Intercepts	39,00	
Number of Intercepts per Unit Length [1/mm]	0,20	



Sample Information:

Reference: Sample 01

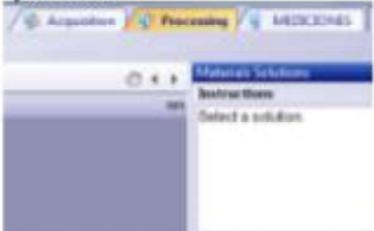
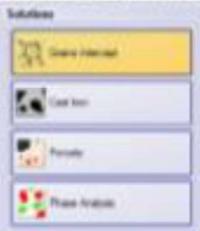
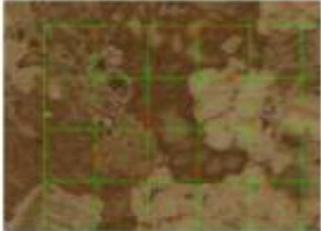
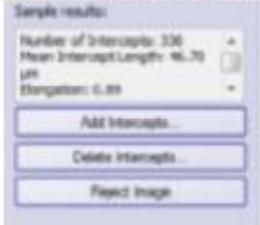
Group:

Image Results:

Image Name	P17_CA_4X.jpg	
Number of Intercepts		39
Pattern Length		196208,00
Image Comment		

Anexo V.

PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE GRANO USANDO EL SAFWARE.

<p>1. Cargar la imagen en el software "Stream Essentials" con formato (*tif) con una amplificación de 100X.</p> 	<p>2. Seleccionar la opción "Processing" ubicada en la parte superior derecho de la pantalla.</p> 
<p>3. Seleccionar la opción "Grain Intercept" para determinar el tamaño de grano.</p> 	<p>4. Presionar siguiente en la fecha azul.</p> 
<p>5. Seleccionar el mejor patrón de intersección en la opción "Pattern of test lines"</p> 	<p>6. El software da por defecto las intersecciones que logra identificar.</p> <p>7.</p> 
<p>8. Si se requiere añadir o borrar intersecciones, para lo cual se selecciona la opción "Add Intercepts"</p> 	<p>9. Seleccionar la opción generar reporte "Reporting" y finalizar "Finish", el programa genera un archivo en Word.</p> 

ANEXO VI.

INFORME DEL ENSAYO DE TRACCIÓN.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
MECÁNICA



LABORATORIO DE ANÁLISIS
DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES

F01-PE-LAEV-01 Rev.00

INFORME

LAEV – M19.011

Quito, 30 de enero de 2019

Solicitado por: M.Sc. Fausto Oviedo
Persona de contacto: Ramiro Álvarez, Carlos Veloz
Teléfono: 0996250103/0996131230
Correo: esteban289@gmail.com
Fecha de recepción: 09/01/2019
Fecha de ejecución: 24/01/2019

ORDEN DE TRABAJO Nº: N/A

1. **MUESTRAS:** Veintinueve (29) probetas de latón para ensayo de tracción.

2. GENERALIDADES E IDENTIFICACIÓN:

La siguiente descripción fue proporcionada por el cliente:

Título de la tesis: CARACTERIZACIÓN DE UNA ALEACIÓN DE LATÓN OBTENIDA POR COLADO DINÁMICO CON VARIACIÓN DE AMPLITUD DE LA MESA VIBRATORIA

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

Tabla 1. Identificación de las muestras.

Id. cliente	Id. del LAEV
V1D3.1	M19.011.01
V1D3.2	M19.011.02
V1D3.3	M19.011.03
V3D2.1	M19.011.04
V3D2.2	M19.011.05
V3D2.3	M19.011.06
V2D1.1	M19.011.07
V2D1.2	M19.011.08



LAEV – M19.011



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

Tabla 1. Identificación de las muestras (continuación).

V2D1.3	M19.011.09
V1D2.1	M19.011.10
V1D2.2	M19.011.11
V1D2.3	M19.011.12
V3D3.1	M19.011.13
V3D3.2	M19.011.14
V3D3.3	M19.011.15
V3D1.1	M19.011.16
V3D1.2	M19.011.17
V2D2.1	M19.011.18
V2D2.2	M19.011.19
V2D2.3	M19.011.20
V1D1.1	M19.011.21
V1D1.2	M19.011.22
V1D1.1	M19.011.23
V2D3.1	M19.011.24
V2D3.2	M19.011.25
V2D3.3	M19.011.26
EO.1	M19.011.27
EO.2	M19.011.28
EO.2	M19.011.29

3. CONDICIONES AMBIENTALES:

Temperatura: $26,8 \pm 0,7^{\circ}\text{C}$

Humedad relativa: $27,9 \pm 1,1\%$

4. ENSAYO DE TRACCION

En la tabla 2 se presentan los resultados obtenidos en el ensayo de tracción



LAEV – M19.011

Página 2 de 4

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 obtenida en el ensayo.

Id.	Diámetro Promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción	
	mm	lbf	N	ksi	MPa
M19.011.01	12,87	2 318	10 313	11,5	79,3
M19.011.02	12,75	2 417	10 752	12,2	84,2
M19.011.03	12,94	1 052	4 679	5,2	35,6
M19.011.04	12,86	4 536	20 177	22,5	155,3
M19.011.05	12,76	5 259	23 391	26,5	182,9
M19.011.06	12,82	4 794	21 325	24,0	165,2
M19.011.07	12,92	1 608	7 154	7,9	54,6
M19.011.08	12,73	1 406	6 256	7,1	49,2
M19.011.09	12,81	1 579	7 026	7,9	54,5
M19.011.10	12,77	2 712	12 063	13,7	94,2
M19.011.11	12,72	1 487	6 613	7,5	52,0
M19.011.12	12,75	1 430	6 359	7,2	49,8
M19.011.13	12,77	4 804	21 371	24,2	166,9
M19.011.14	12,75	5 065	22 531	25,6	176,5
M19.011.15	12,50	4 386	19 509	23,1	159,0
M19.011.16	12,80	4 491	19 978	22,5	155,3
M19.011.17	12,83	3 072	13 667	15,3	105,7
M19.011.18	12,74	2 685	11 942	13,6	93,7
M19.011.19	12,78	8 714	38 760	43,8	302,2
M19.011.20	12,81	4 235	18 837	21,2	146,2
M19.011.21	12,99	2 755	12 253	13,4	92,5
M19.011.22	12,78	1 580	7 027	7,9	54,8
M19.011.23	12,81	10 081	44 843	50,5	347,9
M19.011.24	12,87	4 043	17 982	20,0	138,2
M19.011.25	12,65	3 825	17 016	19,6	135,4
M19.011.26	13,01	4 110	18 282	19,9	137,5
M19.011.27	12,79	3 087	13 733	15,5	106,9
M19.011.28	12,77	3 323	14 781	16,7	115,4
M19.011.29	12,96	2 121	9 434	10,4	71,5



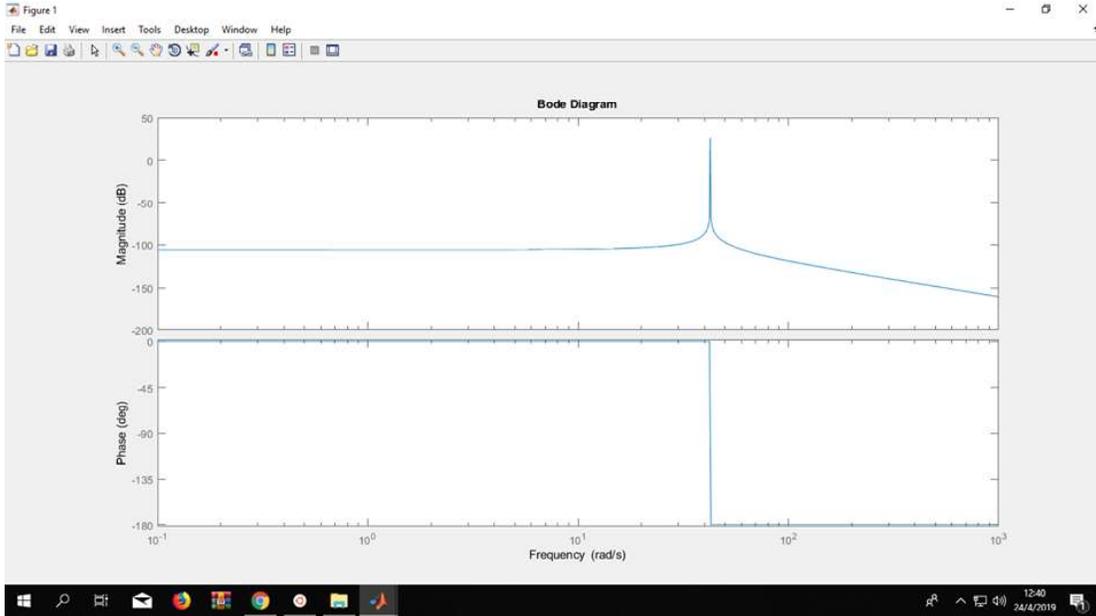
Nota.- Los resultados contenidos en el presente informe corresponden únicamente a las muestras ensayadas por el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones (LAEV). Además, los valores de fuerza que se emiten en el presente documento (y con los que se ha evaluado la conformidad) corresponden a 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 Guachamín
Cargo:	TÉCNICO DOCENTE	JEFE
LABORATORIO DE ANALISIS DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES		

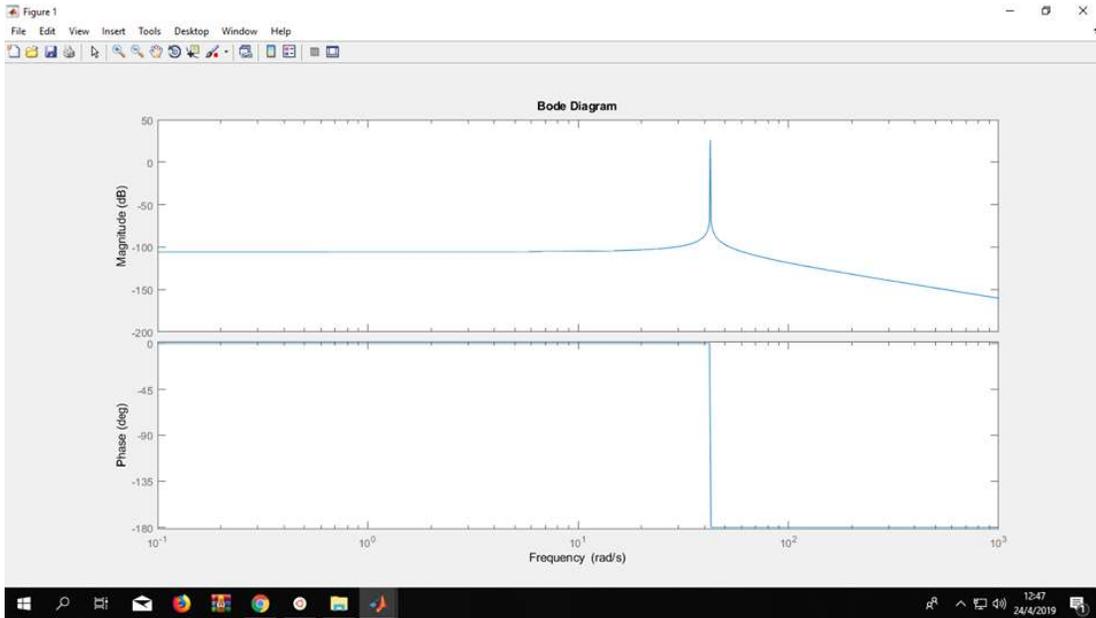


ANEXO VII. DIAGRAMA DE BODE MATLAB

Disco 0,41 kg

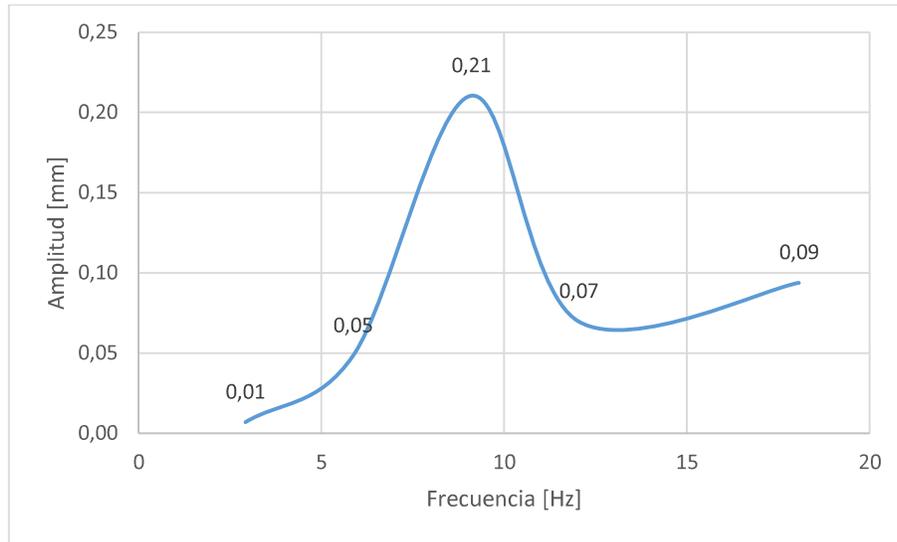


Disco 0,28 kg

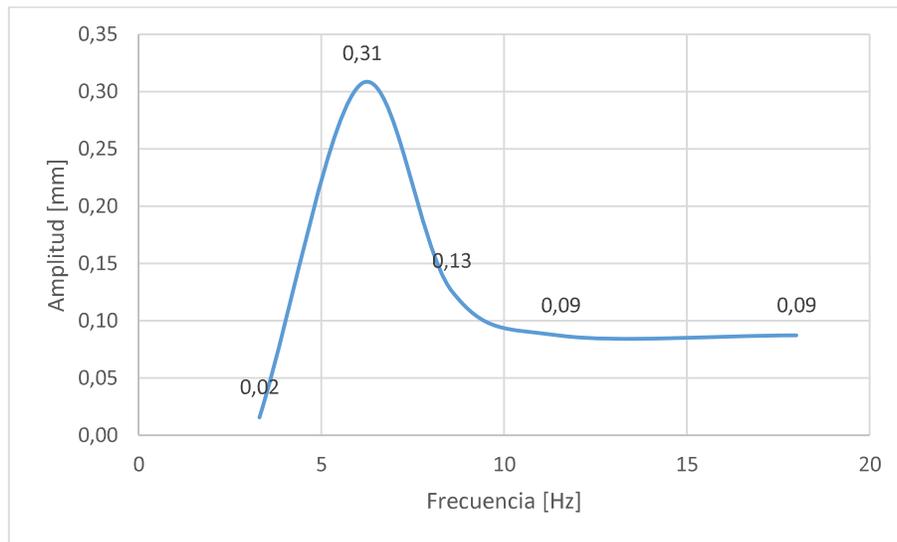


ANEXO VIII.
GRAFICOS FRECUENCIA VS AMPLITUD.

Disco 0,41 kg



Disco 0,28 kg



Disco 0.41 kg

Velocidad [mm/s]	Desplazamiento Pico a Pico [µm]	Frec1/1000 [RPM]	0.0004367 0.09955961	15.1732616 175.534836	0.00416569 1.1390146	102.728477 351.276542	0.00409381 1.1270231	93.34466 352.97
0.00058218 0.11999544	13.5522413 174.2076	0.00059474 0.1249437	19.1280422 176.114471	0.00402277 1.127527	102.019783 352.941162	0.00400463 1.12071121	93.38775 352.797058	
0.0005194 0.1085397	8.316153 174.97067	0.00049475 0.1004008	12.0853739 175.6526	0.00395344 1.09908473	99.9059 352.537993	0.00406570 1.12079024	91.94577 352.739441	
0.00058218 0.11999544	13.5522413 174.2076	0.00051487 0.11566479	16.1114713 175.4928	0.0041962 1.15741813	105.184937 351.50528	0.00396234 1.07885957	86.50409 351.848846	
0.0005194 0.1085397	8.316153 174.97067	0.00041205 0.08659053	13.965809 175.877869	0.00397527 1.09465683	101.772507 351.676971	0.00396942 1.10805666	86.12886 351.734253	
0.00048288 0.09105299	11.581852 173.71373	0.00047664 0.11327998	17.494349 175.524139	0.00414098 1.151018	102.668876 352.164437	0.00401749 1.11830783	94.60002 352.307953	
0.0004362 0.08191216	12.4351416 174.165451	0.00046397 0.10535605	13.3517308 175.3101	0.00401246 1.13358486	95.97828 351.4481	0.00400328 1.09799564	91.48588 352.710632	
0.0004779 0.09512032	13.2109232 174.133865	0.00047688 0.09739578	11.5082512 175.89935	0.00403191 1.1091454	97.49604 352.941162	0.00396831 1.10349747	89.88903 351.906158	
0.00052727 0.11789408	15.3691116 174.102228	0.00051238 0.09716202	11.4825916 176.206568	0.00397081 1.10718536	95.97267 351.8775	0.00410572 1.1076248	94.137754 351.676971	
0.0004702 0.09210699	12.3241405 174.30249	0.00050026 0.12112095	14.1862841 176.071411	0.00421058 1.16714931	96.68886 352.4229	0.00396061 1.07218289	90.38379 351.2195	
0.00049667 0.09214549	12.7376813 174.513718	0.00052352 0.10176037	14.1818894 176.641891	0.00420761 1.15887749	97.8729 351.9922	0.0040135 1.12574053	102.32096 352.361417	
0.00039087 0.11724593	10.2796458 174.855708	0.00050988 0.10913078	11.4643688 176.276369	0.00410708 1.13023563	95.74833 352.5667	0.00402763 1.12177229	96.14978 351.9922	
0.00048716 0.10288185	12.269636 174.736069	0.00052505 0.11340461	16.3507633 175.641892	0.00406072 1.127472	98.29234 352.307953	0.00397907 1.09766446	93.09574 351.848846	
0.00040085 0.09681667	12.8939316 174.460861	0.00056126 0.14019927	16.4844849 176.643768	0.0040024 1.1222328	92.825422 351.8775	0.00408807 1.12120061	91.63005 351.106994	
0.00044222 0.08870566	14.0184927 174.980255	0.0005125 0.11097029	16.7234344 175.78123	0.00410039 1.12582656	96.3787 351.906158	0.00427703 1.17198813	100.32142 352.193054	
0.00041612 0.09601316	13.6994095 174.799713	0.0005694 0.11956436	17.37414 176.179123	0.00388682 1.07972038	93.95172 352.078247	0.00400728 1.11585212	91.916361 352.5092	
0.00048367 0.09946741	12.3241405 174.30249	0.00050278 0.09502388	10.77102 175.856884	0.00412964 1.15148532	97.95653 352.78825	0.00404411 1.1208466	88.48615 352.394165	
0.00041612 0.09601316	13.6994095 174.799713	0.00048659 0.09625737	12.731113 175.674026	0.00394842 1.0980382	90.03996 351.676971	0.00409225 1.12574053	102.32096 352.361417	
0.0004515 0.08815253	15.6298151 175.239862	0.00048705 0.09947962	11.523483 175.459976	0.00397014 1.09135066	92.90784 351.9635	0.00402837 1.11763072	97.42863 352.106994	
0.00049031 0.09746344	12.7376813 174.927105	0.0005052 0.10990248	13.4898644 176.006851	0.00393153 1.08571148	91.619 353.43327	0.00406192 1.1333217	93.13834 352.365417	
0.00045338 0.10914798	11.5780739 174.895248	0.00052572 0.11293552	14.1386223 175.706177	0.00399483 1.11256456	92.14336 351.791534	0.00410921 1.13058045	92.67831 351.9635	
0.00042345 0.09038885	11.321173 175.17829	0.00050172 0.10349317	12.2389846 175.7598	0.00405024 1.11542249	94.15188 353.0727	0.00406572 1.11532678	91.08222 352.5667	
0.0003827 0.10503828	13.2959375 175.246445	0.00046968 0.08383445	11.5441837 175.88661	0.00415037 1.14062035	96.38236 352.4229	0.00409951 1.107805	91.77724 352.365417	
0.00048367 0.09946741	12.3241405 174.30249	0.0005809 0.11499148	13.5666351 175.6526	0.00400693 1.11680007	92.08744 351.50528	0.00399982 1.11121869	90.4044 351.9922	
0.00041612 0.09601316	13.6994095 174.799713	0.00049162 0.10102142	11.1818896 176.824473	0.00410209 1.11939674	102.32972 351.791534	0.00407859 1.17842881	98.55524 352.193054	
0.0004515 0.08815253	15.6298151 175.239862	0.00051788 0.11264951	15.7877159 175.681815	0.00406174 1.12132313	95.51055 352.5092	0.00409498 1.13057518	93.75439 352.078247	
0.00048288 0.09105299	11.581852 173.71373	0.00049952 0.10102142	11.7371716 172.941818	0.00407888 1.1160773	95.0284 352.307953	0.00416454 1.13246167	95.40513 351.591215	
0.0004362 0.08191216	12.4351416 174.165451	0.00050124 0.10414734	17.0212416 176.2546	0.00414387 1.15597868	94.80268 352.164437	0.00409391 1.09854949	90.62574 351.2009	
0.0004779 0.09512032	13.2109232 174.133865	0.00047085 0.10983241	13.9789894 175.502747	0.00410888 1.13346159	94.76111 351.906158	0.00409307 1.13056663	92.82509 351.791534	
0.00041612 0.09601316	13.6994095 174.799713	0.00042203 0.08535935	11.4945116 175.576737	0.00400628 1.10698844	92.65008 352.5092	0.00411339 1.13085593	95.71662 352.4804	
0.0004515 0.08815253	15.6298151 175.239862	0.0005589 0.12212896	14.17099 176.470581	0.00402193 1.09473372	91.0181046 352.681854	0.00393555 1.0915002	94.97999 352.394165	
0.00048367 0.09946741	12.3241405 174.30249	0.00051696 0.0948801	12.6296276 175.427957	0.00404798 1.11899562	94.69295 352.5092	0.00396798 1.09473372	91.1441354 352.3667	
0.00041612 0.09601316	13.6994095 174.799713	0.00042417 0.09181368	10.21217518 175.818446	0.00406174 1.12132313	95.51055 352.5092	0.00406572 1.11532678	93.41488 352.825827	
0.00045338 0.10914798	11.5780739 174.895248	0.00051238 0.09739578	11.5082512 175.89935	0.00414098 1.151018	95.97828 351.4481	0.00407414 1.12439752	94.02743 353.43327	
0.00042345 0.09038885	11.321173 175.17829	0.00052144 0.09664746	11.4765987 176.373322	0.00414243 1.13977049	98.4919546 352.78825	0.00398824 1.10957032	93.65503 352.537993	
0.0003827 0.10503828	13.2959375 175.246445	0.00056427 0.10802416	11.4864788 176.039124	0.00411339 1.11219949	94.82412 352.78825	0.00411209 1.14272845	96.59341 352.6262	
0.00048367 0.09946741	12.3241405 174.30249	0.00056014 0.11311041	16.1686935 175.459976	0.00407433 1.12496209	91.85674 352.38667	0.00417207 1.140312	95.81129 352.64268	
0.00041612 0.09601316	13.6994095 174.799713	0.00062731 0.15107213	22.62204 195.80501	0.00412968 1.13313651	93.52245 352.681854	0.00404497 1.11885482	93.751259 352.797058	
0.0004515 0.08815253	15.6298151 175.239862	0.000390405 1.28223848	181.566467 254.461918	0.00403921 1.11489994	94.1039843 351.648436	0.00399338 1.10884543	92.95579 351.017445	
0.0004779 0.09512032	13.2109232 174.133865	0.00038625 1.14984584	141.217518 192.742828	0.00398175 1.11135662	90.21679 351.791534	0.00409547 1.1331676	96.182057 351.791534	
0.0004362 0.08191216	12.4351416 174.165451	0.0044003 1.18954633	331.04182 337.798033	0.00410088 1.14790163	96.14908 352.0346	0.00407414 1.12439752	94.02743 353.43327	
0.0004779 0.09512032	13.2109232 174.133865	0.0042728 1.22719789	133.4522 340.712616	0.00394547 1.08314717	90.01659 352.106994	0.00429883 1.5794609	478.302 442.48826	
0.00041612 0.09601316	13.6994095 174.799713	0.00397484 1.10502148	119.241417 354.592468	0.00405991 1.12125814	94.26952 352.2505	0.00420389 1.5729889	530.245 488.599335	
0.0004515 0.08815253	15.6298151 175.239862	0.00426208 1.1889317	174.275588 353.54776	0.00403124 1.10216661	91.2273 347.961656	0.00419864 1.5794609	465.09145 488.599335	
0.00048288 0.09105299	11.581852 173.71373	0.00423716 1.188697	136.5039586 351.4295	0.00419586 1.13628851	95.65407 351.5339	0.00422862 1.779351	438.662 529.996338	
0.0004362 0.08191216	12.4351416 174.165451	0.00409715 1.14949209	109.061104 352.028874	0.00397970 1.09380555	90.28407 351.8282	0.0043077 7.09817371	534.8388	
0.0004779 0.09512032	13.2109232 174.133865	0.00423716 1.188697	136.5039586 351.4295	0.00407931 1.13286607	100.006714 352.5667	0.00432362 7.9250474	418.508 546.7861	
0.00041612 0.09601316	13.6994095 174.799713	0.0044551 1.13180209	210.360245 352.078247	0.00396724 1.10632136	89.73753 351.591215	0.00450499 8.827768	438.7065 546.3652	
0.0004515 0.08815253	15.6298151 175.239862	0.00414515 1.16740155	111.8174 351.61972	0.00403157 1.10700834	94.6114 352.97	0.00448758 8.939603	478.6265 545.743958	
0.00050415 1.14383678	15.9849224 175.342468	0.00407296 1.13194656	103.5805 352.164337	0.00407051 1.13466717	95.68884 351.8052	0.00451911 8.041036	423.762482 545.950867	

0.04466019 7.96141	424.3999 547.07862	0.02431007 3.334684	342.06871 722.684265	0.07014182 6.67376135	186.992386 1083.84766
0.04466557 7.9602605	415.2753 546.489658	0.02432441 3.118147	138.1381718 722.610319	0.07003176 6.48172	186.51004 1084.384
0.0441731 7.956582	441.17024 546.0751	0.0241272 2.8925461	138.302277 722.610319	0.07051616 6.7007266	182.97191 1084.01086
0.04484665 7.967837	422.882629 546.0317	0.02374978 2.16620495	137.28327 722.684265	0.07016546 6.688473	183.12088 1083.9292
0.04380003 7.845048	416.094244 546.7335	0.02400629 3.27767043	139.168249 722.3218	0.07070555 6.68842425	181.132874 1083.31632
0.04390732 7.8955067	415.515174 545.179609	0.02408885 3.27640646	141.364627 722.610319	0.07029655 6.48173936	186.721872 1084.384
0.0441331 7.939246	419.8264 546.514	0.02399825 3.29440544	149.907964 722.9434	0.07035498 6.7124932	182.541489 1084.17407
0.04381129 7.89372	414.458771 545.950867	0.02405392 3.28005225	137.149155 721.13324	0.07088841 6.68400494	180.5313 1083.9292
0.0438025 7.9368009	415.45517 547.15063	0.02408888 3.31038676	140.012465 723.009	0.07035774 6.68424	192.934372 1084.3374
0.0444152 7.9602655	422.384979 546.4066	0.02409			

ORDEN DE EMPASTADO