



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESTUDIO DE LA MICROESTRUCTURA Y DE LA MAQUINABILIDAD DE UNA ALEACIÓN COBRE – ZINC (CU - ZN) AL ADICIONAR SILICIO Y FERRO SILICIO EN SU COMPOSICIÓN

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

HEREDIA SIMBAÑA JOAO RODRIGO
joao.heredia@epn.edu.ec

MEDINA AGUIRRE JEFFERSON EMILIO
jefferson.medina@epn.edu.ec

DIRECTOR:
ING. DÍAZ CAMPOVERDE CARLOS WIME, M.Sc.
carlos.diaz@epn.edu.ec

CODIRECTOR:
ING. FAUSTO HERNÁN OVIEDO FIERRO, M.Sc.
fausto.oviedo@epn.edu.ec

Quito, febrero 2021

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **JOAO RODRIGO HEREDIA SIMBAÑA Y JEFFERSON EMILIO MEDINA AGUIRRE**, bajo mi supervisión.

Ing. Carlos Diaz M.Sc.

DIRECTOR DE PROYECTO

Ing. Fausto Oviedo M.Sc.

CODIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Nosotros, **Joao Rodrigo Heredia Simbaña y Jefferson Emilio Medina Aguirre**, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

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

Joao Rodrigo Heredia Simbaña

Jefferson Emilio Medina Aguirre

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo de investigación a mis padres Marco Heredia y María Simbaña, la razón de mi vivir, quienes me alientan a ser una mejor persona cada día y me motivan a seguir adelante. A mi familia por brindarme su apoyo incondicional durante mi formación profesional.

Joao Heredia

El presente trabajo de titulación, dedico con mucho cariño a mis apreciados padres Emilio Medina Rodríguez y Rosa Elvira Aguirre Almeida, quienes fueron el pilar fundamental en los momentos difíciles, todos sus consejos me sirvieron para alcanzar mi anhelada meta. Siempre estaré infinitamente agradecido por todo el amor incondicional que me brindaron.

A mi hermano Anderson Stalin Medina Aguirre que a pesar de ser menor, siempre ha sabido apoyarme incondicionalmente, siendo ejemplo de superación y perseverancia.

A toda la familia Medina - Aguirre que permanentemente me alentaron a luchar por conseguir mi sueño, sus enseñanzas me sirvieron para seguir progresando en mi vida.

Jefferson Medina

AGRADECIMIENTO

A mi padre, quien me enseñó que los sueños y metas, si se cumplen cuando entregas todo tu esfuerzo, dedicación y sacrificio por conseguirlos. Por ser mi ejemplo a seguir y estar siempre a mi lado tanto en las buenas como en las malas, apoyándome en cada una de las decisiones que he tomado a lo largo de mi vida.

A mi madre, por inculcarme el valor de la familia, por su amor, confianza y apoyo incondicional. La mujer que siempre se ha preocupado y ha estado pendiente de mí. El pilar de mi vida y de mi familia.

A mis hermanas quienes me motivan a seguir adelante, a mis sobrinos por alegrar mis días sacándome una sonrisa en los momentos difíciles.

Agradezco a mi director y codirector Ing. Diaz e Ing. Oviedo por su guía, paciencia y buena predisposición para la realización del presente trabajo de titulación.

A Don Fabián, por la colaboración prestada en el Laboratorio de fundición, por los conocimientos compartidos y por su amistad.

Al equipo de trabajo del decanato y del laboratorio de metalografía desgaste y falla por la ayuda y las facilidades brindadas durante el desarrollo del proyecto.

A mi compañero Jefferson Medina por su esfuerzo, dedicación y perseverancia para sacar adelante el presente trabajo de titulación, pero sobre todo gracias por su amistad.

A todas aquellas personas que me ayudaron a lo largo de esta trayectoria y han aportado con su granito de arena para que cumpla con esta meta en especial al grupo "LOS MAMADITOS" gracias por brindarme su amistad y haber tenido la dicha de compartir vivencias inolvidables junto a ustedes.

A la Escuela Politécnica Nacional y a la Facultad Ingeniería Mecánica por abrirme las puertas y concederme la oportunidad de vivir esta experiencia tan gratificante tanto académica como personal. Siempre estaré agradecido de haber pasado por sus aulas y orgulloso de ser parte de esta gran institución.

Joao Heredia

Quiero agradecer a Dios que me ha dado la fortaleza y sabiduría para seguir adelante, la Virgen María que ha sido mi amparo y protección en los momentos más difíciles de mi etapa estudiantil.

A mis padres Emilio Medina, Elvira Aguirre y mi hermano Anderson Medina que fueron el soporte, iluminaron mi camino y siempre me dieron las pautas necesarias para poder realizar mis estudios. Gracias por ser pacientes en mis momentos de enojo y tristeza.

A la familia Medina – Aguirre que siempre estaban al pendiente de mi trayectoria estudiantil en especial a mi tía María Medina.

A mi segunda familia que forme durante mi vida universitaria, mis amigos y compañeros que me ayudaron avanzar en este camino lleno de dificultades, pero también de alegrías. María Fernanda A, Alejandra S, Viviana S, Ronny A, Anderson I, Antonio C, Juan Andrés, Damián C, Marco Ch, David M, Patricio G, entre otras personas con las que hemos compartido momentos únicos, sus enseñanzas y apoyo incondicional hicieron una experiencia inolvidable en estos años, siempre contarán conmigo si me necesitan. Además, quiero agradecer al grupo de amigos “MAMADITOS F.C.” con quienes compartimos momentos de tristeza y felicidad, pero eso nos caracterizó en ser los mejores, siempre unidos en toda esta increíble etapa.

A mis amigos y hermanos que deje en mi querido Patate, Ambato y Baños que a pesar de la distancia siempre estuvieron pendientes de mis estudios y me dieron ese aliento para seguir luchando por mis objetivos. Erika D, Oscar E, Aníbal G, Deysi J, Thalía A, Jessenia A y varias personas más que me ayudaron a nunca olvidar mis raíces.

A la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional que me abrió las puertas para poderme formar y perseguir cada uno de mis sueños y metas trazadas. Los valores y tradiciones guayperas que me han inculcado siempre los llevaré en mi corazón.

A cada uno de los docentes que me impartieron sus conocimientos, habilidades y valores de un estudiante de la Facultad de Ingeniería Mecánica.

A mi director Ing. Carlos Díaz y codirector Ing. Fausto Oviedo que depositaron la confianza, fueron la guía y el soporte necesario para la realización del presente trabajo de titulación.

A mi compañero y amigo Joao Heredia por el apoyo ilimitado que me brindó para poder realizar este presente trabajo de titulación.

Jefferson Medina

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN	i
DECLARACIÓN	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
INDICE DE FIGURAS	x
INDICE DE TABLAS	xii
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT	xv
INTRODUCCIÓN	1
Objetivo general	3
Objetivos específicos	3
1. MARCO TEÓRICO	4
1.1. Identificación del problema.....	4
1.2. Estudios previos.....	5
1.3. Situación actual en el Ecuador.....	6
1.4. Procesos de fundición de latón	6
1.4.1. Fundición y colado de aleaciones Cu – Zn	11
1.4.2. Solidificación de aleaciones Cu-Zn.....	11
1.5. Cobre y sus aleaciones.....	14
1.5.1. Generalidades del cobre	14
1.5.1.1. Propiedades del cobre	14
1.5.2. Generalidades del cinc.....	15
1.5.2.1. Propiedades del cinc.....	15
1.6. Aleaciones de Latón.....	16
1.6.1. Tipos de latón.....	16
1.6.1.1. Latón Alpha (α)	16
1.6.1.2. Latón Beta (β).....	17
1.6.1.3. Latón Alpha – Beta ($\alpha+\beta$)	17
1.6.1.4. Latones Especiales	18
1.6.2. Diagrama de fase de latón (Cu – Zn).....	18
1.7. Elementos aleantes.....	20
1.7.1. Generalidades del plomo.....	20
1.7.1.1. Propiedades del plomo	20
1.7.1.2. Influencia del plomo en el latón	21

1.7.2.	Elementos alternativos al plomo	21
1.7.3.	Generalidades del silicio	22
1.7.3.1.	Propiedades del silicio	22
1.7.3.2.	Propiedades del ferro-silicio	23
1.7.3.3.	Influencia del silicio en el latón	23
1.8.	Proceso de Maquinado	23
1.8.1.	Formación de viruta en el maquinado.....	25
1.8.2.	Métodos de evaluación de la maquinabilidad	27
1.8.3.	Prueba de rugosidad superficial	27
2.	METODOLOGÍA	29
2.1.	Selección de los elementos de la aleación	29
2.1.1.	Cálculo de cargas.....	30
2.2.	Proceso de fundición de las probetas.....	32
2.2.1.	Dimensionamiento de la caja de moldeo	32
2.2.2.	Modelo	34
2.2.3.	Preparación de la arena de moldeo.....	35
2.2.4.	Cálculo del sistema de alimentación	37
2.2.4.1.	Mazarota	38
2.2.4.2.	Bebedero	38
2.2.4.3.	Taza de colado.....	39
2.2.4.4.	Pozo de colado	40
2.2.4.5.	Canales de colado y ataque	41
2.2.4.6.	Tiempo de llenado	42
2.2.4.7.	Altura efectiva de colado del bebedero	43
2.2.4.8.	Velocidad de vertido	43
2.2.5.	Diseño del sistema de alimentación	43
2.2.6.	Elaboración de las probetas.....	45
2.3.	Ensayos de composición química	46
2.3.1.	Equipos, disposición y herramientas para ensayo de composición química	46
2.3.2.	Procedimiento de ensayo de composición química	47
2.4.	Ensayos mecánicos	48
2.5.	Ensayo de tracción	48
2.5.1.	Equipos, dispositivos y herramientas para ensayo de tracción	48
2.5.2.	Procedimiento del ensayo de tracción	49
2.6.	Ensayo de dureza	50
2.6.1.	Equipos, dispositivos y herramientas para ensayo de dureza	51

2.6.2.	Procedimiento del ensayo de dureza	51
2.7.	Ensayo metalográfico	52
2.7.1.	Equipos, dispositivos y herramientas para ensayo metalográfico	52
2.7.2.	Procedimiento del ensayo metalográfico	54
2.8.	Ensayos de rugosidad superficial	55
2.8.1.	Herramientas de corte	56
2.8.2.	Selección de parámetros de corte	57
2.8.3.	Equipos, dispositivos y herramientas para ensayo de rugosidad superficial ...	57
2.8.3.1.	Equipos empleados	58
2.8.4.	Procedimiento del ensayo de rugosidad superficial	59
2.8.5.	Procedimiento de medición del desgaste del inserto	60
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	61
3.1.	Resultados	61
3.1.1.	Proceso de colado	61
3.1.2.	Inspección visual de las probetas	62
3.1.3.	Composición química	63
3.1.4.	Ensayo de tracción	63
3.1.5.	Ensayo de dureza	65
3.1.6.	Ensayo de metalografía	66
3.1.7.	Ensayo de rugosidad superficial	69
3.1.8.	Desgaste del inserto	70
3.1.9.	Forma de la viruta	70
3.1.10.	Probetas defectuosas	72
3.1.11.	Matriz comparativa	74
3.2.	Discusión	76
3.2.1.	Proceso de colado	76
3.2.2.	Inspección visual de las probetas	76
3.2.3.	Propiedades mecánicas de la aleación Cu-Zn-Si	77
3.2.4.	Propiedades mecánicas de la aleación Cu-Zn-FeSi	78
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	79
4.1.	Conclusiones	79
4.2.	Recomendaciones	80
	Referencias Bibliográficas	81
	ANEXOS	86
	Anexo I: Ensayo de granulometría y LOI de la arena mixta	87
	Anexo II: Dimensionamiento para colado con probeta en posición horizontal	90

Anexo III: Dimensionamiento para colado con probeta en posición vertical.....	100
Anexo IV: Códigos para plaquitas y portaherramientas.....	110
Anexo V: Informe del ensayo de composición química	111
Anexo VI: Resistencia a la tracción y porcentaje de elongación	117
Anexo VII: Informe del ensayo de tracción mecánica	118
Anexo VIII: Dureza del material en escala Rockwell B.....	122
Anexo IX: Microestructuras referenciales de aleaciones Cu-Zn.....	123
Anexo X: Gráficas de la rugosidad media aritmética.....	128
Anexo XI: Zona de desgaste de los insertos	130
Anexo XII: Diagrama ternario de solubilidad parcial Cu-Zn-Si.....	133
Anexo XIII: Variación del volumen ocupado por 1 [kg] de silicio	137
Anexo XIV: Rugosidad para procesos de torneado de acuerdo con la norma ASME B46.1 .	138
Anexo XV: Morfología de la viruta para procesos de torneado de acuerdo con la ISO 3685.	139

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Descripción de los pasos de producción en una operación de fundición en arena.....	7
Figura 1.2 Tipos de modelos que se emplean en la fundición con moldes de arena: a) sólido, b) de deslizamiento, c) de placas ajustadas, d) de capucha y base.....	8
Figura 1.3 Elementos de colado por gravedad.	8
Figura 1.4 Cajas de moldeo.....	11
Figura 1.5 Proceso de fundición.....	11
Figura 1.6 Temperatura como función del tiempo de solidificación de los metales puros. a) Observe que la solidificación ocurre a temperatura constante. b) Densidad, como función del tiempo.....	12
Figura 1.7 Esquema de solidificación de una aleación y distribución de temperatura en el metal que se solidifica.	13
Figura 1.8 Esquema de tres estructuras de metales fundidos solidificados en un molde cuadrado: a) Rango corto, b) rango intermedio y c) rango largo.	13
Figura 1.9 Estructura ordenada y desordenada en 50% Cu- 50% Zn.	17
Figura 1.10 Diagrama de fases Cu – Zn.	19
Figura 1.11 Efecto del contenido de cobre y plomo en el latón de mecanizado libre....	21
Figura 1.12 Tipos de procesos de remoción de material.....	24
Figura 1.13 Proceso de remoción de material.	25
Figura 1.14 Corte ortogonal. a) como un proceso tridimensional y b) tal como se reduce a dos dimensiones en una viruta lateral.....	25
Figura 1.15 Visión más realista de la deformación de viruta.....	26
Figura 1.16 Cuatro tipos de formación de viruta en el corte de metales: a) discontinua, b) continua, c) continua con acumulación en el borde y d) dentada.	27
Figura 1.17 Esquema de características de una superficie según el código ASME B46.1.....	28
Figura 1.18 Factores que afectan la rugosidad superficial.....	28
Figura 2.1 a). Dimensiones de la caja de moldeo. b). Caja de moldeo terminada.....	34
Figura 2.2 Distribución del modelo. Dimensiones en [mm].	34
Figura 2.3 Modelo deslizante.....	35
Figura 2.4 Pieza o moldura.....	37
Figura 2.5 Moldes con sistema de alimentación para colado con probetas en posición vertical y horizontal.	38
Figura 2.6 Forma ideal del bebedero.....	39
Figura 2.7 Dimensionamiento de la taza de colado.....	40
Figura 2.8 Dimensionamiento del pozo de colado.....	40
Figura 2.9 Relación de coladas en los canales de alimentación.	41
Figura 2.10. Esquema altura efectiva según la forma de llenado del molde.....	43
Figura 2.11. Diseño sistema de alimentación colado con probetas en posición horizontal.	44
Figura 2.12. Diseño sistema de alimentación colado con probetas en posición vertical.	44
Figura 2.13. a) Probetas con sistema de alimentación, b) Probetas sin sistema de alimentación.....	45
Figura 2.14. Rectificado de las probetas en torno manual.	45

Figura 2.15. Acabado superficial a) Pieza sin mecanizar b) Pieza mecanizada c) Probetas para metalografía.....	46
Figura 2.16 Ensayo de dureza.	50
Figura 2.17 Representación del valor Ra.....	55
Figura 2.18 Inserto DNMG 15 06 08.....	56
Figura 2.19 Disposición de los ángulos de corte del inserto con respecto al portaherramientas.	56
Figura 2.20 Zonas de desgaste de herramientas de corte.	60
Figura 3.1 Temperatura a) Colada en el interior del horno. b) Colada en el crisol. c) Colado con probetas en posición horizontal. b) Colado con probetas en posición vertical.....	61
Figura 3.2 Probetas de colado con probetas en posición horizontal.....	62
Figura 3.3 Probetas de colado con probetas en posición horizontal.....	62
Figura 3.4. a) Resistencia a la tracción, b) Porcentaje de elongación.	64
Figura 3.5. a) Diagrama esfuerzo-deformación probetas con adición de silicio, b) Diagrama esfuerzo-deformación probetas con adición de ferro silicio.	65
Figura 3.6. Dureza de las probetas con mejores resultados.	65
Figura 3.7. Dureza vs resistencia a la tracción a) adición de silicio, b) adición de ferro-silicio.	66
Figura 3.8 Cambio del porcentaje de elongación con respecto a la fase α	69
Figura 3.9 Rugosidad media aritmética equivalente.	69
Figura 3.10 Zona de desgaste de los insertos en el ensayo de rugosidad superficial. .	70
Figura 3.11 Morfología de las virutas de referencia C38500 y aleaciones Cu-Zn-Si.....	71
Figura 3.12 Morfología de las virutas de referencia C38500 y aleaciones Cu-Zn-FeSi.	72
Figura 3.13 Macrografía vista superior de la probeta con 0.5% de silicio.	73
Figura 3.14 Macrografía vista lateral de la probeta con 0.5% de silicio.....	73
Figura 3.15 Macrografía vista superior de la probeta con 0.5% de ferro-silicio.....	73
Figura 3.16 Macrografía vista lateral de la probeta con 0.5% de ferro-silicio.	74
Figura 3.17 Macrografía vista superior de la probeta con 1.5% de ferro-silicio.....	74
Figura 3.18 Macrografía vista lateral de la probeta con 1.5% de ferro-silicio.	74

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Resumen de los procesos de fundición.....	10
Tabla 1.2 Propiedades mecánicas del cobre.....	14
Tabla 1.3 Propiedades mecánicas del cinc.....	15
Tabla 1.4 Tipos de latones especiales.....	18
Tabla 1.5 Propiedades mecánicas del plomo.....	20
Tabla 1.6 Propiedades mecánicas del silicio.....	22
Tabla 1.7 Características físicas del ferro silicio.....	23
Tabla 2.1 Aleación Cu-Zn C38500.....	29
Tabla 2.2 Composición química en porcentajes de la aleación Cu - Zn más silicio.....	29
Tabla 2.3 Composición química en porcentajes de la aleación Cu – Zn más ferro-silicio.....	29
Tabla 2.4 Porcentaje de quemado de componentes de aleaciones de cobre.....	30
Tabla 2.5 Material requerido para 100 kg de Cu – Zn más silicio y ferro-silicio.....	30
Tabla 2.6 Valores correspondiente a una colada.....	31
Tabla 2.7 Material requerido para 16 kg de Cu – Zn más silicio y ferro-silicio.....	31
Tabla 2.8 Material total requerido.....	32
Tabla 2.9 Distancia admisible entre elementos.....	33
Tabla 2.10 Dimensionamiento de la caja de moldeo.....	33
Tabla 2.11 Porcentaje de resina y catalizador para arena nueva colado con probetas en posición horizontal.....	36
Tabla 2.12 Porcentaje de resina y catalizador para arena mixta colado de probetas en posición vertical.....	36
Tabla 2.13 Especificación de la pieza o moldura a fabricar.....	37
Tabla 2.14 Dimensiones de la mazarota colado con probetas en posición horizontal y vertical.....	38
Tabla 2.15 Dimensiones del bebedero colado con probetas en posición horizontal y vertical.....	39
Tabla 2.16 Dimensiones de la taza de colado con probetas en posición horizontal y vertical.....	40
Tabla 2.17 Dimensiones del pozo de colado con probetas en posición horizontal y vertical.....	41
Tabla 2.18 Relación de coladas más comunes.....	41
Tabla 2.19 Dimensiones del alimentador colado con probetas en posición horizontal.....	42
Tabla 2.20 Dimensiones del alimentador colado con probetas en posición vertical.....	42
Tabla 2.21 Tiempo de llenado.....	42
Tabla 2.22. Altura efectiva de colado del bebedero.....	43
Tabla 2.23. Velocidad de vertido.....	43
Tabla 2.24 Probeta de ensayo de composición química.....	47
Tabla 2.25 Características del espectrómetro de chispa.....	47
Tabla 2.26 Descripción de la probeta de tracción.....	48
Tabla 2.27 Características de la máquina universal para ensayo de tracción.....	49
Tabla 2.28 Características del durómetro.....	51
Tabla 2.29 Características de la máquina desbastadora de disco.....	53
Tabla 2.30 Características de la máquina para preparación y pulido de muestras METKON.....	53
Tabla 2.31 Características del microscopio metalográfico.....	53

Tabla 2.32 Ángulo del inserto DNMG 150608 PM 4425.....	56
Tabla 2.33 Parámetros de corte.....	57
Tabla 2.34 Parámetros de corte seleccionados.....	57
Tabla 2.35 Características técnicas del torno CNC GT40a.....	58
Tabla 2.36 Características técnicas del rugosímetro.	58
Tabla 2.37 Características técnicas del microscopio óptico.....	59
Tabla 3.1 Composición química experimental vs teórico con adición de silicio.	63
Tabla 3.2. Composición química experimental vs teórico con adición de ferro-silicio...63	63
Tabla 3.3 Microestructura de las probetas con adición de silicio.	66
Tabla 3.4. Microestructura de las probetas con adición de ferro silicio.	68
Tabla 3.5 Matriz comparativa.....	75

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo estudiar la microestructura y maquinabilidad de la aleación cobre – cinc (Cu – Zn) al adicionar silicio y ferro-silicio en su composición, considerando que en la actualidad el contenido de plomo en productos de grifería representa un riesgo para la salud y el medio ambiente, la búsqueda de elementos alternativos como el Si y FeSi permiten obtener características similares a la aleación C38500. Los porcentajes de adición de silicio y ferro-silicio fueron: 0.5, 1, 1.5 y 2% en peso. La evaluación de las propiedades mecánicas, microestructurales y de maquinabilidad se realizaron a través de ensayos de: composición química, tracción, dureza, metalografía, acabado superficial, forma de la viruta y desgaste de la herramienta de corte. El colado de las probetas se desarrolló con una disposición vertical y horizontal, a fin de establecer cual presenta la menor cantidad de defectos en la fundición. En base a los análisis cualitativos y cuantitativos de los ensayos antes mencionados se determinó que la aleación con el 1% de ferro-silicio con una configuración de colado con probeta en posición vertical es la elección más factible como sustituto del plomo, debido a que brinda propiedades mecánicas similares, sin embargo, su maquinabilidad es inferior en comparación al material de referencia.

Palabras clave: Caracterización, plomo, silicio, ferro-silicio, C38500, disposición de colado.

ABSTRACT

The following research work aims to study the microstructure and machinability of the copper-zinc alloy (Cu - Zn), by adding silicon and ferrosilicon in its composition. In consideration that currently the lead content in faucet products represents a risk to health and the environment, the search for alternative elements such as Si and FeSi allows obtaining similar characteristics to the C38500 alloy. The percentages of silicon's addition and ferrosilicon were: 0.5, 1, 1.5, and 2% by weight. The evaluation of the mechanical, microstructural, and machinability properties was carried out through tests of chemical composition, traction, hardness, metallography, surface finish, chip shape, and wear of the cutting tool. The casting of the specimens was developed with a vertical and horizontal arrangement, in order to establish which one presents the least amount of defects. Based on the qualitative and quantitative analyzes of the aforementioned tests, it was determined that the alloy with 1% ferrosilicon with a casting configuration with a test tube in a vertical position is the most feasible choice as a substitute for lead since it provides similar mechanical properties, however, its machinability is lower compared to C38500 material.

Keywords: Characterization, lead, silicon, ferrosilicon, C38500, casting arrangement.

ESTUDIO DE LA MICROESTRUCTURA Y DE LA MAQUINABILIDAD DE UNA ALEACIÓN COBRE – CINC (CU - ZN) AL ADICIONAR SILICIO Y FERRO SILICIO EN SU COMPOSICIÓN

INTRODUCCIÓN

Durante la última década, el desarrollo de aleaciones de latón sin plomo ha tenido gran relevancia, debido a las nuevas regulaciones y estándares establecidos por parte de la Organización Mundial de la Salud y de organizaciones medio ambientales con la finalidad de restringir la contaminación producida al utilizar plomo, especialmente en la fundición de accesorios de grifería y tuberías de agua.

A pesar que el porcentaje de plomo admisible en estas aleaciones destinadas para las aplicaciones antes mencionadas es mínimo, estudios previos han demostrado que este elemento es prácticamente insoluble en cobre, por ello tiende a localizarse de manera dispersa en el material haciendo que la maquinabilidad mejore considerablemente, sin embargo, esta característica hace que sea más propenso al desprendimiento de partículas de plomo por corrosión, más específicamente por descincificación.

Investigaciones realizadas han revelado casos de incremento de plomo en la sangre en una gran cantidad de niños, debido al desprendimiento del material por corrosión [1], [2]. Es preocupante la asignación del 3% de plomo en las aleaciones de cobre-cinc, existentes en los productos de grifería a nivel ecuatoriano (según la NTE INEN 3123), accesorios que se encuentra en contacto directo con el agua potable, transforman a este fluido en una sustancia tóxica para el ser humano y el medioambiente [3].

Una alternativa económicamente viable es la sustitución del plomo por silicio, elemento que mejora las propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión. El hierro y manganeso son las adiciones más comunes que se combinan para obtener una mayor dureza, resistencia a la tracción, con una ductilidad ligeramente reducida.

El presente estudio se enfoca en el análisis del cambio microestructural que se produce al utilizar silicio y ferro-silicio como sustituto del plomo, mediante el método de caracterización, el cual permite identificar la influencia del silicio y el hierro en la aleación Cu – Zn – Si.

El objetivo de comparar el silicio y ferro-silicio se debe a que el ferro-silicio es un componente que tiene una alta disponibilidad en el mercado ecuatoriano, en vista de que presenta múltiples aplicaciones en la industria.

Para realizar el análisis comparativo de las propiedades mecánicas al adicionar distintas proporciones de silicio y ferro-silicio en la aleación de latón dúplex, se procederá a determinar los porcentajes idóneos de los elementos para obtener los mejores resultados en el estudio, los valores seleccionados son: 0.5, 1, 1.5 y 2 por ciento en peso, dicha información se encuentra respaldada en el estudio realizado por A. V. Krishna [4].

Con los elementos mencionados anteriormente y los porcentajes establecidos de cada uno de ellos, se procederá a fabricar probetas normalizadas, las cuales permitirán realizar diversos tipos de ensayos tales como: ensayo de composición química, tracción, dureza, metalografía, acabado superficial, forma de la viruta y desgaste del inserto. Los resultados obtenidos permitirán realizar un análisis de caracterización de los materiales ensayados.

A partir de la información recopilada en los ensayos de cada una de las probetas con diferentes porcentajes de silicio y ferro-silicio, se determinará si del estudio realizado se puede obtener un sustituto para el material de referencia C38500.

Mediante este estudio se aspira incentivar a la industria metalúrgica ecuatoriana a producir este tipo de aleaciones libres de plomo utilizando recursos disponibles en el mercado nacional con la finalidad de disminuir el riesgo de intoxicación por plomo, puesto que en la actualidad se utiliza la aleación de latón C38500 (60% Cu, 3%Pb, 37%Zn) en la manufactura de componentes y accesorios de ingeniería.

Objetivo general

Estudiar la microestructura y maquinabilidad de la aleación cobre – cinc (Cu – Zn) al adicionar silicio y ferro-silicio en su composición.

Objetivos específicos

- Caracterizar la aleación Cobre – Cinc con los diferentes porcentajes de silicio.
- Caracterizar la aleación Cobre – Cinc con los diferentes porcentajes de ferro-silicio.
- Determinar la maquinabilidad de la aleación cobre – cinc con las diferentes concentraciones de silicio y ferro-silicio.
- Determinar las propiedades mecánicas y microestructurales de la aleación cobre – cinc con las diferentes concentraciones de silicio y ferro-silicio.
- Realizar una matriz comparativa que permita analizar las características con la concentración de silicio, ferro-silicio y latón comercial con contenido de plomo.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Identificación del problema

La restricción del 3% de plomo en productos de latón para sistemas de plomería sigue siendo muy alta a causa de que este elemento es insoluble en cobre, dado que, no se consigue una mezcla homogénea, quedando las partículas dispersas en el material, esto provoca una exposición directa del plomo con el agua producto de la corrosión de los diferentes accesorios, ocasionando problemas en la salud humana por envenenamiento.

Estudios recientes demuestran que las partículas de plomo existentes en el agua potable como resultado de la corrosión han provocado un aumento de intoxicaciones sobre todo en niños, puesto que mientras menos edad tenga, el intestino absorbe más plomo, 5 a 10 veces más que los adultos. Los efectos por envenenamiento a causa de este elemento afectan sistemas, órganos y tejidos.

El principal motivo por lo que en la actualidad se sigue utilizando plomo en las aleaciones de Cu-Zn, se debe a su característica de dispersarse en forma de partículas a lo largo del material y su maleabilidad, obteniendo una buena maquinabilidad, esto se ve reflejado económicamente al reducir los costos de producción. Durante la operación de torneado, se producen virutas delgadas y de longitud corta, lo que conlleva a una reducción de fuerzas sobre la herramienta de corte, aumentando el período de trabajo, la sustitución de la herramienta y el desalojo de la viruta [4].

Por ello, es de suma importancia encontrar un elemento sustituto al plomo que cumpla con todas las características que aporta en las aleaciones de Cu-Zn evitando así los efectos en la salud del ser humano, se espera que este elemento alternativo sea económicamente sostenible para su producción.

El aumento de medidas en contra de la contaminación ha sido un factor que ha impulsado a buscar materiales que puedan ser reciclados con la finalidad de ser reutilizados, este no es el caso de las aleaciones que contienen plomo, ya que este elemento contamina todos los demás componentes de la aleación siendo imposible su reutilización.

Las alternativas de elementos no tóxicos como remplazo del plomo que se han planteado en investigaciones previas: El bismuto de 0.2% al 2%, este elemento cuenta con características similares en las aleaciones de Cu – Zn, ya que también es insoluble en cobre y sus partículas se sitúan de manera aleatoria en todo el material, logrando una mejora en la maquinabilidad, pero el punto de fusión de la aleación aumenta, la fluidez disminuye y es un material muy costoso, por lo que no es económicamente viable.

Otra alternativa es la utilización de silicio de 0.25% - 5.5 % como elemento sustituto. Este elemento mejora la fluidez y la estanqueidad a la presión, pero aumenta los costos de producción, debido al desgaste que provoca en la herramienta al ser mecanizado. Esta alternativa es la más factible dado que el silicio es un elemento no tóxico y el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre después del oxígeno [5].

1.2. Estudios previos

El plomo es un metal que se encuentra de manera natural en la tierra. Diversas investigaciones han demostrado que este elemento es nocivo para el ser humano y el medio ambiente. La forma de exposición de plomo se produce por ingesta de agua contaminada, inhalación de partículas, principalmente durante la producción o el desprendimiento de material de algún producto que contenga este elemento.

Las regulaciones y estándares establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS), organizaciones medio ambientales y normas técnicas (NTE INEN 3123), determinan que la adición máxima de plomo que puede contener una aleación de Cu-Zn-Pb es del 3% y los niveles recomendados de partículas de plomo es de 5 microgramos por litro de agua potable [1], [6].

A pesar de que el porcentaje de plomo en sistemas de plomería ha disminuido considerablemente, la sociedad no se encuentre exenta a la intoxicación, debido a que el agua corroe los elementos utilizados en fontanería, lo que provoca un desprendimiento de material hacia el sistema de agua potable. Los factores que provocan que el agua sea corrosiva son: el bajo contenido de sólidos disueltos, las cantidades elevadas de oxígeno o dióxido de carbono, altas temperaturas, la acidez, el Ph y la alcalinidad baja. Existen tratamientos para ablandar o suavizar el agua a través del intercambio de iones, lamentablemente estos procedimientos no eliminan en su totalidad la corrosividad del agua [3], [7].

Por ello, se buscan alternativas para sustituir el plomo por elementos que no sean nocivos con la finalidad de disminuir el riesgo de intoxicación y disminuir la contaminación producida en el reciclaje, cuando los componentes de las aleaciones que contienen este elemento se unen a otros componentes metálicos [4].

1.3. Situación actual en el Ecuador

En el Ecuador se han adoptado los estándares internacionales establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS), en lo referente a la disminución del contenido de plomo en los sistemas de plomería. Decretando en la Norma Técnica Ecuatoriana (NTE INEN 3123) que para aleaciones con un contenido mínimo de cobre del 57%, el porcentaje máximo de plomo es del 3% para la fabricación de los componentes de llaves que estén en contacto con el flujo de agua [1].

Todo el material que se utiliza actualmente para la fabricación de componentes de plomería en el país contiene este porcentaje de plomo, esto se debe a que este material resulta económicamente viable por su facilidad de maquinabilidad. La aleación que más se utiliza es la C38500 cuya composición química es: (55 - 59 %) Cu, (42 – 38%) Zn, (2.5 – 3%) Pb, (0.35%) Fe [8].

A pesar de que, en la actualidad ya existen materiales que no contienen plomo en su composición química, aún no resulta rentable, debido a que su maquinabilidad es baja teniendo como consecuencia un aumento en los costos de producción al desgastar la herramienta de manera excesiva.

Es así como existen estudios que se enfocan en los parámetros de maquinado y acabado superficial para disminuir los costos de producción con la finalidad de que las empresas productoras de componentes de sistemas de plomería se decanten por este tipo de materiales, que garantizan productos no nocivos para el ser humano y amigables con el medio ambiente.

1.4. Procesos de fundición de latón

La fundición es uno de los procesos de conformado más antiguos utilizados para la fabricación de productos de origen metálico, se remonta hace aproximadamente seis mil años. El principio básico de fundición consiste en una serie de operaciones por medio de las cuales se obtiene un molde que reproduce la forma de la pieza a fabricar, en el que se vierte metal líquido y se deja solidificar antes de extraer el elemento fundido.

Dentro de los procesos de fundición, el más utilizado es el molde de arena descrito en la Figura 1.1. La mayor parte de los procesos de fundición siguen estos pasos, únicamente se modifica el tipo de molde que se va a utilizar y los parámetros a tener en cuenta debido a este cambio.

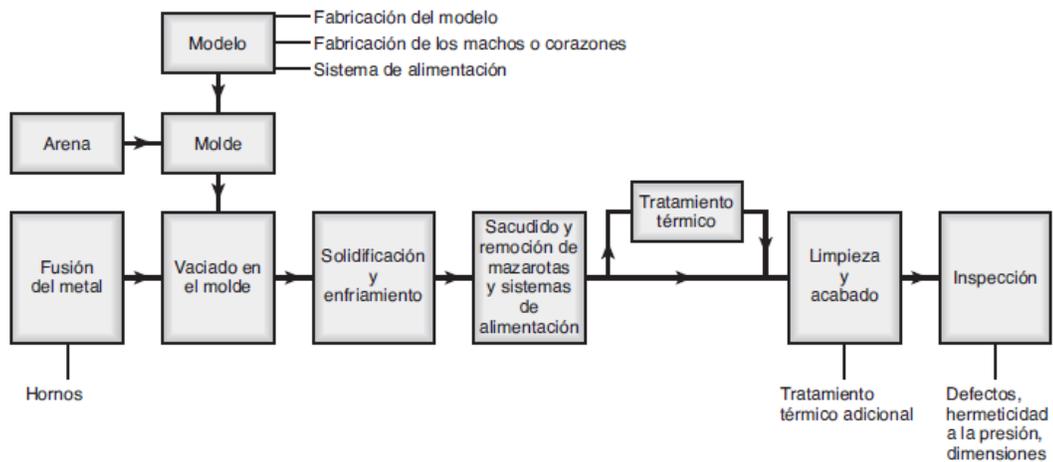


Figura 1.1 Descripción de los pasos de producción en una operación de fundición en arena (Fuente: [9])

A continuación, se detallan algunos de los parámetros a tomar en consideración en los procesos de fundición de metales.

Modelo

Los modelos son réplicas de tamaño real de la pieza que se desea reproducir tomando en consideración un sobredimensionamiento, debido a la contracción que se produce durante la solidificación y enfriamiento, además de la sobremedida por maquinado; estos pueden estar hechos de madera, plástico o metal. La selección del material para el modelo dependerá de diversos factores como: tamaño, forma, precisión dimensional, número de unidades requeridas y proceso de moldeo.

En la Figura 1.2 se representan gráficamente cada uno de los modelos presentados a continuación:

- **Modelos sólidos:** se emplean para producir formas simples, suelen estar fabricados en madera, su productividad es baja y son económicos.
- **Modelos deslizantes:** constan de dos piezas facilitando su extracción y ubicación dentro de las cajas de moldeo.
- **Modelos de placas ajustadas:** la pieza se divide por la mitad y se colocan en cada lado de una placa formando una sola unidad.
- **Modelos de capucha y base:** es similar al modelo de placas ajustadas pero cada una de las mitades se coloca en placas diferentes, de tal modo que cada parte se fabrica independientemente.

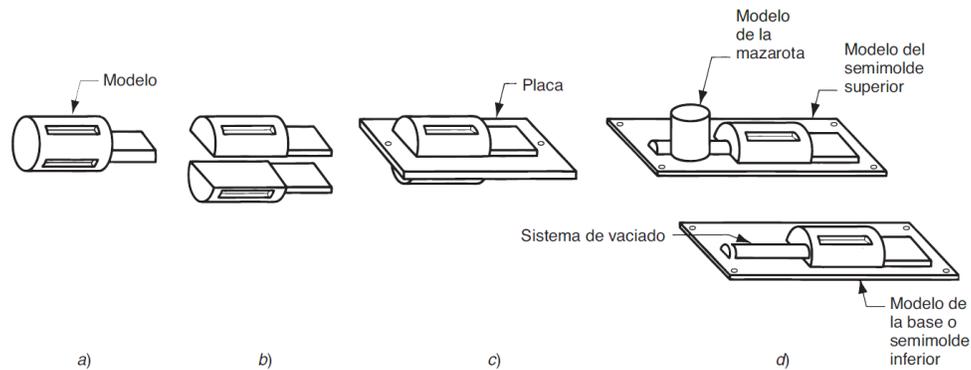


Figura 1.2 Tipos de modelos que se emplean en la fundición con moldes de arena: a) sólido, b) de deslizamiento, c) de placas ajustadas, d) de capucha y base.
(Fuente: [10])

El diseño del modelo es una parte fundamental para garantizar un proceso de fundición exitoso, puesto que se debe considerar diversos aspectos como: la contracción del metal, el flujo adecuado de metal dentro de la cavidad del molde, la facilidad de extracción mediante la aplicación de ligeras inclinaciones o ángulos de salida en las superficies paralelas a la dirección de extracción y maquinado.

Sistema de alimentación

Se denomina sistema de alimentación al conjunto de canales que dirigen el metal líquido hacia las cavidades internas del molde. El proceso de fundición por gravedad está constituido por los siguientes elementos mostrados en la Figura 1.3.

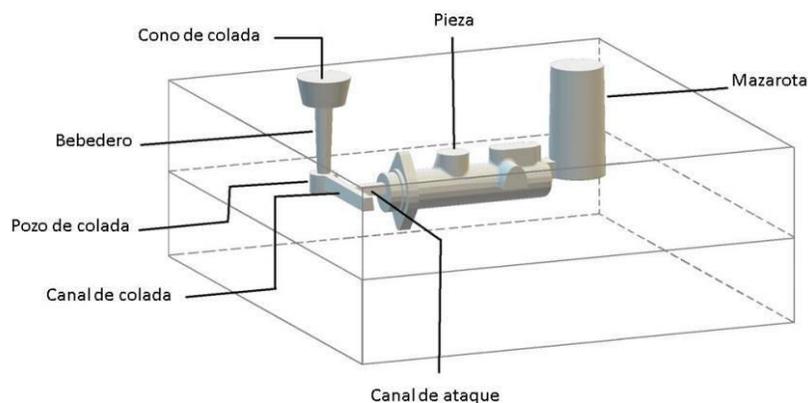


Figura 1.3 Elementos de colado por gravedad.
(Fuente:[11])

- **Cono de colada:** es la cavidad por donde ingresa el metal líquido hacia el interior del molde y también es el encargado de retener parte de la escoria localizada en la colada.

- **Bebedero:** su función es canalizar el metal fundido hacia las cavidades internas del molde. Su forma suele ser cónica con la finalidad de conseguir un flujo laminar y evitar el ingreso de aire.
- **Pozo de colado:** ayuda a minimizar las turbulencias y evita la introducción de aire.
- **Canal de colada:** conducto que une el pozo de colado y el canal de ataque, es el encargado de retener la escoria y distribuir el metal líquido hacia el canal de ataque.
- **Canal de ataque:** también llamado compuerta, es el encargado de dirigir el metal fundido hacia la cavidad de la pieza a ser fundida.
- **Mazarota:** elemento que ayuda abastecer de metal líquido las cavidades del molde durante el proceso de solidificación y enfriamiento con la finalidad de disminuir los defectos que se producen en esta etapa.

Molde

El molde está constituido por una cavidad cuya configuración geométrica determina la forma del elemento fundido. Este receptáculo debe contar con un sobredimensionamiento respecto a las medidas reales del elemento, debido a la contracción del metal durante la solidificación y enfriamiento [10].

De acuerdo con los tipos de molde que se emplean en los procesos de fundición se establecen diferentes clasificaciones, una de ellas es: fundición con molde desechable, permanente y compósito.

- **Fundición con molde desechable:** este tipo de molde está constituido por arena, yeso o materiales similares y aglutinante para que mantenga la forma. Es un molde de una sola vida útil, debido a que una vez que se solidifica se debe deshacer para extraer la pieza fundida.
- **Fundición con molde permanente:** se fabrica con metales resistentes a elevadas temperaturas. Se pueden utilizar en repetidas ocasiones.
- **Fundición con molde compósitos:** se producen con dos o más materiales como arena, metales y grafito, con la finalidad de combinar las ventajas de cada uno de ellos.

En la Tabla 1.1, se resume las ventajas y desventajas de diferentes tipos de procesos de fundición, incluyendo los procesos anteriormente mencionados.

Tabla 1.1 Resumen de los procesos de fundición.

Proceso	Ventajas	Desventajas
En arena	Todos los metales; sin límite de tamaño, forma o peso de la parte; bajo costo.	Acabado superficial áspero; tolerancias amplias.
Molde en cáscara	Buena precisión superficial y acabado; alta capacidad de producción.	Tamaño limitado de la pieza; modelos y equipos costosos.
Modelo evaporativo	Todos los metales; sin límite de tamaño; formas complejas.	Los modelos tienen baja resistencia y pueden ser costosos para pequeñas cantidades.
Molde de yeso	Buena tolerancia dimensional y acabado superficial; baja porosidad.	Limitado a materiales no ferrosos; límite de tamaño de la parte y al volumen de producción; tiempo relativamente largo para fabricar el molde.
Molde cerámico	Partes con tolerancias cerradas; buen acabado superficial.	Tamaño limitado de la parte.
Por revestimiento	Todos los metales; excelente acabado superficial y precisión.	Partes de tamaño limitado; modelos, moldes y mano de obra costosos.
Molde permanente	Buen acabado superficial y tolerancias dimensionales; baja porosidad; alta capacidad de producción.	Alto costo del molde; partes de tamaño y complejidad limitados; no es adecuado para metales con alto punto de fusión.
A presión en matriz	Excelente precisión dimensional y acabado superficial; alta capacidad de producción.	Alto costo de la matriz; partes de tamaño limitado; limitado a metales no ferrosos.
Centrífuga	Grandes partes cilíndricas y tubulares con buena calidad; alta capacidad de producción.	Equipo costoso; partes de forma limitada.

(Fuente: [9])

Cajas de moldeo

Las cajas de moldeo cumplen la función de contener la arena utilizada para la realización del molde. Estas estructuras deben ser sólidas y soportar la compactación de la arena, por lo general este tipo de cajas constan de dos niveles, es decir, están diseñadas para contener el modelo en su parte interna. Los materiales con los que se suelen fabricar es acero moldeado, fundición, aluminio o madera. Las paredes internas deben tener cierto grado de rugosidad para que la arena no se resbale. En la Figura 1.4 se muestra la representación de las cajas de moldeo con sus respectivos acoples de seguridad.

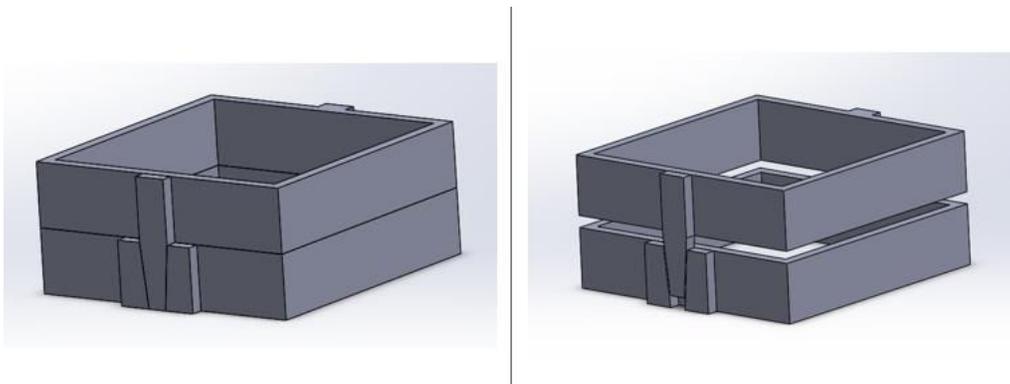


Figura 1.4 Cajas de moldeo.
(Fuente: Propia)

1.4.1. Fundición y colado de aleaciones Cu – Zn

Según la empresa MSO (SERVICIOS MECÁNICOS Y METALÚRGICOS) para llevar a cabo la fundición de la aleación Cu – Zn, se debe tener en cuenta los diferentes puntos de fusión de cada uno de los elementos. Teniendo especial cuidado al adicionar el cinc debido a que puede inflamarse al entrar en contacto con el cobre fundido. El proceso de fundición de la aleación Cu – Zn se detalla en la Figura 1.5.

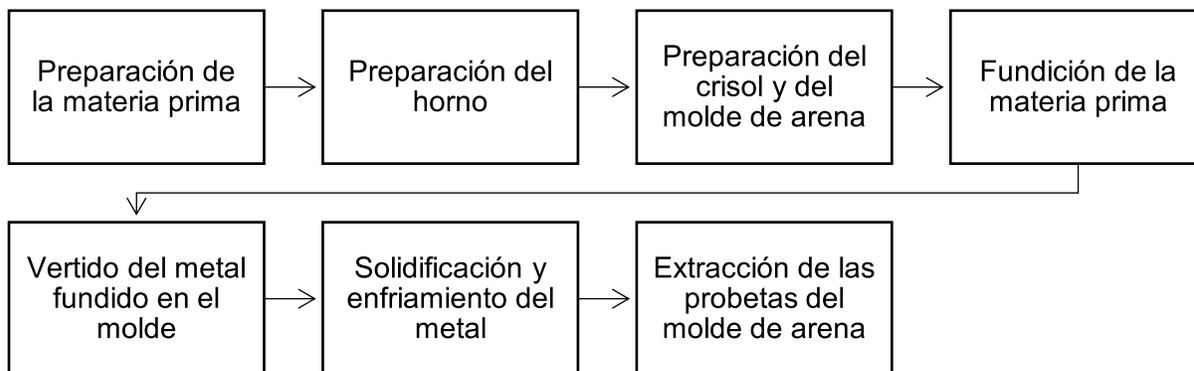


Figura 1.5 Proceso de fundición.
(Fuente: Propia)

1.4.2. Solidificación de aleaciones Cu-Zn

Una de las etapas del proceso de fundición es la solidificación y enfriamiento a temperatura ambiente del metal fundido una vez que es introducido en un molde. Durante los procesos mencionados anteriormente ocurren una serie de eventos que influyen en el tamaño, forma, uniformidad y composición química de los granos formados durante la fundición de la pieza, lo que a su vez influyen en sus propiedades generales.

Los factores que afectan estos eventos son:

- Tipo de metal.

- Propiedades térmicas del metal y del molde.
- Relación geométrica entre el volumen y el área superficial de contacto con el molde.
- Forma del molde.

Metales puros

El punto de fusión o de solidificación de un metal puro se encuentra claramente definido. La solidificación se produce a una temperatura constante con la finalidad de disipar su calor latente de fusión, como se detalla en la Figura 1.6.

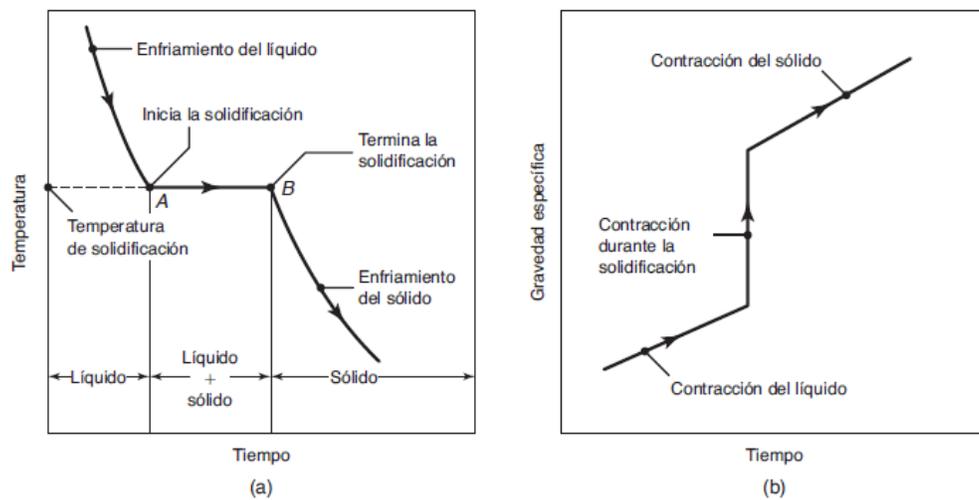


Figura 1.6 Temperatura como función del tiempo de solidificación de los metales puros.
 a) Observe que la solidificación ocurre a temperatura constante. b) Densidad, como función del tiempo.
 (Fuente: [9])

Aleaciones

Como se observa en la Figura 1.7, la solidificación en las aleaciones ocurre de manera diferente en comparación a los metales puros, puesto que comienza cuando la temperatura cae por debajo de la temperatura de liquidus T_L y finaliza cuando alcanza la temperatura de solidus, T_S .

En este intervalo de temperatura, la aleación permanece en un estado pastoso dando origen a las dendritas columnares. Se recomienda realizar un análisis de las estructuras dendríticas, debido a que su aparición está relacionada con factores dañinos como:

- Variaciones en la composición.
- Segregación.
- Microporosidad.

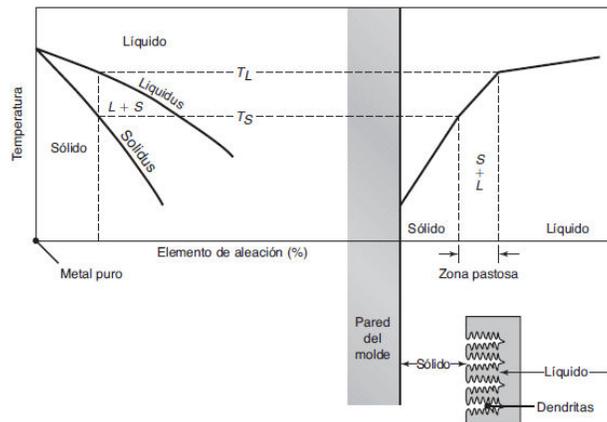


Figura 1.7 Esquema de solidificación de una aleación y distribución de temperatura en el metal que se solidifica.
(Fuente: [9])

En las aleaciones el rango de solidificación o congelamiento es un factor importante y varía dependiendo del valor que se obtiene de la ecuación 1.

$$\text{Rango de solidificación} = T_L - T_S \quad [1]$$

- Aleaciones de periodo corto: intervalo de solidificación menor a 50 [°C].
- Aleaciones de periodo intermedio: intervalo de solidificación de 50 [°C] a 110 [°C].
- Aleaciones de periodo largo: intervalo de solidificación superior a 110 [°C].

En la Figura 1.8 se detalla el esquema de tres metales solidificados y enfriados en un molde cuadrado con diferentes rangos de solidificación en el que se puede observar los diferentes frentes o zonas de solidificación.

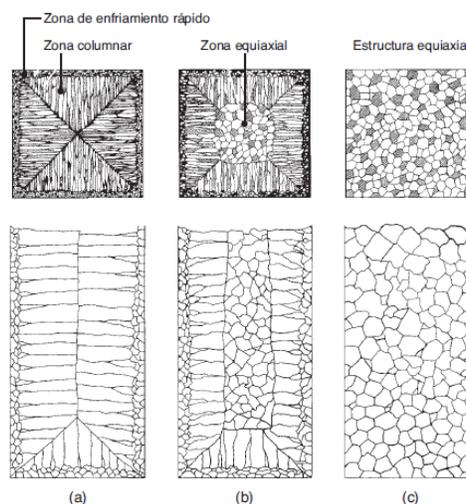


Figura 1.8 Esquema de tres estructuras de metales fundidos solidificados en un molde cuadrado:
a) Rango corto, b) rango intermedio y c) rango largo.
(Fuente: [9])

1.5. Cobre y sus aleaciones

1.5.1. Generalidades del cobre

El cobre es un metal utilizado en la industria por su excelente conductividad térmica, resistencia a la corrosión, facilidad de fabricación y brinda una buena resistencia a la fatiga. El cobre de alta pureza es un metal muy blando. Generalmente no son magnéticos y se pueden soldar fácilmente [12].

Sus características son excelentes para trabajos en frío y caliente. Bueno para fabricación por acuñación, dibujo y alteración, forjado en caliente, prensado, hilado y estampado, con lo que se puede tener barras colectoras, alambres eléctricos, ánodos para tubos de vacío, componentes de transistores, cables y tubos coaxiales, tubos microondas, rectificadores, entre otros [13].

1.5.1.1. Propiedades del cobre

El cobre es suave en su forma cristalina, teóricamente la pureza bordea el 99,99%, tiene una estructura cúbica centrada en las caras (FCC). Sus planos de deslizamientos pertenecen a la familia de planos {111} en las direcciones <110>, la cual es una dirección compacta en este tipo de empaquetamiento. Su densidad es $8,96 \text{ gr/cm}^3$ y su punto de fusión es de $1085 \text{ }^\circ\text{C}$. Más propiedades de este material se muestran en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2 Propiedades mecánicas del cobre.

Propiedades Mecánicas						
	Resistencia a la tracción		Límite elástico		Elongación en 50 [mm] (2 in)	Clasificación de maquinabilidad
C10100 (99,99 Cu)	Mpa	Ksi	Mpa	ksi	%	%
	221 - 445	32 - 66	69 - 365	10 - 53	55 - 4	20

(Fuente: [13])

El cobre y sus aleaciones generalmente se pueden conformar en la forma y dimensiones requeridas por los procesos de fabricación más comunes. Además, estas aleaciones se pueden ensamblar fácilmente mediante los diversos procesos mecánicos o de unión comúnmente utilizados como: el estacado, remachado, atornillado y soldadura. Para

trabajos en frío, la resistencia de tracción en temple es de aproximadamente el doble de la resistencia a la tracción en recocido, mientras que su límite elástico es de cinco a seis veces mayor. En aleaciones que permanecen dúctiles por encima de la temperatura de recristalización el trabajo en caliente permite cambios de forma más extensos que los trabajos en frío, por lo consiguiente se puede reemplazar las operaciones de conformado y recocido con una sola operación. Mediante el trabajo en caliente se puede reducir el tamaño de grano aproximadamente 0.1 [mm] (0.004 [in]) [13].

1.5.2. Generalidades del cinc

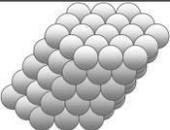
El cinc es un elemento metálico quebradizo de tonalidad blanco azulado utilizado en muchas aplicaciones industriales. En la naturaleza se encuentra en minerales concentrados como la blenda o esfalerita (ZnS) y la cintita (ZnO) que son las más empleadas. La esfalerita es un mineral compuesto que se cristaliza en un sistema cúbico, tiene un lustre resinoso y se presenta en masas compactas y cristalinas con lo que su extracción es muy factible [14].

Este metal se emplea en recubrimientos para el hierro y acero, en piezas fundidas, láminas enrolladas, alambres trefilados, forjados y extrusiones, además, de ser un componente principal del latón. La cintita (ZnO) se utiliza como pigmento de pintura, en el relleno de llantas de goma y en medicina como pomada antiséptica. Mientras que la blenda (ZnS) es eficaz en aplicaciones de electroluminiscencia, fotoconductividad, semiconductividad y otros usos electrónicos [15].

1.5.2.1. Propiedades del cinc

El cinc es extremadamente frágil a temperatura ambiente, pero se vuelve maleable entre los 120 y 150 [°C], debido a que tiene una estructura cristalina hexagonal compacta (HCP). Su densidad es 7,14 [gr/cm^3] y su punto de fusión es de 420 [°C]. Las propiedades mecánicas del cinc se pueden observar en la Tabla 1.3 [16].

Tabla 1.3 Propiedades mecánicas del cinc.

Propiedades Mecánicas				
	Resistencia a la tracción	Módulo elástico a la tracción E	Ductilidad	Dureza

Esfalerita (99,99 Zn)	Mpa	ksi	Mpa	ksi	%	Brinell (HB)
	120	17,4	100.10 ³	14,51 ³	60	72

(Fuente: [16])

Los límites de impurezas son muy importantes cuando el cinc se utiliza en una aleación. Exceder los límites de impurezas puede dar como resultado malas propiedades mecánicas y de corrosión. Las diferentes aleaciones de cinc se producen mediante: fundición por rotación, de inversión, por presión (alta y baja), en arena, molde permanente (de hierro, grafito o yeso), colada continua, semicontinua y centrífuga. Las aleaciones de cinc se utilizan para productos forjados como: laminados planos, doblados, hilado, acuñado, trefilados y extruidos [13].

1.6. Aleaciones de Latón

El latón es una aleación de Cu – Zn, dichos elementos son los principales, se pueden realizar diversas combinaciones de acuerdo con sus porcentajes y adicionando elementos externos. Mantiene las características del cobre, pero con un aumento considerable de la resistencia a la tracción debido al cinc. Estas propiedades mecánicas pueden modificarse con diversos elementos como el plomo, estaño, manganeso, aluminio, hierro, silicio, níquel, arsénico, con el fin de mejorar algunas propiedades como la maquinabilidad [17].

Esta aleación conserva una buena resistencia a la corrosión y maleabilidad del cobre, pero se considera más fuerte, debido a que el cinc tiene una estructura cristalina hexagonal cerrada, es decir, la solubilidad en el cobre no se puede completar. Sin embargo, el cobre al tener una estructura cúbica centrado en las caras (FCC) y considerando una diferencia de tamaño de ambos átomos del 4%, permiten una gran solubilidad. Esta relación predice la resistencia a la tracción de solución sólida. Mientras mayor sea la diferencia de tamaño, mayor es su resistencia, pero dicha correlación se limita por la solubilidad [18].

1.6.1. Tipos de latón

1.6.1.1. Latón Alpha (α)

Esta gama de aleaciones se denomina latón alpha o para trabajos en frío. Su contenido de cinc es hasta un 39%. El latón que contiene 30% de cinc se lo conoce como '70/30' o 'latón de cartucho', se caracteriza por tener una buena ductilidad a temperatura ambiente, permitiendo la manipulación en frío, a más de tener una mejor resistencia a la corrosión a diferencia de aleaciones con mayor contenido de cinc. Los tubos de los intercambiadores

de calor con frecuencia son fabricados con este tipo de latón 70/30 que poseen elementos adicionales para una mejor resistencia a la corrosión, también se utiliza para la producción de sujetadores, tornillos para madera, remaches y cierres de cremallera [19].

1.6.1.2. Latón Beta (β)

El latón de fase beta es estable entre el 46% y 50% de cinc. La estructura cristalina centrada en el cuerpo (BCC) cristalizada β al estar por encima de la temperatura de 470 [°C] los átomos de cinc se localizan al azar en la estructura, al enfriarse hasta temperaturas por debajo de las críticas, de acuerdo con la composición del material estos átomos comienzan a colocarse en posiciones preferenciales. La fase beta esta ordenada cuando forma una súper red y se denomina β' . En la Figura 1.9 se muestra la estructura cristalina de átomos de cobre y cinc (alrededor del 50%) desordenada y posteriormente ordenada [20].

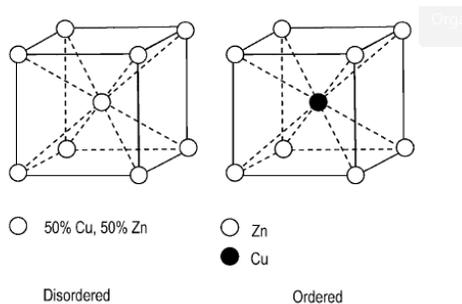


Figura 1.9 Estructura ordenada y desordenada en 50% Cu- 50% Zn.
(Fuente: [21])

1.6.1.3. Latón Alpha – Beta ($\alpha+\beta$)

Los latones $\alpha - \beta$ también se denominan ‘dúplex’ o ‘para trabajo en caliente’ generalmente contienen de 39% a 45% de cinc. Se caracteriza por tener una capacidad limitada para trabajo en frío. Sin embargo, a temperaturas elevadas son más factibles para extruir en barras de selección compleja, ya sea sólida o hueca, además, forjado en caliente (estampados), dicho rango de temperatura debe estar entre 650 y 750 [°C]. Este trabajo en caliente descompone la fase α en pequeñas partículas, así como la fase β favorece a la fragmentación de viruta y se puede obtener buenas propiedades mecánicas [17].

La fase β' se caracteriza por ser más dura y frágil a comparación de la fase α cuando se trabaja a temperatura ambiente, para que dicha fase β pueda tener más plasticidad se aumenta la temperatura, es importante que la velocidad de enfriamiento sea controlada de manera que se pueda asegurar la obtención de una estructura beta monofásica, el uso de técnicas de recocido continuo de láminas, tiras, alambres y tubos proporciona un

enfriamiento más rápido, el cual se debe controlar para que no sean susceptibles a la corrosión y descincificación [18].

1.6.1.4. Latones Especiales

Estos latones especiales se obtienen con el fin de aumentar la resistencia mecánica, para lo cual se insertan pequeñas cantidades de elementos como el aluminio, estaño, hierro, manganeso o níquel. Estas aleaciones tienen una variación en las fases α y β , produciendo un desplazamiento hacia la izquierda en la curva del diagrama de equilibrio, exceptuando el níquel en el cual su recorrido en el diagrama es al contrario. Esta adición no genera nuevas fases en la microestructura, únicamente se tiene un cambio en las propiedades [19]. En la Tabla 1.4 se describe algunos tipos de latones especiales.

Tabla 1.4 Tipos de latones especiales.

Aleación	Composición [%]	Resistencia a la tracción [kg/mm^2]	Elongación [%]	Principales características
Latones al aluminio	Cu: 77,5; Zn: 19,8; Al: 2,4	18	18	- Incremento en la corrosión - Favorece la colabilidad
Latones al plomo	Cu: 62; Zn: 35,5; Pb: 2,5	15	15	- Reduce la resistencia mecánica - Mejora la maquinabilidad
Latones al manganeso	Cu: 58; Zn: 38,5; Mn: 3,5	30	30	- Incremento de la resistencia de tracción - Disminuye la ductilidad
Latones al estaño	Cu: 91; Zn: 8,3; Sn: 0,7	18	20	- Incremento de la resistencia de tracción y corrosión
Latones al silicio	Cu: 58; Zn: 39; Si: 4	35	30	- Facilidad para fundir - Incremento de la resistencia de tracción y corrosión

(Fuente: [22])

1.6.2. Diagrama de fase de latón (Cu – Zn)

El diagrama de fases Cu - Zn es la base de las aleaciones de latón comúnmente utilizadas en la industria, contiene fases intermedias con rangos de solubilidad sólida apreciable, las soluciones sólidas ricas en cobre y cinc que constituyen las dos fases finales y posee cuatro fases intermedias que son β , δ , γ y ϵ . En la Figura 1.10, se observa que el cobre puede

disolverse hasta un 32.5% en Zn a una temperatura de 900 [°C], esta proporción incrementa a un 39 % de Zn a los 455 [°C]. Mientras que la temperatura disminuye también lo hace la cantidad de cinc, pero su difusión es lenta a temperaturas inferiores a los 455 [°C] y con velocidades de enfriamiento ordinarias, el contenido de cinc puede permanecer en solución sólida en el cobre hasta un 39% a temperatura ambiente. Cuando se incrementa el cinc más de un 39%, la fase β' ordenada se formará con un enfriamiento rápido. Dicha fase es dura a temperatura ambiente y su ductilidad es limitada, una vez que cambie a la fase β desordenada por encima de los 455 [°C] se vuelve plástica. Estas aleaciones son fáciles de mecanizar en caliente y difíciles de conformar en frío. La máxima resistencia a la tracción se obtiene con un 44% de Zn, para mayor contenido de cinc más allá del 50% se forma la fase gamma (γ), delta (δ) las cuales son demasiado frágiles para aleaciones de ingeniería. Para las aleaciones que contienen únicamente la fase α se caracterizan por ser dúctiles a temperatura ambiente. La fase ordenada beta prima (β') es muy dura y con baja capacidad para ser trabajada en frío, al elevar la temperatura se obtiene la fase β mejorando la plasticidad y consiguiendo trabajar en caliente [21].

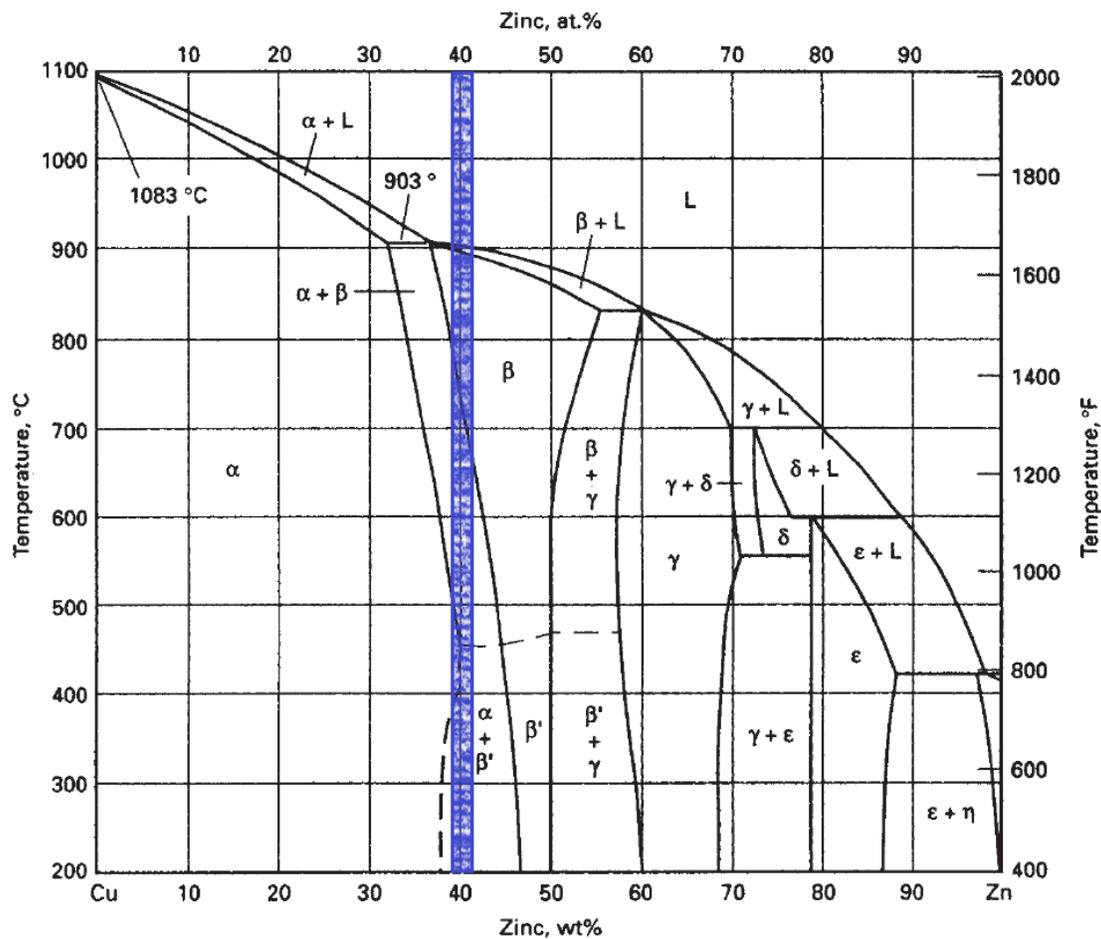


Figura 1.10 Diagrama de fases Cu – Zn.
(Fuente: [18])

1.7. Elementos aleantes

1.7.1. Generalidades del plomo

El plomo es un elemento químicamente considerado como un metal pesado, se caracteriza por ser de un color gris plateado, además de tener una excelente maleabilidad, resistencia a la corrosión y su capacidad elástica permite formar aleaciones con facilidad. Su extracción es relativamente fácil, los compuestos que se encuentran en la naturaleza son las galena (sulfuro de plomo) el cual es la fuente principal y es el más rico en plomo, además se tiene la cerusita (carbonato de plomo), la anglesita (sulfato de plomo), cromatos, arseniatos y otros [23].

Este metal se utiliza como cubiertas para cables de televisión, teléfono, internet o de electricidad. En la agricultura se usa los arseniatos de plomo como insecticida para proteger los cultivos, así mismo se emplean en revestimientos de serpentines, válvulas, entre otros. Los sulfatos de plomo por su resistencia a la corrosión se aplica en superficies para revestimiento de tuberías, acuarios y materiales que se encuentren en contacto con agua de mar [24].

1.7.1.1. Propiedades del plomo

El plomo tiene una amplia variedad de aplicaciones por su maleabilidad, densidad, lubricidad, flexibilidad, conductividad eléctrica y coeficiente de expansión los cuales son muy altos, sin embargo, su modulo elástico, resistencia, dureza y punto de fusión son muy bajos. Su densidad es de $11,35 \text{ [}^{gr}/\text{cm}^3\text{]}$ a temperatura ambiente y su punto de fusión es de $327,4 \text{ [}^\circ\text{C]}$. En la Tabla 1.5 se describe algunas propiedades mecánicas importantes [13].

Tabla 1.5 Propiedades mecánicas del plomo.

Propiedades Mecánicas						
	Resistencia a la tracción		Límite elástico		Elongación	Dureza
50042	Mpa	ksi	Mpa	ksi	%	Brinell (HB)
(99,94 Pb)	12 - 13	1,7 - 19	5,5	0,8	30	3,2 – 4,5

(Fuente: [13])

Por su maleabilidad y su auto lubricación se usa en aleaciones para piezas como cojinetes, juntas y arandelas. La mayor aplicación se da en la fabricación de papel aluminio, láminas

de plomo con frecuencia se producen tan delgadas como 0.01 mm (0.0005 in). En algunas aleaciones incrementan la fuerza requerida para extruir, sin embargo, calentando a una temperatura de aproximadamente 230 [°C] se pueden obtener tuberías, alambres, municiones y revestimientos para cables.

1.7.1.2. Influencia del plomo en el latón

Una de las adiciones más comunes para modificar las propiedades del latón es el plomo, se agrega hasta un 3 % a los latones $\alpha - \beta$ para proporcionar un mecanizado libre. El plomo no forma una solución sólida en latón, sin embargo, está presente como una fase discontinua distribuida y dispersa en toda la aleación. También, existe una reducción en la ductilidad, pero no tiene ningún efecto en la resistencia a la tracción y corrosión. Por lo general el latón de mecanizado libre contiene 58 % de Cu y 39% de Zn aproximadamente para mejorar su maquinabilidad, sin embargo, otras aleaciones contienen menos plomo y más cobre, esto da una amplia selección de aleaciones, permitiendo equilibrar el rango de propiedades requeridas incluyendo la maquinabilidad, la capacidad de extrusión, entre otros. En la Figura 1.11 se puede observar el efecto del plomo en el cobre, principal elemento en los latones.

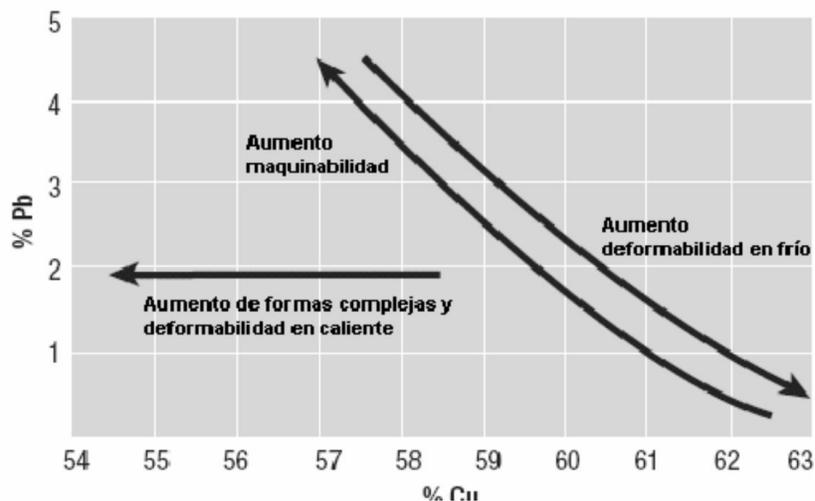


Figura 1.11 Efecto del contenido de cobre y plomo en el latón de mecanizado libre.
(Fuente: [17])

1.7.2. Elementos alternativos al plomo

El plomo por su toxicidad ha impulsado a emplear elementos alternativos como el bismuto (Bi) y silicio (Si), los cuales permiten dar un resultado favorable en el latón de corte libre [25].

El bismuto es un metal blanco rojizo y se encuentra en la naturaleza como bismita (Bi_2O_3), bismuthinita (Bi_2S_3) y bismutita [$(BiO)_2CO_3$], debido a sus dos estados de oxidación +3 y +5 no se tiene pruebas analíticas para determinar la lixiviación del Bi en el latón. Además existen problemas que relacionan la forma del Bi en los coloides que se utilizan en estudios toxicológicos, de ahí que no se tiene una relación concreta de la forma y la absorción en el latón [3].

1.7.3. Generalidades del silicio

El silicio es un metaloide en estado sólido que se encuentra abundantemente en la naturaleza en forma de óxido de silicio (SiO_2) y silicatos. Se caracteriza por tener un color gris oscuro con un tono azul brillante, posee una alta dureza y elevado punto de fusión. En la metalurgia el silicio se utiliza como desoxidante permitiendo un incremento de la resistencia y la tenacidad [26].

El silicio monocristalino es utilizado en la industria electrónica y microelectrónica en la fabricación de celdas solares, transistores y diferentes tipos de semiconductores. Se emplea como elemento de aleación en fundiciones, preparación de siliconas, aislantes y esmaltados. Al ser inerte y estable a altas temperaturas se aprovecha en la industria como lubricantes, adhesivos, impermeabilizantes y aplicaciones médicas [27].

1.7.3.1. Propiedades del silicio

El silicio generalmente se presenta de dos formas: en polvo y cristalino (metálico), estos no reaccionan con el oxígeno, el agua o los ácidos, pero es soluble en álcalis. Su estructura cristalina es de diamante (alotrópica). Su densidad es $2,34 \text{ [gr/cm}^3\text{]}$ y su punto de fusión es de $1410 \text{ [}^\circ\text{C]}$ [28]. Las propiedades mecánicas se pueden visualizar en la Tabla 1.6.

Tabla 1.6 Propiedades mecánicas del silicio.

Propiedades Mecánicas				
	Módulo de Tracción	Módulo volumétrico	Dureza	Relación de Poisson
	(99,99 Si)	Gpa 113	Gpa 100	

(Fuente: [29])

1.7.3.2. Propiedades del ferro-silicio

El ferro-silicio es una aleación de hierro y silicio que oscila entre el 40 y 80 [%], se obtiene mediante la reducción de la sílice utilizando carbón de coque en presencia de mineral de hierro en los altos hornos. Se emplea como desoxidante en los aceros para evitar una excesiva descarburación. Además, es un grafitizante en la fabricación de fundiciones grises. Se comporta a modo de vehículo en la adición de silicio, también, como elemento de aleación el cual permite mejorar el comportamiento de la aleación Cu-Zn frente a la corrosión y altas temperaturas [30]. Sus principales características físicas se muestran en la Tabla 1.7.

Tabla 1.7 Características físicas del ferro silicio.

Estado físico	
Color	Gris Oscuro
Olor	Inodoro
Punto de fusión	1210 – 1360 [°C]
Punto de ebullición	2355 [°C]
Densidad relativa	3,4 – 5,1 [gr/cm^3]

(Fuente: [30])

1.7.3.3. Influencia del silicio en el latón

El silicio es un elemento fundamental si se requiere aumentar la resistencia al desgaste en el latón, además que se incluye en las fundiciones a presión y en diferentes aleaciones de relleno para soldar con gas reduciendo la oxidación del cinc y ayuda a la fluidez. Para mejorar la resistencia a la corrosión es necesario incrementar el contenido de fase β . La adición de silicio permite reducir el riesgo de agrietamiento por corrosión bajo tensión y descincificación [17].

1.8. Proceso de Maquinado

En la ingeniería existe un sinnúmero de técnicas para conformar diferentes materiales, el proceso de maquinado permite remover material en forma de viruta o separaciones de secciones de una pieza inicial consiguiendo la forma final requerida, estos materiales pueden ser: madera, plástico, metales. Existen diferentes tipos de maquinados como son: convencional, abrasivo y procesos no tradicionales como se muestra en la Figura 1.12. El maquinado es un proceso de manufactura moderna, el mismo que utiliza una herramienta de corte para remover el exceso de material de una pieza determinada, este corte involucra

la deformación cortante del material formando la viruta que será removida exponiendo una nueva superficie [31].

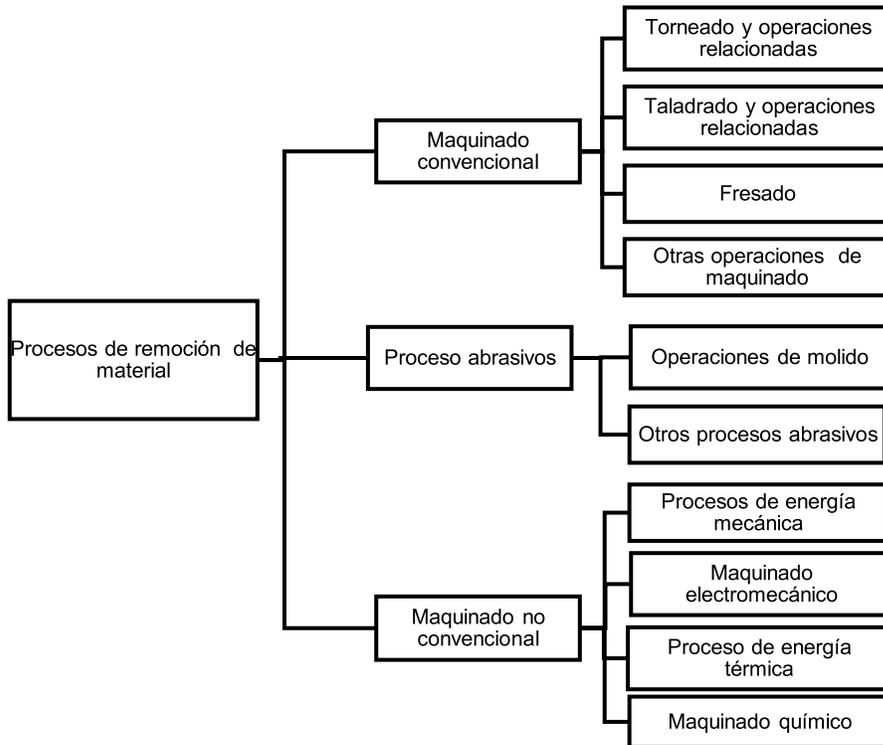


Figura 1.12 Tipos de procesos de remoción de material.
(Fuente: [10])

El maquinado no es únicamente un proceso, sino un conjunto de procesos, con una característica común del uso de una herramienta de corte, la cual genera viruta. El corte entre el material y la herramienta se da mediante un movimiento relativo, durante el corte se comprime al material de trabajo cerca de la herramienta produciendo una deformación de corte (conocida también como deformación primaria) en forma de viruta como se visualiza en la Figura 1.13. La viruta pasa por la cara de la herramienta de corte, lo que proporciona una deformación adicional (conocida también como deformación secundaria), debido al desprendimiento y deslizamiento de la viruta contra la herramienta. El material al rozar la cara de la herramienta se calienta y se deforma plásticamente durante el proceso de corte primario, mientras que en el proceso de corte secundario está influenciado por los fenómenos en el plano de corte. Se toma a consideración la dirección de corte el mismo que está directamente correlacionado con el proceso de deformación y fricción de la cara de ataque, teniendo calentamientos y esfuerzos de la viruta en los procesos primarios. Por esta razón el esfuerzo cortante y la dirección de corte deben determinarse simultáneamente [32].

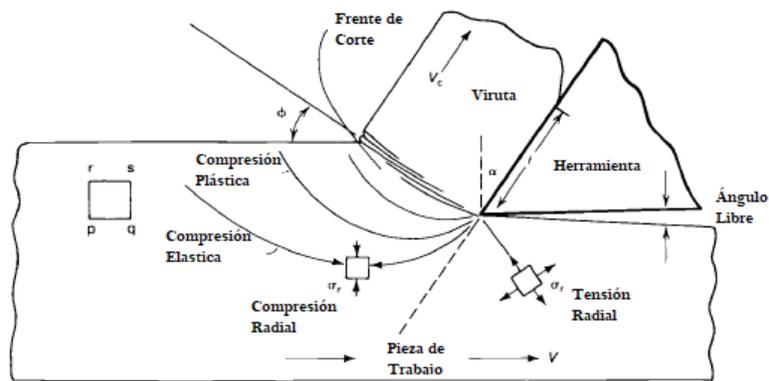


Figura 1.13 Proceso de remoción de material.
(Fuente: [32])

1.8.1. Formación de viruta en el maquinado

En las operaciones de maquinado la formación de viruta es muy compleja por las diversas variables que intervienen como son: el tipo de material, ángulo de incidencia de la herramienta, variedad de forma y característica deseada, velocidad y profundidad de corte, avance, entre otros. Es por eso que se tiene un modelo simplificado llamado de corte ortogonal de dos dimensiones para un análisis del proceso de formación de viruta.

Modelo de corte ortogonal:

Para este modelo representado en la Figura 1.14, utiliza una herramienta de corte en forma de cuña. Una vez que la herramienta penetra al material se obtiene una viruta a lo largo del plano de corte formando un ángulo α con la superficie de trabajo. Existe una deformación plástica a lo largo del plano de corte. La herramienta tiene dos elementos geométricos conocidos como ángulo de inclinación α y el ángulo de claro o incidencia ϕ formado por la herramienta y superficie de trabajo. En el corte, la distancia por debajo de la superficie corresponde al espesor de la viruta formándose un t_o , mientras que al formarse la viruta a lo largo del plano de corte incrementa su espesor a t_c , la relación se denomina relación del grueso de la viruta (también conocido como relación de viruta) [10].

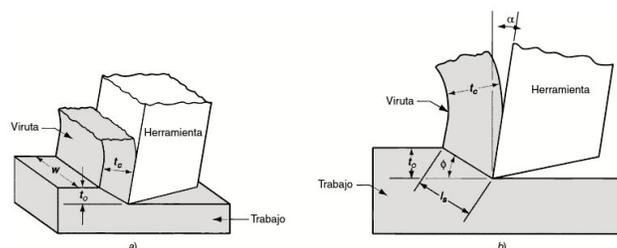


Figura 1.14 Corte ortogonal. a) como un proceso tridimensional y b) tal como se reduce a dos dimensiones en una viruta lateral.

(Fuente: [10])

Formación real de la viruta:

Existen diferencias marcadas entre el modelo ortogonal y real, puesto que la deformación no ocurre a lo largo del plano sino dentro de una zona delegada de corte, el modelo más realista de la formación de viruta se visualiza en la Figura 1.15. Además, se tiene una segunda zona de corte que resulta de la fricción entre la viruta y la herramienta al deslizarse a lo largo de la cara inclinada [10].

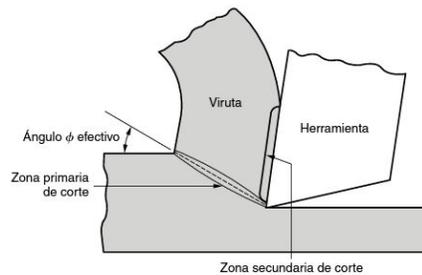


Figura 1.15 Visión más realista de la deformación de viruta.
(Fuente: [10])

Dependiendo del tipo de material y las condiciones de corte de operación se pueden distinguir 4 tipos básicos de viruta, los cuales se pueden observar en la Figura 1.16.

a) Viruta discontinua.

Este tipo de viruta generalmente se presenta cuando se maquinan materiales relativamente frágiles como son los hierros fundidos sujetos a velocidades bajas de corte. La viruta se forma en segmentos separados (a veces están unidos sin cohesión). Su textura es irregular a la superficie de maquinado.

b) Viruta continua.

Los materiales dúctiles que se trabajen a velocidades altas con avances y profundidades pequeñas generan virutas largas y continuas. Este tipo de viruta origina un buen acabado superficial. Para asegurar este tipo de viruta el borde cortante de la herramienta debe estar afilado y tener una baja fricción entre la herramienta y la viruta.

c) Viruta continua con acumulación en el borde.

En los materiales dúctiles al trabajar con velocidades de corte bajas o medias y adhesiones de porciones de material en la cara inclinada de la herramienta forman este tipo de viruta. Esta formación en el borde (BUE) es naturalmente cíclica, debido a que una vez que se forma, crece, posteriormente se vuelve inestable y finalmente se rompe. Este tipo de maquinado desgasta la herramienta de corte y la superficie se vuelve rugosa.

d) Viruta dentada.

En metales difíciles de maquinar como son aleaciones de titanio, aceros inoxidable austeníticos y super aleaciones en base de níquel, y, que estén expuestos a velocidades de corte elevadas generan este tipo de viruta que tienen una apariencia de dientes de sierra. Posee dos zonas producidas en el maquinado, la primera de alta resistencia al corte y la segunda de baja resistencia al corte.

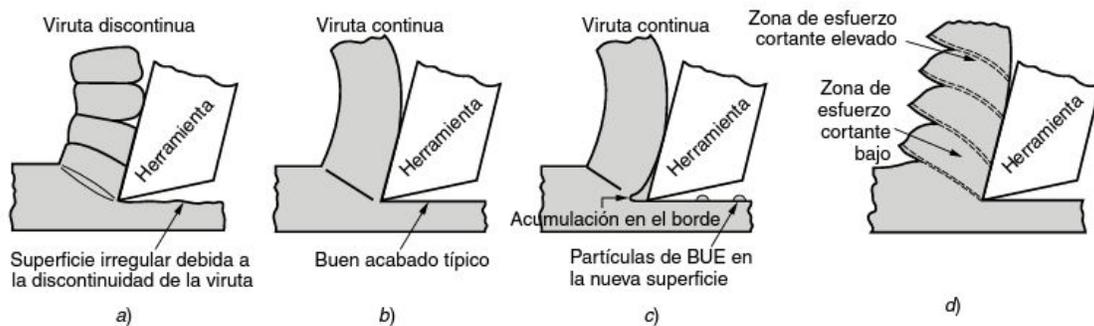


Figura 1.16 Cuatro tipos de formación de viruta en el corte de metales: a) discontinua, b) continua, c) continua con acumulación en el borde y d) dentada.

(Fuente: [10])

1.8.2. Métodos de evaluación de la maquinabilidad

Los materiales poseen un número de maquinabilidad único que permite evidenciar la facilidad o dificultad para remover material por arranque de viruta. La maquinabilidad está influenciada por la dureza, resistencia a la tracción, composición química, microestructura, endurecimiento por deformación y fabricación del material. Sin embargo, esta clasificación se puede desarrollar con un conjunto de condiciones de corte y un tipo de herramienta, las mismas que se ven afectadas al cambiar las condiciones o material de la herramienta de corte. Por consiguiente, se tiene diferentes pruebas de maquinabilidad [32]:

- Pruebas de vida útil.
- Pruebas de rugosidad superficial.
- Pruebas de fuerza de corte.
- Pruebas de consumo de energía.
- Pruebas de temperatura de corte.

1.8.3. Prueba de rugosidad superficial

La prueba de rugosidad superficial toma a consideración la pieza terminada para su evaluación, mientras mejor sea el acabado con todas las consideraciones determinadas mejor será su maquinabilidad. La rugosidad superficial permite analizar las propiedades

del material, precisión dimensional y su integridad, la cual está relacionada con la fatiga, la resistencia a la corrosión o vida de servicio de la pieza. El proceso de maquinado da como resultado una superficie más o menos rugosa, ondulada y con falta de paralelismo como se puede observar en la Figura 1.17 [33].

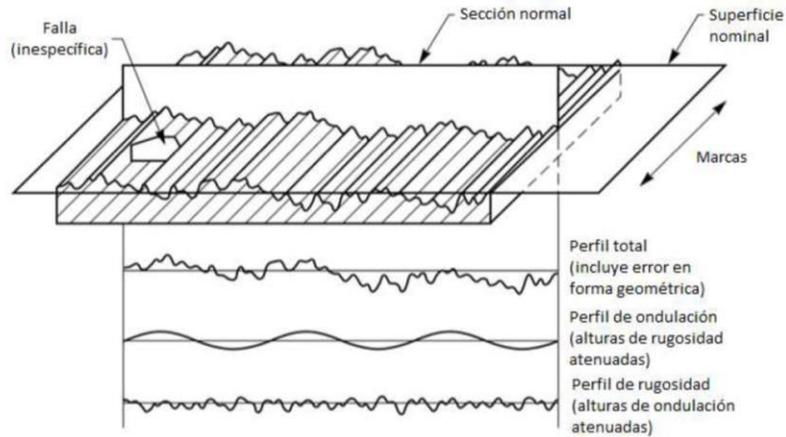


Figura 1.17 Esquema de características de una superficie según el código ASME B46.1.
Fuente: [34]

Existen varios parámetros que se deben considerar al momento de realizar un proceso de maquinado o medición de rugosidad. Primero, es importante determinar los parámetros del proceso (especificaciones técnicas). Segundo, maximizar la productividad de acuerdo con la fabricación y los recursos que se dispone. En la Figura 1.18 se puede visualizar los factores que afectan la rugosidad superficial [35].

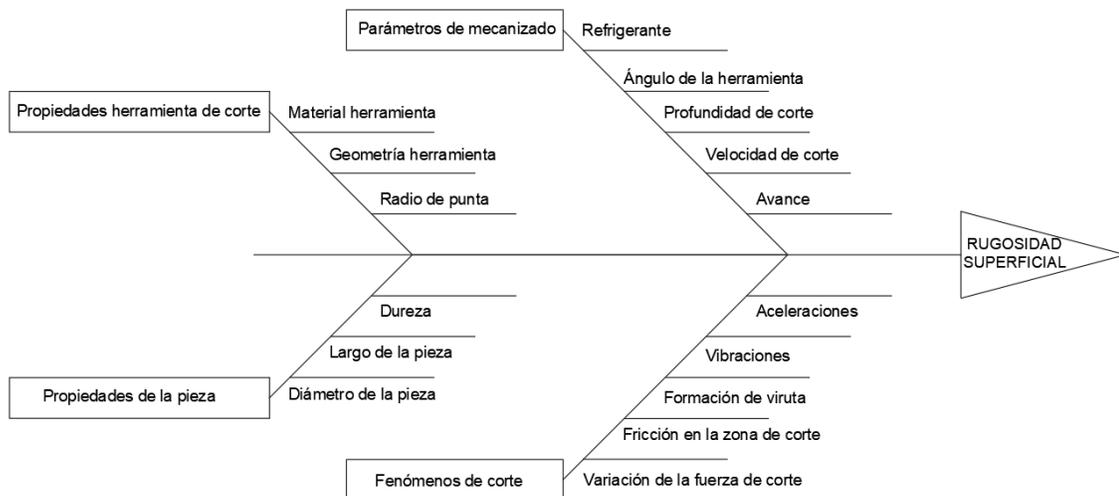


Figura 1.18 Factores que afectan la rugosidad superficial.
Fuente: [35]

2. METODOLOGÍA

2.1. Selección de los elementos de la aleación

Para la realización del estudio se tomó como referencia la siguiente aleación de cobre (latón) UNS C38500, el cual es utilizado en el país para la fabricación de elementos destinados a diferentes aplicaciones como son: accesorios para secadores eléctricos, bisagras, accesorios para cerraduras, puertas de duchas, pasamanos, juntas de dilatación, mordazas de prensa, tuercas, tornillos, grifos, válvulas, acoples, uniones.

Sus principales características son: buena ductilidad, maquinado libre debido al plomo en su composición, por su contenido de cinc se lo puede utilizar en procesos de doblado y estampado en caliente. En la Tabla 2.1 se muestra la composición química del material.

Tabla 2.1 Aleación Cu-Zn C38500.

Aleación %	Zn	Cu	Pb	Fe
C 38500	Resto	55 - 59%	2,5 - 3,5 %	máx. 0,35%

(Fuente: [36])

Como caso de estudio se plantean las siguientes aleaciones de Cu – Zn utilizando silicio y ferro-silicio en porcentajes establecidos del 0.5%, 1%, 1.5% y 2% como reemplazo del plomo, en las Tablas 2.2 y 2.3 se muestra las composiciones químicas de cada una de las muestras.

Tabla 2.2 Composición química en porcentajes de la aleación Cu - Zn más silicio.

Aleación	Zn (%)	Cu (%)	Si (%)
Muestra 1	40,5	59	0,5
Muestra 2	40,0	59	1,0
Muestra 3	39,5	59	1,5
Muestra 4	39,0	59	2,0

(Fuente: Propia)

Tabla 2.3 Composición química en porcentajes de la aleación Cu – Zn más ferro-silicio.

Aleación %	Zn (%)	Cu (%)	Si (%)	Fe (%)	Al (%)	C (%)	P (%)	S (%)
Muestra 1	40,33	59	0,5	0,1615	0,0043	0,00025	0,0001	0,00005
Muestra 2	39,67	59	1,0	0,3230	0,0086	0,0005	0,0002	0,0001
Muestra 3	39,00	59	1,5	0,4845	0,0129	0,00075	0,0003	0,00015
Muestra 4	38,34	59	2,0	0,6460	0,0172	0,001	0,0004	0,0002

(Fuente: Propia)

2.1.1. Cálculo de cargas

El cálculo de las cargas se basa en definir la relación de los porcentajes en peso de los distintos elementos que en conjunto forman la carga, la cual se introduce en un horno de fusión para elaborar una aleación con una composición química establecida previamente. Una vez determinada la composición química deseada, se realizó el cálculo utilizando los porcentajes en peso de los elementos que conforman la aleación con el propósito de obtener 100 kg para posteriormente realizar una interpolación a la masa que se requiere, estos valores no serán los definitivos, ya que se debe tomar en consideración las pérdidas no recuperables debido a la evaporación, la creación de óxidos, las pérdidas a causa de la interacción de la aleación con el revestimiento del horno de fusión y del crisol.

Los valores correspondientes a las pérdidas por evaporación que se producen durante la elaboración de la aleación, se las denomina pérdidas por quemado. En la Tabla 2.4 se muestran las pérdidas de los elementos más relevantes en el proceso de fundición.

Tabla 2.4 Porcentaje de quemado de componentes de aleaciones de cobre.

Componente	Cu	Al	Zn	Pb	Si	Mn	Sn	Ni	Bi	Fe
% de quemado	1 – 1,5	2 – 3	2 - 5	1 - 2	4 - 8	2 - 3	1,5	1,2	10 - 15	1

(Fuente: [37])

Para conseguir la composición química deseada en cada una de las coladas, se han utilizado materiales puros para evitar introducir elementos adicionales a las composiciones predeterminadas en las Tablas 2.5. A continuación, se detalla el cálculo de la carga para la obtención de la materia prima:

- 1) Determinación del quemado de los elementos de la aleación y material requerido para 100 kg de cada una de las muestras.

Tabla 2.5 Material requerido para 100 kg de Cu – Zn más silicio y ferro-silicio.

Elementos	A (% Aleación a conseguir)	B (% de Quemado)	C = A x B [kg]	Material Requerido [kg] (A + C)
0,5 % de silicio / 0,5 % de ferro-silicio				
Cobre	59	0,015	0,885	59,885
Cinc	40,5	0,05	2,025	42,525
Silicio	0,5	0,075	0,0375	0,538
1 % de silicio / 1 % de ferro-silicio				
Cobre	59	0,015	0,885	59,885
Cinc	40	0,05	2	42,000

Silicio	1	0,075	0,075	1,075
1,5 % de silicio / 1,5 % de ferro-silicio				
Cobre	59	0,015	0,885	59,885
Cinc	39,5	0,05	1,975	41,475
Silicio	1,5	0,075	0,1125	1,615
2 % de silicio / 2 % de ferro-silicio				
Cobre	59	0,015	0,885	59,885
Cinc	39	0,05	1,95	40,950
Silicio	2	0,075	0,15	2,150

(Fuente: Propia)

En la Tabla 2.6 se muestra la cantidad de la aleación requerida para la realización de 6 probetas con una masa total de 14.43 [kg], pero a este valor es necesario aumentar un 10% debido a las pérdidas que se producen a lo largo del proceso de fundición, obteniendo un valor final de 16 [kg] por cada colada.

Tabla 2.6 Valores correspondiente a una colada.

Peso del sistema		
Peso neto (3 probetas colado en posición horizontal)	7,83	kg
Peso neto (3 probetas colado en posición vertical)	6.6	kg
Peso neto (6 probetas) + Pérdidas (10%)	16	kg

(Fuente: Propia)

- 2) Carga total para la obtención de 16 kg de cada una de las muestras se puede visualizar en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7 Material requerido para 16 kg de Cu – Zn más silicio y ferro-silicio.

Material requerido		
0,5 % de silicio / 0,5 % de ferro silicio		
Elementos	% requerido	Material Requerido [kg]
Cobre	59,885	9,6
Cinc	42,525	6,4
Silicio	0,5375	0,085
1 % de silicio / 1 % de ferro silicio		
Elementos	% requerido	Material Requerido [kg]
Cobre	59,885	9,5
Cinc	42	6,2
Silicio	1,075	0,16
1,5 % de silicio / 1,5 % de ferro silicio		
Elementos	% requerido	Material Requerido [kg]
Cobre	59,885	9,7
Cinc	41,475	6,4

Silicio	1,6125	0,25
2 % de silicio / 2 % de ferro silicio		
Elementos	% requerido	Material Requerido [kg]
Cobre	59,885	9,6
Cinc	40,95	6,05
Silicio	2,15	0,325

(Fuente: Propia)

En la Tabla 2.8 se determinan las cantidades requeridas para la realización de 24 probetas de Cu – Zn más silicio y 24 probetas de Cu – Zn más ferro-silicio, dando un total de 48 probetas, las cuales serán utilizadas para realizar los diferentes tipos de ensayos para su posterior análisis.

Tabla 2.8 Material total requerido.

Masa Total	kg	Material Requerido	Unidades
Cobre	76.8	77	kg
Cinc	50.1	51	kg
Silicio	0,82	820	gr
Ferro-silicio	0,82	820	gr

(Fuente: Propia)

2.2. Proceso de fundición de las probetas

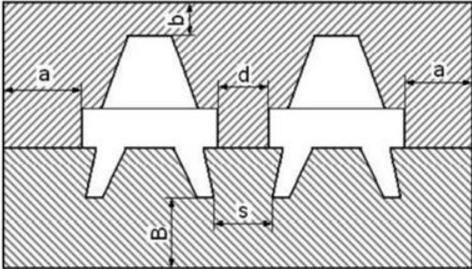
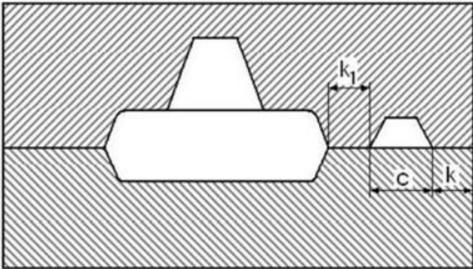
2.2.1. Dimensionamiento de la caja de moldeo

El dimensionamiento de la caja de moldeo se establece a partir de las dimensiones y forma de la pieza o moldura que se va a fabricar representada en la Figura 2.3. Para determinar la disposición se tomó como referencia las variables de posicionamiento de la Tabla 2.9 en las que se define la distancia recomendada entre pieza, molde y sistema de alimentación.

- Distancia pieza – pieza.
- Distancia pieza – molde.
- Distancia pieza – canal de alimentación.

Tabla 2.9 Distancia admisible entre elementos.

Distancia pieza - pieza y pieza - molde									
Tipo de pieza		Dimensiones							
		a	b	B		s		d	
Pequeñas		20 - 30	35 - 60	50 - 75		0,3 de la altura del modelo		0,5 de la altura del modelo	
Medianas		50 - 75	75 - 100	100 - 125					
Grandes		125 - 175	150 - 200	175 - 200		-		-	
Distancia pieza - conductos de alimentación									
Base del conducto c [mm]	Tipo de molde	Masa de la pieza [Kg]							
		≤50	51 - 250	250 - 500	>501	≤50	51 - 250	250 - 500	>501
		k1				k			
≤25	Seco	30	35	-	-	30	35	-	-
	Verde	50	60	-	-	30	35	-	-
26 - 50	Seco	40	40	45	50	40	40	45	50
	Verde	50	55	60	70	45	50	55	60
>51	Seco	50	55	60	50	50	50	55	60
	Verde	60	65	70	80	60	60	65	70

Nota: Todas las unidades en [mm].

(Fuente: [11])

Al definir la distancia entre pieza – pieza y pieza – molde se tomará como referencia los valores establecidos de piezas pequeñas y para determinar el valor entre pieza – conductos de alimentación se toma a consideración una masa menor a 50 kg, las dimensiones se presentan en la Tabla 2.10.

Tabla 2.10 Dimensionamiento de la caja de moldeo.

Dimensión	Valor [mm]
a	20 – 30
b	35 – 60
B	50 – 75
s	10
d	15
c	30
K ₁	40
K	40

(Fuente: Propia)

En la Figura 2.1 se establecen las dimensiones de la caja de moldeo y su construcción a partir de los valores obtenidos en la Tabla 2.10.

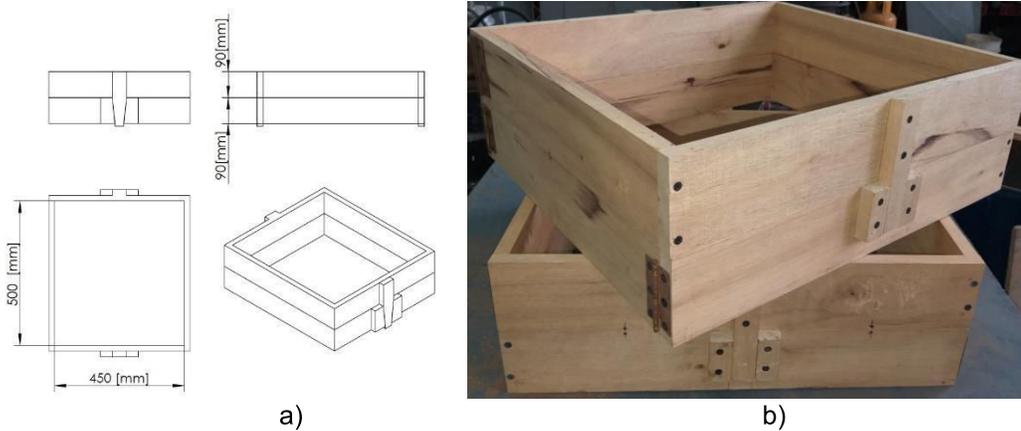


Figura 2.1 a). Dimensiones de la caja de moldeo. b). Caja de moldeo terminada.
(Fuente: Propia)

2.2.2. Modelo

El modelo planteado en el presente estudio es un cilindro. Se optó por esta geometría, puesto que a partir de esta pieza se van a obtener diferentes probetas para la realización de diversos ensayos destructivos. Tomando en cuenta los valores establecidos en la norma ASTM E8 para el ensayo de tracción que se detalla en la Tabla 2.26, se determinó la distribución de la Figura 2.2.

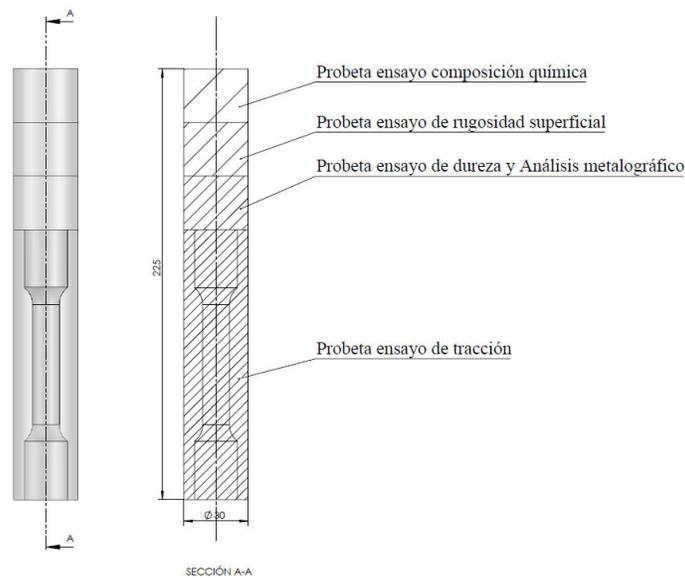


Figura 2.2 Distribución del modelo. Dimensiones en [mm].
(Fuente: Propia)

La moldura se divide longitudinalmente por su eje mayor, dando como resultado un molde de tipo deslizante. Este tipo de moldes son los más apropiados para la fundición en cajas de dos niveles. El material seleccionado para su fabricación es la madera debido a su facilidad de maquinado. En la Figura 2.3 se muestra el diseño del modelo deslizante con sus respectivos elementos de acople y cavidades auxiliares para facilitar su extracción.

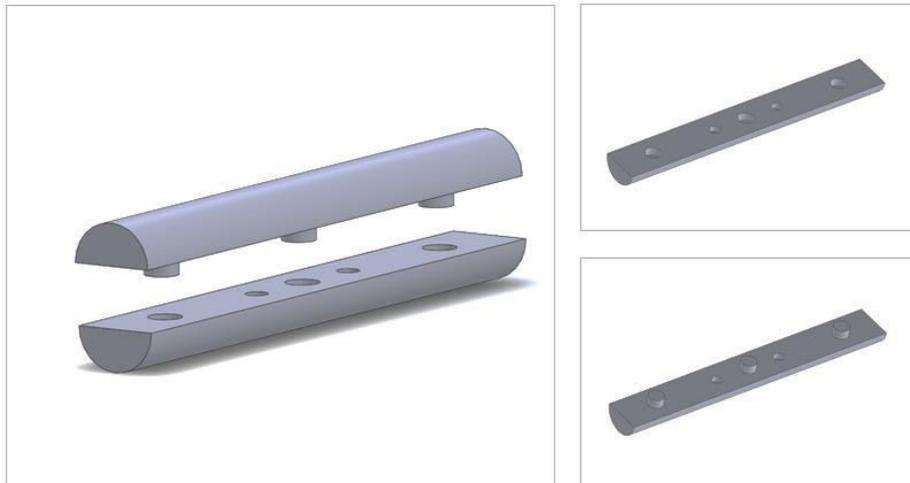


Figura 2.3 Modelo deslizante.
(Fuente: Propia)

2.2.3. Preparación de la arena de moldeo

La selección de la arena de moldeo es un factor importante en el proceso de fundición. Según su composición se pueden clasificar en:

- Arena sílice (SiO_2).
- Arena de zirconio ($ZrSiO_4$).
- Arena de cromita ($FeOCr_2O_3$).

Para la realización de este estudio se utilizará arena sílice como material para el molde por sus excelentes propiedades refractarias, elevado punto de fusión, bajo costo y extraordinario acabado superficial.

Este tipo de arena debe cumplir con ciertos parámetros para garantizar unas óptimas características con las que deben cumplir los moldes como son: la permeabilidad, compactibilidad, humedad, entre otras. Con la finalidad de obtener los mejores resultados de las características antes mencionadas, la arena debe poseer un tamaño de grano menor a 2 [mm] y superior a 0.5 [mm].

En el presente estudio se plantean dos configuraciones de arena en conjunto con la disposición del sistema de alimentación. Para el colado con probetas en posición horizontal

se empleará arena nueva con resinas fenólicas de uretano compuestas de dos tipos de resinas y un catalizador, las mismas que deberán ser agregadas en porcentajes de acuerdo con el peso de la arena requerida.

Una vez realizado el dimensionamiento de las cajas de moldeo, se procede a calcular el volumen de estas y con la densidad de la arena sílice se obtiene la cantidad de arena necesaria, en este caso el valor requerido es de 60 kg. Los porcentajes de las resinas y el catalizador se muestran en la Tabla 2.11.

Tabla 2.11 Porcentaje de resina y catalizador para arena nueva colado con probetas en posición horizontal.

% recomendado	Resina A	Resina B	Catalizador
		3,50%	1,26%
Arena sílice requerida: 60 kg	2,1 kg	0,756 kg	2,1 kg

(Fuente: [38])

Para el colado con probetas en posición vertical se empleará arena mixta (50% reciclada y 50% nueva) con resinas furánicas compuestas de una resina y un catalizador, las mismas que deberán ser agregadas en porcentajes de acuerdo con el peso de la arena requerida, esta arena fue proporcionada por la empresa FUNDIRECICLAR S.A., además, en el Anexo I se visualiza los ensayos de granulometría y LOI realizados a la arena para garantizar que efectivamente se puede utilizar y cumpla con los criterios de la AFS correspondientes. La cantidad de arena necesaria es de 30 [kg], los porcentajes de resina y catalizador se muestran en la Tabla 2.12.

Tabla 2.12 Porcentaje de resina y catalizador para arena mixta colado de probetas en posición vertical.

Cantidad	Arena [kg]	Resina SHENGQUAN [kg]	Catalizador SHENGQUAN [kg]
		30	0.24
Receta FUNDIRECICLAR S.A.		0.8%	60%
Recomendación Fabricante		(0.7-1.5) % arena	(30-70) % resina

(Fuente: FUNDIRECICLAR S.A.)

2.2.4. Cálculo del sistema de alimentación

Para la obtención de piezas con una alta calidad mediante el proceso de fundición es necesario realizar un correcto diseño del sistema de alimentación, ya que es el encargado de suministrar el metal fundido a las cavidades del molde.

Un sistema de alimentación correctamente diseñado debe garantizar un óptimo llenado del molde, reducción de las turbulencias, eliminación de los gases y el aire atrapado, disminución de la rapidez del metal líquido, previene la solidificación prematura y desarrolla gradientes térmicos apropiados [39].

La pieza o moldura por fabricar tiene la siguiente geometría especificada en la Figura 2.4, teniendo en consideración un sobredimensionamiento necesario para garantizar las dimensiones finales en la etapa de mecanizado. En la tabla 2.13 se detalla los valores pertinentes a la pieza o moldura.

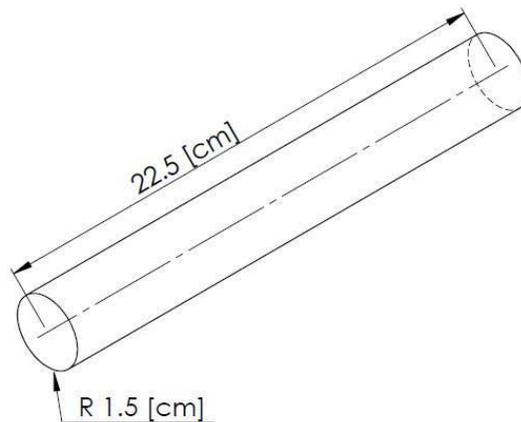


Figura 2.4 Pieza o moldura.
(Fuente: Propia)

Tabla 2.13 Especificación de la pieza o moldura a fabricar.

Dimensión	Valor
Longitud [mm]	225
Diámetro [mm]	15
Área [mm ²]	219.13
Volumen [cm ³]	159.043

(Fuente: Propia)

En la Figura 2.5 se observa la disposición del sistema de alimentación tanto para el colado con probetas en posición vertical como horizontal de las piezas o molduras con la finalidad de obtener el menor número de defectos en el proceso de fundición.



Figura 2.5 Moldes con sistema de alimentación para colado con probetas en posición vertical y horizontal.
(Fuente: Propia)

A continuación, se detallan los elementos tomados en cuenta para la realización y dimensionamiento de las diferentes partes que componen el sistema de alimentación. En el Anexo II presenta el cálculo del dimensionamiento del colado con probetas en posición horizontal y en el Anexo III colado con probetas en posición vertical.

2.2.4.1. Mazarota

La mazarota es el elemento del sistema de alimentación que debe solidificarse en último lugar, ya que es el encargado de abastecer con metal a la cavidad del modelo debido a la contracción que se produce en la etapa de solidificación y enfriamiento; el volumen de la mazarota debe ser suficiente para cumplir con su función; su ubicación dependerá del diseño del sistema y sus dimensiones se presentan en la Tabla 2.14.

Tabla 2.14 Dimensiones de la mazarota colado con probetas en posición horizontal y vertical.

Dimensiones	Colado con probetas en posición horizontal	Colado con probetas posición vertical
D_{maz} [mm]	26	43.5
V_{maz} [mm ³]	44850.1	129300

(Fuente: Propia)

2.2.4.2. Bebedero

Su función es canalizar el metal fundido hacia las cavidades internas del molde. Los factores que afectan la operación de vertido son los siguientes: temperatura a la que se vierte, velocidad de vertido, turbulencias y geometría del bebedero [10]. La Figura 2.6 muestra una hipérbola de cuarto grado, la forma ideal que debería tener el bebedero, pero

por cuestiones de fabricación, se reemplaza por un cono truncado. En la Tabla 2.15 se detallan las dimensiones.

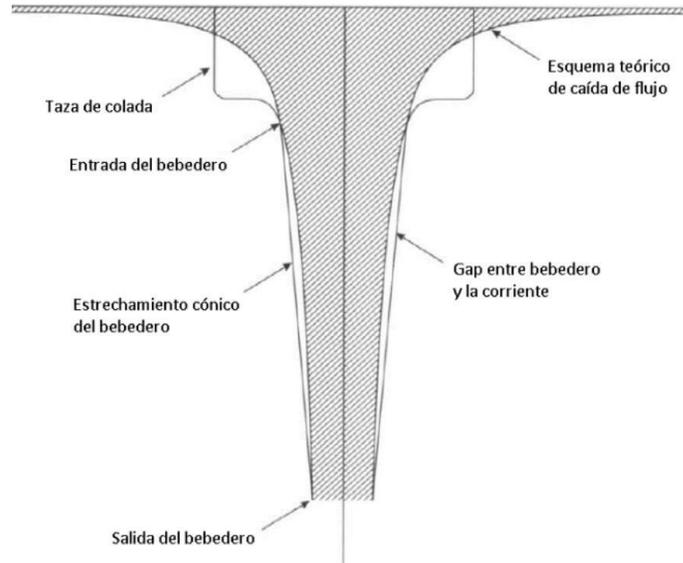


Figura 2.6 Forma ideal del bebedero.
(Fuente: [40])

Tabla 2.15 Dimensiones del bebedero colado con probetas en posición horizontal y vertical.

Dimensión	Colado con probetas en posición horizontal	Colado con probetas en posición vertical
D_{beb_i} [mm]	30	8
D_{beb_s} [mm]	44	14
h_{beb} [mm]	65	225

(Fuente: Propia)

2.2.4.3. Taza de colado

La taza de colado se localiza en la parte superior del bebedero, su función principal es estabilizar el flujo de entrada. Existen varias geometrías de diseño de la taza de colado, siendo un cono truncado la más utilizada, esta forma tiene poco control de la velocidad del fluido generando turbulencias, pero para piezas pequeñas se comporta de una manera tolerable [11]. En la Figura 2.7 se muestra el dimensionamiento de la taza de colada y en la Tabla 2.16 sus valores correspondientes.

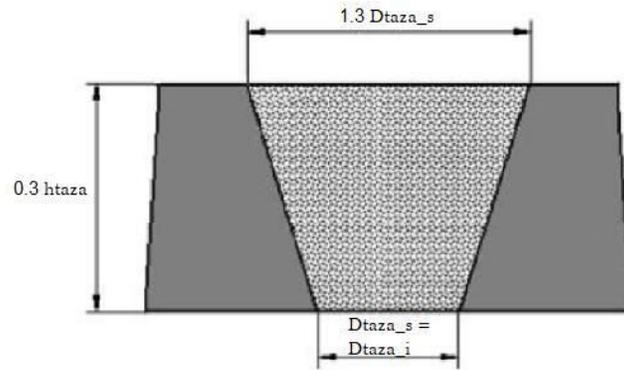


Figura 2.7 Dimensionamiento de la taza de colado.
(Fuente: [11])

Tabla 2.16 Dimensiones de la taza de colado con probetas en posición horizontal y vertical.

Dimensión	Colado con probetas en posición horizontal	Colado con probetas en posición vertical
D_{taza_i} [mm]	44	35
D_{taza_s} [mm]	110	45.5
h_{taza} [mm]	20	48.5

(Fuente: Propia)

2.2.4.4. Pozo de colado

El pozo de colado es la parte de interconexión entre el bebedero y el canal de colado. Este elemento debe asegurar una transición suave del flujo de metal fundido, además, es el encargado de retener la mayor cantidad de escoria existente en la colada.

Según García Chacón el diseño más usado por su efectividad y simpleza es un cilindro [11]. En la Figura 2.8, se establecen las relaciones que existen respecto al área inferior del bebedero. Las dimensiones se detallan en la Tabla 2.17

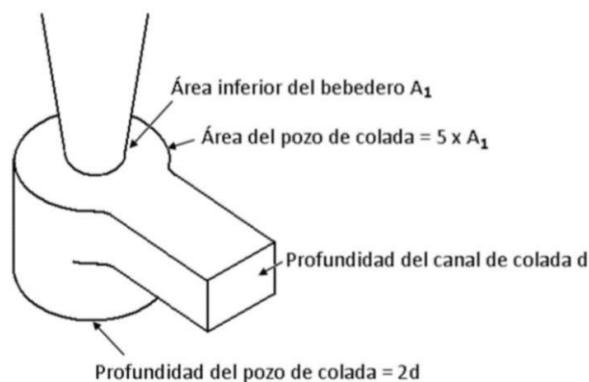


Figura 2.8 Dimensionamiento del pozo de colado.
(Fuente: [11])

Tabla 2.17 Dimensiones del pozo de colado con probetas en posición horizontal y vertical

Dimensión	Colado con probetas en posición horizontal	Colado con probetas en posición vertical
D_{pozo} [mm]	68	17.76
h_{pozo} [mm]	36	30

(Fuente: Propia)

2.2.4.5. Canales de colado y ataque

El canal de colado es el conducto que sirve de conexión entre el pozo de colado con el canal de ataque y su función es retener la escoria. El canal de ataque es el encargado de distribuir el metal fundido hasta la cavidad del molde como se visualiza en la Figura 2.9.

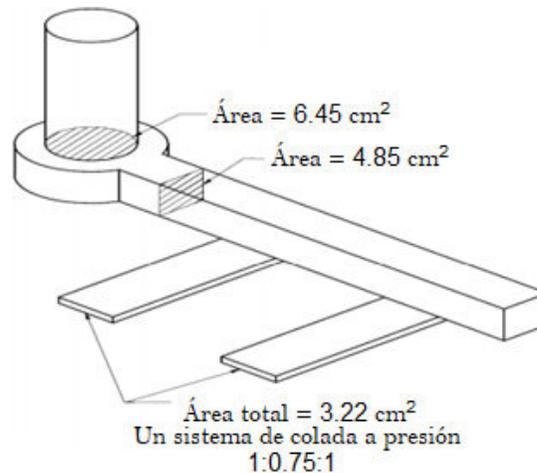


Figura 2.9 Relación de coladas en los canales de alimentación.
 (Fuente: [40])

La relación de colada seleccionada corresponde al bronce 1:1:1 mostrada en la Tabla 2.18 con el propósito de que el llenado sea suave y la distribución del metal líquido a cada una de las piezas o molduras se produzca al mismo tiempo para que no existan diferencias microestructurales durante la etapa de solidificación y enfriamiento.

Tabla 2.18 Relación de coladas más comunes.

Material	Relación
Acero	1:2:1,5
	1:3:3
	1:1:0,7
	1:2:2
	1:3:3

Fundición	1:4:4
Gris	1:1,3:1,1
Aluminio	1:2:4
	1:3:1
	1:3:3
Bronce	1:1:1
	1:1:3

(Fuente: [40])

Para el caso del sistema de alimentación por colado con probetas en posición horizontal, se consideró tener un diseño de sección curva semicilíndrica, cuyo diámetro se establece en la Tabla 2.19 para colado con probetas en posición horizontal y la Tabla 2.20 para colado con probetas en posición vertical.

Tabla 2.19 Dimensiones del alimentador colado con probetas en posición horizontal.

Dimensión	Alimentador
$D_{alimentador}$ [mm]	30

(Fuente: Propia)

Tabla 2.20 Dimensiones del alimentador colado con probetas en posición vertical.

Dimensión	Colada	Ataque
B_{mayor} [mm]	15	15
b_{menor} [mm]	8	8
$h_{canal\ colada}$ [mm]	15	15

(Fuente: Propia)

2.2.4.6. Tiempo de llenado

Se denomina al tiempo que se requiere para que el metal fundido colme todas las cavidades del molde (Tabla 2.21). Para que no se produzca juntas frías en el interior del molde este tiempo debe ser el menor posible.

Tabla 2.21 Tiempo de llenado.

Tipo de colado	Tiempo [s]
Colado con probetas en posición horizontal	7.63
Colado con probetas en posición vertical)	6.15

(Fuente: Propia)

2.2.4.7. Altura efectiva de colado del bebedero

La altura o salto efectivo es la distancia desde la superficie y la parte superior del canal de ataque. Esta separación varía dependiendo de la forma de llenado del molde, existen 3 tipos de llenado como se muestra en la Figura 2.10.

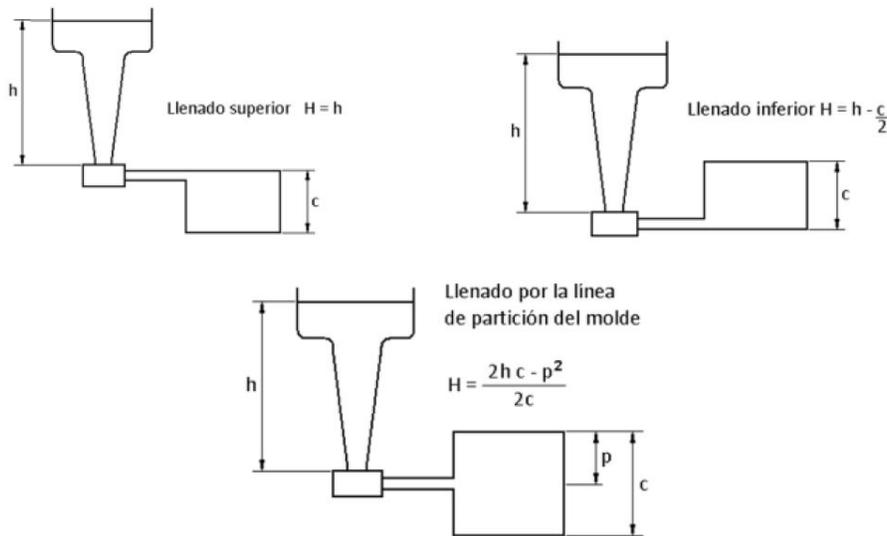


Figura 2.10. Esquema altura efectiva según la forma de llenado del molde. (Fuente: [11])

Tabla 2.22. Altura efectiva de colado del bebedero.

Tipo de llenado	Altura [cm]
Llenado por línea de partición del molde (colado con probetas en posición horizontal)	9.625
Llenado inferior del molde (colado con probetas en posición vertical)	16.15

(Fuente: Propia)

2.2.4.8. Velocidad de vertido

La velocidad de vertido que se muestra en la Tabla 2.23 es inversamente proporcional al tiempo de llenado, ya que, a una mayor velocidad de vertido el tiempo de llenado será menor. Esta velocidad debe ser constante para garantizar un buen llenado y por ende un resultado favorable en la pieza final.

Tabla 2.23. Velocidad de vertido.

Tipo de colado	Velocidad [m/s]
Colado con probetas en posición horizontal	1.3
Colado con probetas en posición vertical)	2.1

(Fuente: Propia)

2.2.5. Diseño del sistema de alimentación

Una vez obtenidos los valores correspondientes a cada uno de los elementos que constituyen el sistema de alimentación para las dos posiciones de colado como se visualiza

en la Figura 2.11 y 2.12, se procedió a realizar un esquema tridimensional, tomando en cuenta las siguientes variables.

- Volumen del sistema.
- Tamaño del sistema.
- Distribución del material.
- Posición del bebedero y taza de colado.
- Facilidad de fabricación.
- Tiempo de llenado.
- Sistema con mazarota individual, colectiva o sin mazarota.

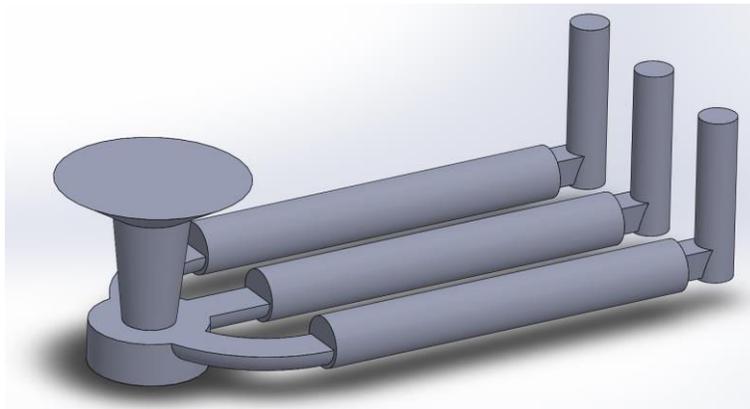


Figura 2.11. Diseño sistema de alimentación colado con probetas en posición horizontal.
(Fuente: Propia)

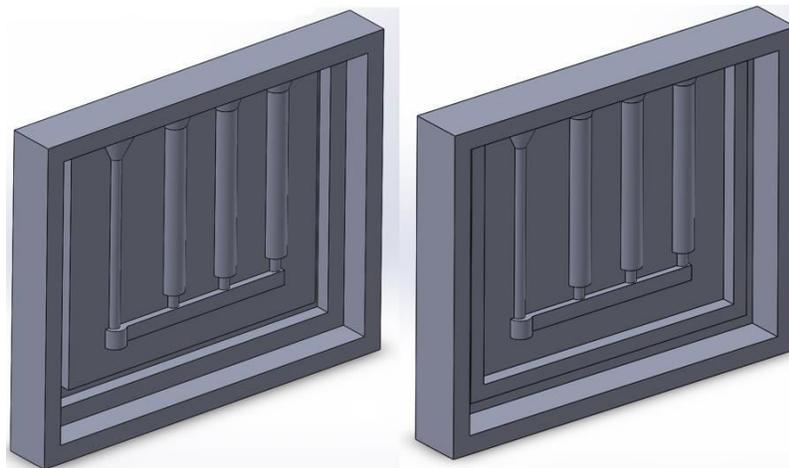


Figura 2.12. Diseño sistema de alimentación colado con probetas en posición vertical.
(Fuente: Propia)

2.2.6. Elaboración de las probetas

Para la producción de las probetas de los diferentes ensayos que se van a realizar a lo largo del estudio se procede a cortar el sistema de alimentación obteniendo unos cilindros como se observa en la Figura 2.13, estos cilindros presentan defectos superficiales como consecuencia del proceso de fundición, los cuales se deben rectificar para obtener una superficie lisa y homogénea.

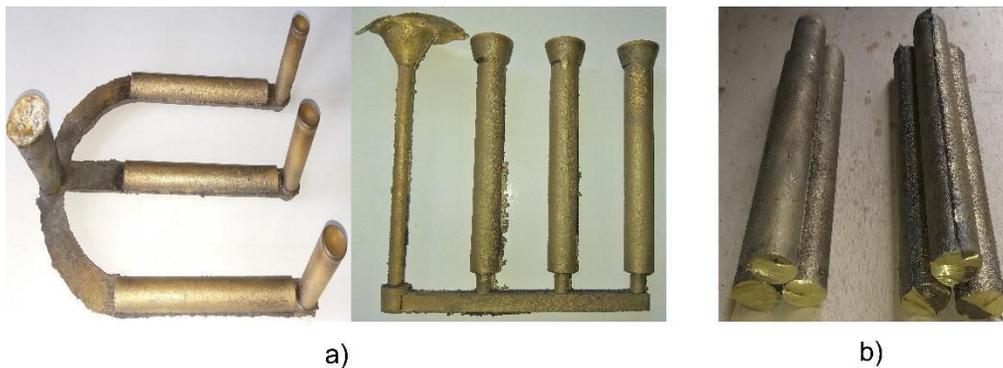


Figura 2.13. a) Probetas con sistema de alimentación, b) Probetas sin sistema de alimentación.
(Fuente: Propia)

Para eliminar los defectos superficiales y preparar los cilindros para el maquinado en el torno CNC se utilizó un torno manual como se visualiza en la Figura 2.14 y mediante las operaciones de refrentado, cilindrado y taladrado se obtuvo un diámetro de 25,4 [mm] y 225 [mm] de largo.



Figura 2.14. Rectificado de las probetas en torno manual.
(Fuente: Propia)

La obtención de las probetas para el ensayo de tracción se realizó en el torno CNC GT40a debido a su alta precisión, productividad y garantía de reproducción de operaciones. Las probetas fueron realizadas bajo la norma ASTM E8. El resultado final de la probeta tras el

maquinado se muestra en la Figura 2.15. La parte posterior del cilindro se destinó para las probetas de los ensayos de metalografía, dureza, rugosidad y composición química.

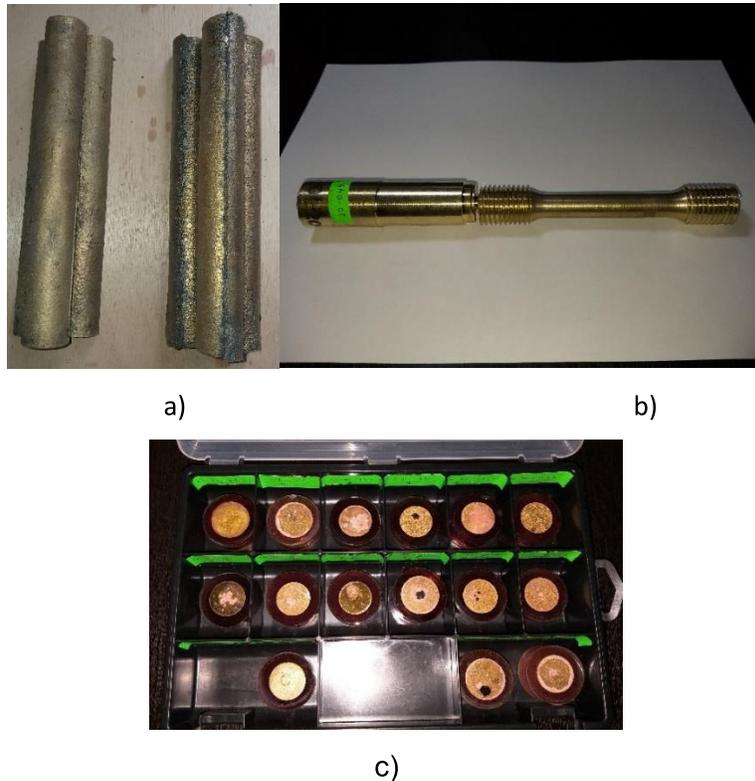


Figura 2.15. Acabado superficial a) Pieza sin mecanizar b) Pieza mecanizada c) Probetas para metalografía
(Fuente: Propia)

2.3. Ensayos de composición química

El ensayo de composición química se efectúa para garantizar que las probetas obtenidas tengan los mismos elementos químicos establecidos antes del proceso de fundición y no varíen las propiedades por diferente composición.

2.3.1. Equipos, disposición y herramientas para ensayo de composición química

- **Probeta para el ensayo de composición química:** La probeta utilizada en este ensayo se detalla en la Tabla 2.24. Se debe tomar en consideración que el diámetro mínimo es debido a que se preparó la superficie para el ensayo de rugosidad superficial.

Tabla 2.24 Probeta de ensayo de composición química.

Probeta	Designación	Dimensión [mm]
	A (longitud mínima)	25
	ø (diámetro mínimo)	22.4
	Nota: El desbaste es de 2.3 [mm] de la probeta fundida.	

(Fuente: Propia)

- **Equipo para el ensayo de composición química:** Las características del espectrómetro de chispa ubicado en el Laboratorio de Fundición se detallan en la Tabla 2.25.

Tabla 2.25 Características del espectrómetro de chispa.

	Descripción	Especificaciones
	Marca	BRUKER
	Modelo	Q2ION
	Peso	28 [kg]
	Voltaje	100/240 [V]
	Frecuencia	50/60 [Hz]

(Fuente: Propia)

2.3.2. Procedimiento de ensayo de composición química

Antes de realizar el ensayo de composición química se debe asegurar que las caras de las probetas estén completamente paralelas, para lo cual se realiza un desbaste grueso con el fin de evitar que el equipo arroje datos erróneos al momento de realizar el ensayo. Una vez asegurado estos parámetros se sigue los siguientes pasos:

- Colocar en la cámara de chispeo la muestra y accionar el botón de inicio.
- Obtener la composición elemental del material analizado después de 30 segundos.
- El procedimiento se debe realizar por 3 ocasiones y promediar dichas mediciones para obtener un resultado final.

2.4. Ensayos mecánicos

Los ensayos mecánicos permiten determinar el comportamiento del material al someterlos a esfuerzos mecánicos. Las propiedades mecánicas son esenciales para el diseño, debido a que el funcionamiento y rendimiento del producto dependerá de la capacidad para resistir la deformación ante los esfuerzos a que se somete durante el uso o aplicación.

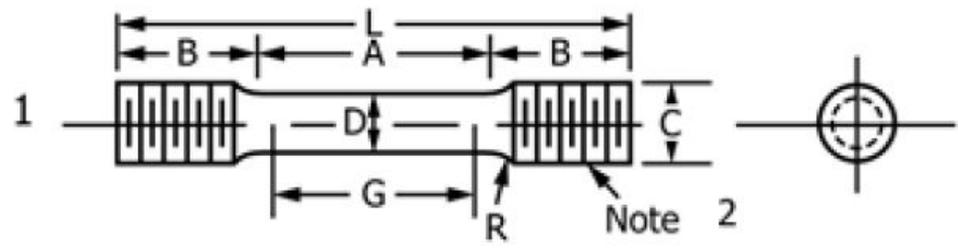
2.5. Ensayo de tracción

El ensayo de tracción se emplea para evaluar la resistencia de metales y aleaciones, permite determinar propiedades como son la ductilidad y la resistencia. La carga es aplicada de forma uniaxial a lo largo del eje de la probeta, se estira la muestra a una velocidad constante hasta el momento de la fractura [41].

2.5.1. Equipos, dispositivos y herramientas para ensayo de tracción

- **Probeta para ensayo de tracción:** Para el ensayo se va a aplicar la norma ASTM E8 (Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials), en la cual especifica las medidas de la probeta como se muestra en la Tabla 2.26.

Tabla 2.26 Descripción de la probeta de tracción.



Designación	Descripción	Muestra 1
G	Longitud de calibre	50 ± 0.1 mm
D	Diámetro	12.5 ± 0.2 mm
R	Radio de filete mínimo	10 mm
A	Longitud de la sección paralela reducida	56 mm
L	Longitud total (aproximada)	145 mm
B	Longitud de la sección final	35 mm
C	Diámetro de la sección final	20 mm

Nota 1: La sección paralela reducida puede tener una inclinación gradual desde los extremos hacia el centro con los extremos no más del 1% mayor en diámetro que el centro.

Nota 2: En las muestras 1 y 2, se permite cualquier rosca estándar que proporcione una alineación adecuada y ayude a garantizar que la muestra se rompa dentro de la sección paralela reducida.

(Fuente: [42])

- **Máquina universal para ensayo:** El equipo se encuentra ubicado en el laboratorio de Análisis de Esfuerzo y Vibraciones de la Escuela Politécnica, cuyas características se describen en la Tabla 2.27.
- **Equipos complementarios:** Entre los equipos necesarios para el ensayo de tracción incluyen:
 - Calibrador pie de rey.
 - Punzón (marcador de distancia).

Tabla 2.27 Características de la máquina universal para ensayo de tracción.

	Descripción	Especificaciones
	Fabricante	Tinius Olsen
	Origen de Fabricación	Estados Unidos
	Modelo	L – 120
Dimensiones:	Capacidad	3000 [kN]
<ul style="list-style-type: none"> • Altura: 1016 [mm] • Ancho: 915 [mm] • Profundidad: 788 [mm] 	Velocidad de ensayo	0 – 766 [mm/s]
	Almacenamiento	LAEV

(Fuente: Propia)

2.5.2. Procedimiento del ensayo de tracción

El procedimiento se realizará de acuerdo con las recomendaciones de la norma ASTM E8 (Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials) [42]:

- Preparación de la máquina de pruebas: al iniciar o después de un periodo prolongado de inactividad.
- Medición de dimensiones de muestra de prueba.
- Marcar la longitud de calibre con un punzón (estas deben estar estampado ligeramente)

- Puesta a cero de la máquina de prueba: configurar de tal manera que se elimine cualquier fuerza (precarga) impartida por el agarre de la probeta.
- Especificar la velocidad de la prueba: 2 [mm/s].
- Iniciar el ensayo.
- Recolectar los datos que se obtiene en el ensayo mediante el software del equipo.
- Desmontar la probeta y mediar la elongación (entre los puntos de referencia marcados) en la probeta con el calibrador pie de rey.
- Calcular el porcentaje de elongación en base a la norma ASTM E8 y tabular la información obtenida.

2.6. Ensayo de dureza

El ensayo de dureza mide la resistencia de un material a deformarse plásticamente, esta prueba se utiliza para inspección y control, la cual permitirá obtener un valor para comparar entre un material o tratamientos. El tratamiento térmico o el trabajo realizado a un material resulta generalmente en un cambio de dureza. Esta propiedad se mide forzando la indentación de un penetrador en la superficie del material sobre una plataforma rígida. De acuerdo con el sistema de prueba como se muestra en la Figura 2.16, la dureza se expresa por un número inversamente proporcional a la profundidad de la indentación para una carga. Los métodos más comunes son [43]:

- Ensayo de dureza Brinell.
- Ensayo de dureza Rockwell.
- Ensayo de dureza Vickers.

Ensayo	Penetrador	Forma del penetrador		Carga	Fórmula del número de dureza
		Vista lateral	Vista en planta		
Brinell	Esfera de 10 mm fabricada de acero o carburo de volframo			P	$BHN = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
Vickers	Pirámide de diamante			P	$VHN = \frac{1.72P}{d_1^2}$
Microdureza Knoop	Pirámide de diamante			P	$KHN = \frac{14.2P}{t^2}$
Rockwell					
A } C } D }	Cono de diamante			60 kg 150 kg 100 kg	$R_A =$ $R_C =$ $R_D =$ } 100-500f
B } F } G }	Esfera de acero de 1/16 pulgadas			100 kg 60 kg 150 kg	$R_B =$ $R_F =$ $R_G =$ } 130-500f
E	Esfera de acero de 1/8 pulgadas			100 kg	$R_E =$

Figura 2.16 Ensayo de dureza.
(Fuente: [43])

En el presente trabajo se utilizará el método de ensayo de dureza Rockwell, debido a la disponibilidad del equipo en el Laboratorio de Metalografía de la Facultad de Ingeniería Mecánica, el cual permite una lectura directa del índice de dureza.

2.6.1. Equipos, dispositivos y herramientas para ensayo de dureza

- **Probeta para el ensayo de dureza:** Para realizar este ensayo la probeta utilizada tiene las mismas características que la probeta del ensayo de composición química, la cual se describe en la Tabla 2.24.
- **Equipo para el ensayo de dureza:** Las características del durómetro que se encuentra en el Laboratorio de Metalografía se detallan en la Tabla 2.28.

Tabla 2.28 Características del durómetro.

	Descripción	Especificaciones
	Marca	HRADROCKER
	Modelo	150 – A
	Carga mínima	0 [kgf]
	Sistema de aplicación de carga	Hidráulica
	Lectura	Analógica
Capacidad de carga: <ul style="list-style-type: none"> • 60, 100,150 [kgf] 	Indentador empleado	Punta de acero 1/16 [pulg]

(Fuente: Propia)

- **Patrón de calibración,** patrón para latón 66 HRB, tiempo 12.92 [s]

2.6.2. Procedimiento del ensayo de dureza

El procedimiento se va a realizar de acuerdo con las recomendaciones de la norma ASTM E18 (Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials) [44]:

- Revisar que la temperatura este dentro de los límites de 10 a 35 [°C].
- Verificar que las dos superficies de la probeta estén completamente planas, paralelas y se hallen sin impurezas.
- Seleccionar la escala a emplear en el durómetro Rockwell B, girando la perilla lateral hacia la derecha.
- Colocar el indentador de acuerdo con la escala seleccionada.

- Calibrar el durómetro con la ayuda de los patrones de calibración.
- Situar la probeta sobre el soporte del durómetro.
- Prolongar el indentador en contacto con la superficie de prueba.
- Aplicar la fuerza de prueba preliminar F_0 de 10 [kgf] (98N).
- Al final del tiempo de permanencia de la fuerza preliminar t_{FP} , establecer la posición de referencia.
- Aumentar la fuerza por el valor de la prueba adicional F_1 necesaria para obtener la fuerza de prueba total F para la escala de dureza seleccionada.
- Mantener la fuerza total F durante el tiempo de permanencia de la fuerza específica t_{TF} .
- Retirar la fuerza de prueba adicional F_1 mientras mantiene la fuerza de prueba preliminar F_0 .
- Mantener la fuerza de prueba preliminar F_0 durante el tiempo apropiado para recuperación elástica del material de prueba.
- Al final del tiempo inmediatamente establecer la profundidad final.
- Calcular la diferencia entre la profundidad final y la línea base e indicar la dureza Rockwell.

2.7. Ensayo metalográfico

El ensayo metalográfico estudia microscópicamente las características estructurales de un material o una aleación. Determina el tamaño de grano, además del tamaño, formas y distribución de las fases. La microestructura informa de inclusiones que repercuten sobre las propiedades mecánicas, se puede observar bajo un conjunto de condiciones dadas tratamientos mecánicos, térmicos y predecir su comportamiento [45].

2.7.1. Equipos, dispositivos y herramientas para ensayo metalográfico

- **Probeta para ensayo metalográfico:** Para realizar este ensayo se utiliza la misma probeta con la que se realizó el ensayo de dureza, las características de la probeta se describen en la Tabla 2.24.
- **Equipo para ensayo metalográfico:** Para los ensayos microestructurales se tiene los instrumentos necesarios en el Laboratorio de Metalografía de la Facultad de Ingeniería Mecánica los cuales son:
 - Sierras.
 - Calibrador pie de rey.

- Máquina desbastadora de disco, sus características están descritas en la Tabla 2.29.
- Máquina para preparación y pulido de muestras METKON, sus características están descritas en la Tabla 2.30.
- Microscopio metalográfico, sus características están descritas en la Tabla 2.31.
- Otros elementos: Alcohol etílico de 99.8° de pureza (anhídrido), nital al 2%, lubricante de diamante en base de agua y suspensión de 6 y 1 micra.

Tabla 2.29 Características de la máquina desbastadora de disco.

	Descripción	Especificaciones
	Marca	BUEHKER
	Modelo	121-0M-84
	Voltaje	120 [V]
	Amperaje	6.2 [A]
	Potencia del motor	1 [HP]
Número de Abrasivo: 100 [<i>granos/pulg²</i>]	Medio de enfriamiento	Agua

(Fuente: Propia)

Tabla 2.30 Características de la máquina para preparación y pulido de muestras METKON.

	Descripción	Especificaciones
	Marca	METKON
	Modelo	FORCIPOL 2V
	Refrigeración	Agua
	Voltaje	220 [V]
	Abrasivo para pulido	Alúmina 0.3 micrón
Abrasivos para desbaste	Lijas (150,240,320,400,600,1200) [<i>granos/pulg²</i>]	

(Fuente: Propia)

Tabla 2.31 Características del microscopio metalográfico.

	Descripción	Especificaciones
	Marca	OLYMPUS
	Modelo	GX41F

	Tubos de observación	10x
	Voltaje	(100-120) V / (230-240) V
	Frecuencia	50/60 [Hz]
	Software	Stream Essentials
Objetivos: <ul style="list-style-type: none"> • 5x, 10x, 50x, 100x 	Cámara metalográfica	5 Mega Pixeles

2.7.2. Procedimiento del ensayo metalográfico

El ensayo metalográfico depende significativamente del cuidado que se tenga para preparar la muestra, una vez extraída la probeta con las dimensiones establecidas en la Tabla 2.24, se realizará las siguientes etapas de manera minuciosa [45]:

- **Montaje:** Las probetas debidamente identificadas se colocan en moldes circulares de 37 [mm] de diámetro con una solución de resina poliéster, octoato de cobalto y metil etil cetona, su tiempo de secado es de aproximadamente 90 [min], posteriormente se desmonta del molde circular.
- **Desbaste grueso:** En la desbastadora de disco se elimina el exceso de resina y se obtiene una superficie plana.
- **Desbaste fino:** En el equipo de preparación y pulido de muestras iniciar con el desbaste desde la lija número 150 hasta llegar a la lija 1200, la probeta se debe desbastar por ambas caras con el fin de obtener paralelismo y evitar que se produzca doble cara. El desbaste se realiza a una velocidad de 240 [rpm] y 15 [psi] de presión.
- **Pulido:** Con el fin de eliminar las marcas provocadas en el paso anterior se realiza un pulido con un paño en el mismo equipo, además se utiliza alúmina de 0.3 [micrones] a una velocidad de 160 [rpm] y 5 [psi] de presión.
- **Ataque químico:** Se aplica con el propósito de hacer visible las características estructurales del metal o la aleación. Para esto se utiliza el método de inmersión de la probeta con un tiempo aproximado de 7 segundos del reactivo, posteriormente

se lava con agua y el exceso se elimina con algodón para evitar el sobre ataque químico a la superficie.

- **Toma de fotografías:** Para obtener la metalografía de la probeta se utiliza el microscopio metalográfico descrito en la Tabla 2.23, se captura las imágenes de acuerdo con los objetivos con cada una de las probetas a analizar.

2.8. Ensayos de rugosidad superficial

Las marcas realizadas por la herramienta de corte sobre la superficie de la pieza dan como resultado cierta ondulación con irregularidades, al ampliar esta zona se pueden denotar partes altas que se denominan picos y partes bajas denominadas valles. Para poder examinar esta zona de superficie se utiliza el método de perfil. Este método de medición produce un gráfico o perfil bidimensional.

Para medir este perfil de rugosidad se utiliza un instrumento llamado rugosímetro cuyas características técnicas se visualizan en la Tabla 2.36. Este instrumento permite obtener el perfil de rugosidad y el valor de la rugosidad media R_a . La norma ASME B46.1-2009 define “ R_a ” como la media aritmética de los valores absolutos de las desviaciones del perfil de rugosidad dentro del tramo de medición, utiliza la siguiente expresión matemática [34].

$$R_a = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} |z(x)| dz$$

Donde:

R_a : rugosidad media aritmética (μm).

l_m : Tramo de medición.

$z(x)$: Altura del perfil evaluado en cualquier punto.

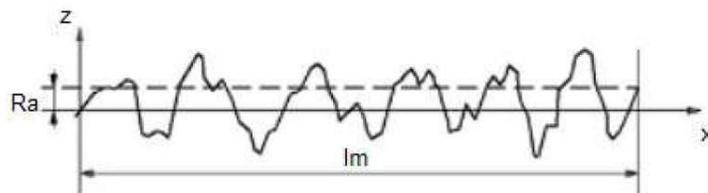


Figura 2.17 Representación del valor R_a .

Fuente: [33]

2.8.1. Herramientas de corte

Para el ensayo de rugosidad superficial se ha planteado utilizar un inserto de metal duro con recubrimiento. La plaquita seleccionada es DNMG 150608 PM 4425 como se visualiza en la Figura 2.18, la explicación a detalle se puede visualizar en el Anexo IV. Esta herramienta tiene un recubrimiento CVD (Chemical Vapor Deposition) compuesto por $Ti(C,N) + Al_2O_3 + TiN$, proporcionando una mayor resistencia al desgaste, además, es comúnmente utilizados para operaciones de desbaste medio y acabado. La selección del portaherramientas es PDJNR 2525-15C la cual está en función del inserto, esta brindará el soporte necesario durante el mecanizado [46].



Figura 2.18 Inserto DNMG 15 06 08.
(Fuente: [46])

La plaquita seleccionada conjuntamente con el portaherramientas forma ángulos como se visualiza en la Tabla 2.32. Además, se puede observar en la Figura 2.19 la disposición de cada uno de estos ángulos con respecto al portaherramientas. Se utilizaron 3 insertos, cada punta del inserto para cada probeta con la misma disposición.

Tabla 2.32 Ángulo del inserto DNMG 150608 PM 4425.

Ángulo del inserto DNMG 150608 PM 4425			
Punta	Posición	Desprendimiento	Incidencia
E_r	KAPR (k_r)	γ	α
55	93	-6	0

(Fuente: [46])

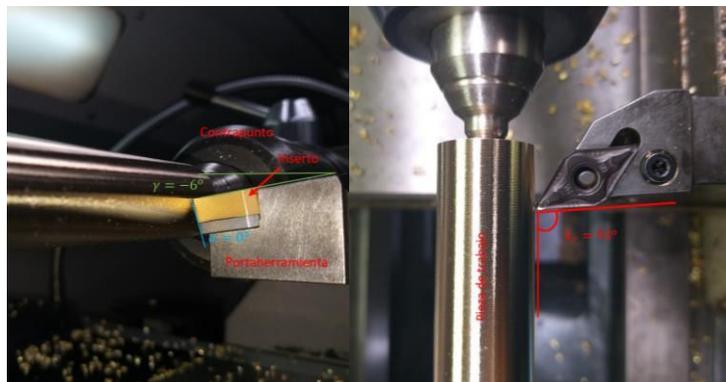


Figura 2.19 Disposición de los ángulos de corte del inserto con respecto al portaherramientas.
(Fuente: Propia)

2.8.2. Selección de parámetros de corte

Para la selección de los parámetros de corte se tomó como referencia estudios previos y las recomendaciones del fabricante del inserto. El avance (f_n), la profundidad de corte (a_p) y el radio del inserto (RE) son parámetros que considerar para evitar condiciones críticas como vibraciones que puedan alterar los resultados en el ensayo. En la Tabla 2.33 se visualiza los diferentes parámetros de corte.

Tabla 2.33 Parámetros de corte.

	INSERTO: DNMG 150608 PM 4425	Sandvik (Bronce y cobre sin plomo)	Bronce SAE 40	Bronce
Profundidad de corte (a_p), [mm]	3		0.3	3
Avance (f_n), [mm/rev]	0.3	0.15 – 0.8	0.3	0.3 – 0.6
Velocidad de corte (V_c), [m/min]	185	300	190.34	400 - 500

(Fuente: [46]–[49])

Finalmente, los parámetros establecidos para realizar el ensayo se tendrán en consideración el RE = 0.794 [mm], este radio permite acabados medios y altos. Para la utilización del torno CNC de la Escuela Politécnica Nacional se debe considerar que la velocidad del husillo no debe superar las 2500 [rpm], por lo que los parámetros seleccionados se describen en la Tabla 2.34.

Tabla 2.34 Parámetros de corte seleccionados.

	INSERTO: DNMG 150608 PM 4425
Profundidad de corte (a_p), [mm]	3
Avance (f_n), [mm/rev]	0.3
Velocidad de corte (V_c), [m/min]	190.34

(Fuente: Propia)

2.8.3. Equipos, dispositivos y herramientas para ensayo de rugosidad superficial

2.8.3.1. Equipos empleados

- **Probeta para el ensayo de rugosidad superficial:** Para realizar este ensayo la probeta tiene las mismas características que se visualizan en la Tabla 2.24. Esta probeta se trató minuciosamente debido a que sus superficies no deben tener deterioro luego de realizado en ensayo.
- **Equipo para ensayo de rugosidad superficial:** Los tres equipos empleados para medir la rugosidad superficial y el desgaste del inserto fueron:

Torno CNC GT40a

El mecanizado de las probetas se realizó en el Torno CNC de la Escuela Politécnica Nacional cuyas características se detallan en la Tabla 2.35. Para obtener la probeta de rugosidad superficial con la herramienta de corte y los parámetros de corte seleccionados se partió de una barra de 25,4 [mm] de diámetro y una longitud de 225 [mm]. La norma ASTM E618 indica que se podrá maquinar a partir de 25,4 [mm] de diámetro de barras, además, recomienda que la relación entre la longitud/diámetro sea menor que 10 [50].

Tabla 2.35 Características técnicas del torno CNC GT40a.

	Descripción	Especificaciones
	Modelo	GT40a
	Distancia entre centros	1000 mm
	Máximo recorrido en ejes	X=220 mm / Z=1000 mm
	Potencia motor principal	7.5 kw
	Control numérico	GSK 980TDa
Dimensiones generales [mm]: <ul style="list-style-type: none"> • 2262, 1420, 1845 	Variador de velocidad	150 a 2400 rpm

(Fuente: Propia)

Rugosímetro

Tabla 2.36 Características técnicas del rugosímetro.

	Descripción	Especificaciones
	Marca	MITUTOYO
	Modelo	SJ-210
	Precisión de medición	0.75 mN según DIN/ISO
	Velocidad de retroceso	1.00 [mm/s]
	Velocidad de medición	0.25; 0.50; 0.75 [mm/s]
Palpador:	Rango de medición	Eje z: 17.5 mm

<ul style="list-style-type: none"> • Diamante • Radio: 2 μm • Angulo de punta: 60° 		Eje x: 5.6 mm
---	--	---------------

(Fuente: Propia)

Microscopio óptico

Para medir el desgaste de las diferentes zonas de la plaquita DNMG 150608 PM 4425 se utilizó el microscopio OLYMPUS SZX7, sus características se describen en la Tabla 2.37.

Tabla 2.37 Características técnicas del microscopio óptico.

	Descripción	Especificaciones
	Marca	OLYMPUS
	Modelo	SZX7
	Peso	4.5 [kg]
	Zoom	7(0.8x-5.6x)
	Ajustador de punto de vista extensible	SZX2-EEPA
Lentes objetivos: <ul style="list-style-type: none"> • 0.5x, 0.75x, 1x, 1.25x, 1.5x, 2x 	Dimensiones: <ul style="list-style-type: none"> • 134*253*403 [mm] 	

2.8.4. Procedimiento del ensayo de rugosidad superficial

Para el ensayo de rugosidad superficial se debe tener mucho cuidado con los lados y las superficies de la probeta. Con el fin de no alterar el área donde se realizará el ensayo, con estas consideraciones se sigue los siguientes pasos:

- Limpiar las probetas con agua, jabón neutro y alcohol.
- Marcar las probetas según la codificación antes seleccionada.
- Preparar el rugosímetro con la respectiva sonda y el cabezal para superficies planas.
- Verificar los parámetros de medición del rugosímetro: calibración con el patrón.
- Ubicar las probetas en el porta muestras del rugosímetro.
- Realizar las mediciones en las zonas marcadas y registrar los valores en el software SJ-Communication-Tool propio del rugosímetro.

2.8.5. Procedimiento de medición del desgaste del inserto

Antes de realizar las respectivas mediciones se definen las zonas a medir en el inserto, las cuales se pueden visualizar en la Figura 2.20. Debido al desgaste progresivo se manifiesta principalmente dos zonas: Desgaste del flanco y desgaste en cráter [51].

- Desgaste del flanco: Es el resultado del rozamiento entre la superficie recién creada en el trabajo y la cara del flanco adyacente al borde de corte. La medición se realiza del ancho de la banda de desgaste del flanco.
- Desgaste de cráter: Es el resultado de la acción de la viruta que se desliza contra la superficie. Se mide su profundidad o su área.

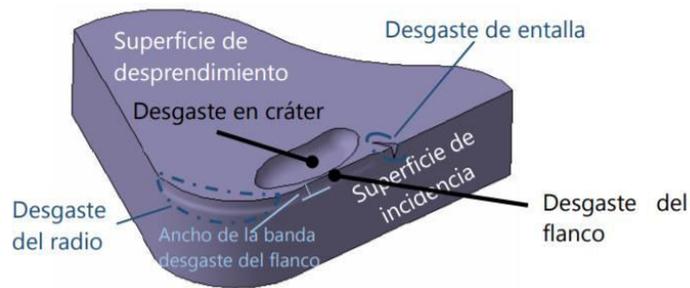


Figura 2.20 Zonas de desgaste de herramientas de corte.

(Fuente: [51])

A continuación, se describirá el procedimiento utilizado en la medición del desgaste de la plaquita DNMG 150608 PM 4425 de acuerdo con los parámetros de corte seleccionados y tomando a consideración que el desgaste es de una sola pasada por composición química asignada:

- Identificar el filo de corte de la plaquita DNMG 150608 PM 4425 para cada composición química, cada filo es para una pasada con los parámetros de corte establecidos.
- Ajustar la iluminación, distancia y enfoque del microscopio OLYMPUS para realizar la captura de la imagen y su medición.
- Se monta la plaquita DNMG 150608 PM 4425 ubicando la zona del desgaste del flanco a ser medido, se procede con la toma de imágenes con su respectiva medición.
- Se monta la plaquita DNMG 150608 PM 4425 ubicando la zona del desgaste en cráter a ser medido, se procede con la toma de imágenes con su respectiva medición.
- Se realiza este procedimiento con cada filo de los insertos con el mismo ajuste de la iluminación, distancia y enfoque del microscopio OLYMPUS.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados

En este capítulo se presentarán a detalle los resultados en el proceso de colado, inspección visual y los ensayos realizados como: composición química, tracción, dureza, análisis metalográfico, rugosidad superficial, desgaste del inserto y la forma de la viruta efectuados al material de referencia “C38500” y a las diferentes composiciones.

3.1.1. Proceso de colado

El material fundido en el horno a diésel fijo de crisol móvil llegó a una temperatura aproximadamente de 1180 [°C], la colada en el crisol una vez extraída del horno tenía una temperatura de 1105 [°C], el colado con probetas en posición horizontal se realizó a 1035 [°C] y el colado con probetas en posición vertical a 970 [°C] como se puede visualizar en la Figura 3.1.

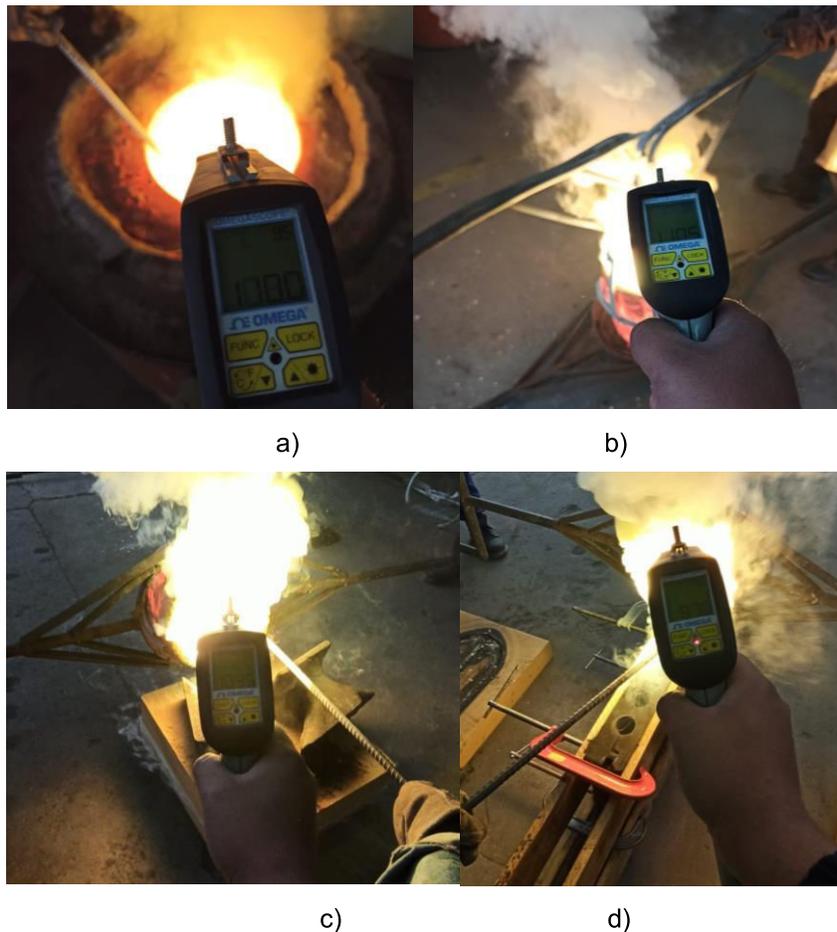


Figura 3.1 Temperatura a) Colada en el interior del horno. b) Colada en el crisol. c) Colado con probetas en posición horizontal. b) Colado con probetas en posición vertical. (Fuente: Propia)

3.1.2. Inspección visual de las probetas

Durante el proceso de solidificación de las probetas en posición horizontal 20-045-A3 (Figura 3.2) se presentan rechupes en el canal de alimentación y las mazarotas. Además, se evidencia pequeños rechupes en el cambio de sección del inicio de la probeta. En general en todas las composiciones realizadas en el colado con probetas en posición horizontal presentan dichas características mencionadas.



Figura 3.2 Probetas de colado con probetas en posición horizontal.
(Fuente: Propia)

En la solidificación de las probetas coladas en posición vertical 20-045-A3 (Figura 3.3) se presentó el rechupe en el canal de alimentación y en el cono de salida destinado para dicho propósito, además se tiene rechupe en la zona inferior del canal de ataque. En general en todas las composiciones realizadas en el colado con probetas en posición vertical presentan el rechupe en la misma zona o en el cambio de sección al ingreso de las probetas.



Figura 3.3 Probetas de colado con probetas en posición horizontal
(Fuente: Propia)

3.1.3. Composición química

A continuación, se muestran los resultados obtenidos del ensayo de composición química con los elementos más relevantes de cada uno de los porcentajes establecidos. En la Tabla 3.1, se detallan los valores obtenidos de las probetas con adición de silicio y en la Tabla 3.2, los valores de las probetas con adición de ferro silicio. En el Anexo V se presenta el informe completo del ensayo de composición química realizado en el Laboratorio de Fundición de la Escuela politécnica Nacional.

Tabla 3.1 Composición química experimental vs teórico con adición de silicio.

PROBETAS	ELEMENTOS									
	% Experimentales					$\Delta\%$ vs Composición Teórica				
	Cu [%]	Zn [%]	Si [%]	Fe [%]	Pb [%]	Cu [%]	Zn [%]	Si [%]	Fe [%]	Pb [%]
20-045-C1	56.56	43.89	0.003	0.065	2.406	2.44	5.89	0.003	0.065	0.594
20-045-A1-V	59.73	39.63	0.457	0.167	0.003	0.73	0.87	0.043	0.167	0.003
20-045-A1-H	59.97	39.41	0.436	0.169	0.003	0.97	1.09	0.064	0.169	0.003
20-045-A2-V	58.07	40.08	0.968	0.514	0.005	0.93	0.08	0.032	0.514	0.005
20-045-A2-H	58.09	40.11	0.926	0.517	0.0059	0.91	0.11	0.074	0.517	0.006
20-045-A3-V	58.35	40.00	1.578	0.050	0.003	0.65	0.5	0.078	0.05	0.003
20-045-A3-H	58.12	40.32	1.485	0.051	0.003	0.88	0.82	0.015	0.051	0.003
20-045-A4-V	59.31	38.78	1.881	0.035	0.003	0.31	0.22	0.119	0.035	0.003
20-045-A4-H	59.15	38.91	1.904	0.034	0.003	0.15	0.09	0.096	0.034	0.003

(Fuente: Propia)

Tabla 3.2. Composición química experimental vs teórico con adición de ferro-silicio.

PROBETAS	ELEMENTOS									
	% Experimentales					$\Delta\%$ vs Composición Teórica				
	Cu [%]	Zn [%]	Si [%]	Fe [%]	Pb [%]	Cu [%]	Zn [%]	Si [%]	Fe [%]	Pb [%]
20-045-C1	56.56	43.89	0.003	0.065	2.406	2.44	5.89	0.003	0.065	0.594
20-045-B1-V	58.34	41.01	0.445	0.196	0.003	0.66	0.68	0.055	0.0325	0.003
20-045-B1-H	58.25	41.13	0.424	0.194	0.003	0.75	0.8	0.076	0.1765	0.003
20-045-B2-V	58.62	39.73	0.958	0.338	0.009	0.38	0.06	0.042	0.016	0.009
20-045-B2-H	58.13	40.22	0.958	0.339	0.007	0.87	0.55	0.042	0.555	0.007
20-045-B3-H	59.10	38.59	1.420	0.878	0.004	0.1	0.41	0.08	0.1165	0.004
20-045-B3-V	59.23	38.56	1.600	0.601	0.004	0.23	0.44	0.1	0.5395	0.004
20-045-B4-H	57.40	39.62	1.889	1.024	0.003	1.6	1.28	0.111	0.201	0.003
20-045-B4-V	57.42	39.81	1.863	0.847	0.005	1.58	1.47	0.137	0.646	0.005

(Fuente: Propia)

3.1.4. Ensayo de tracción

En la tabla del Anexo VI se muestran los resultados de resistencia máxima a la tracción y el porcentaje de elongación en 50 mm obtenidos tras realizar el ensayo de tracción de todas las probetas, de las cuales solo se seleccionaron las que obtuvieron los mejores resultados para posteriores ensayos mecánicos (Anexo VII).

En la Figura 3.4 se muestra un resumen de la resistencia a la tracción y el porcentaje de elongación del material en forma de histogramas de las probetas seleccionadas dependiendo del método de colado que se utilizó y de manera horizontal se encuentran detallados los valores referenciales del material C38500 obtenidos de manera experimental y los valores teóricos en base a la norma ASTM B455.

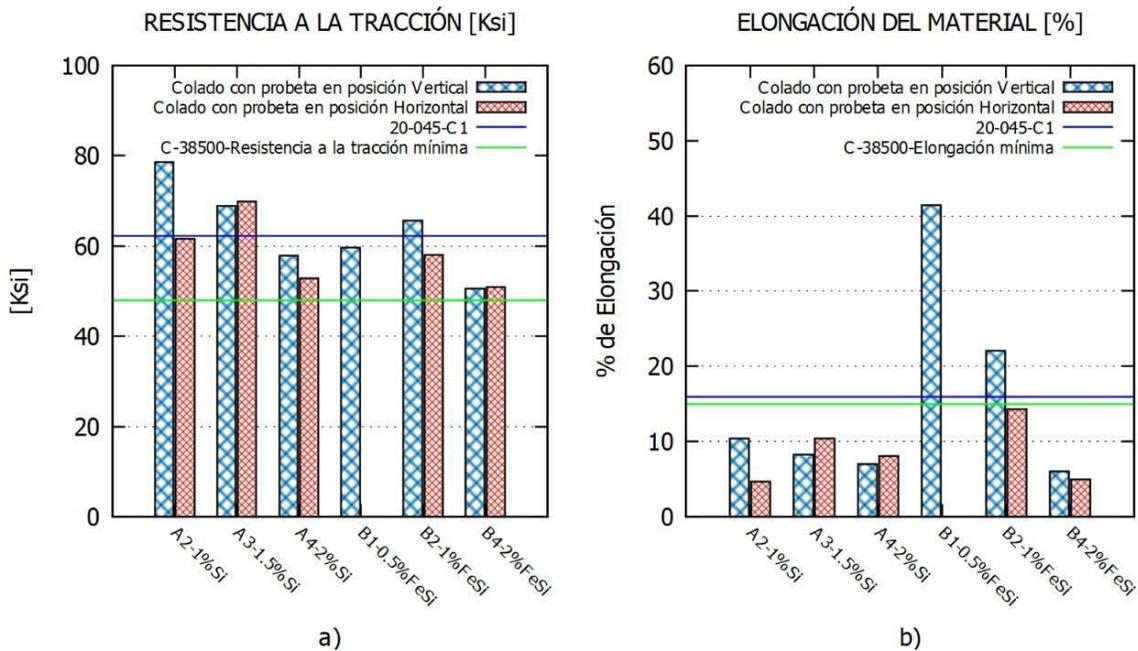


Figura 3.4. a) Resistencia a la tracción, b) Porcentaje de elongación.
(Fuente: Propia)

La Figura 3.5 presenta las curvas esfuerzo – deformación de las probetas seleccionadas anteriormente teniendo en cuenta el tipo de elemento que se adicionó a la aleación Cu – Zn. Según D. Askeland en materiales frágiles el esfuerzo de cedencia, la resistencia a la tracción y la resistencia a la ruptura tienen el mismo valor (20-045-A2-21, 20-045-A4-12, 20-045-A4-21, 20-045-B4-12, 20-045-B4-21), en cambio en materiales con ductilidad media la falla se produce en el valor de la carga máxima donde la resistencia a la tracción y la resistencia a la ruptura son las mismas (20-045-C1, 20-045-A2-13, 20-045-A3-11, 20-045-A3-21, 20-045-B2-23) y en materiales con ductilidad elevada la falla ocurre a un esfuerzo menor después de que el encuellamiento ha reducido el área de la sección transversal que soporta la carga (20-045-B1-11, 20-045-B2-11) [52].

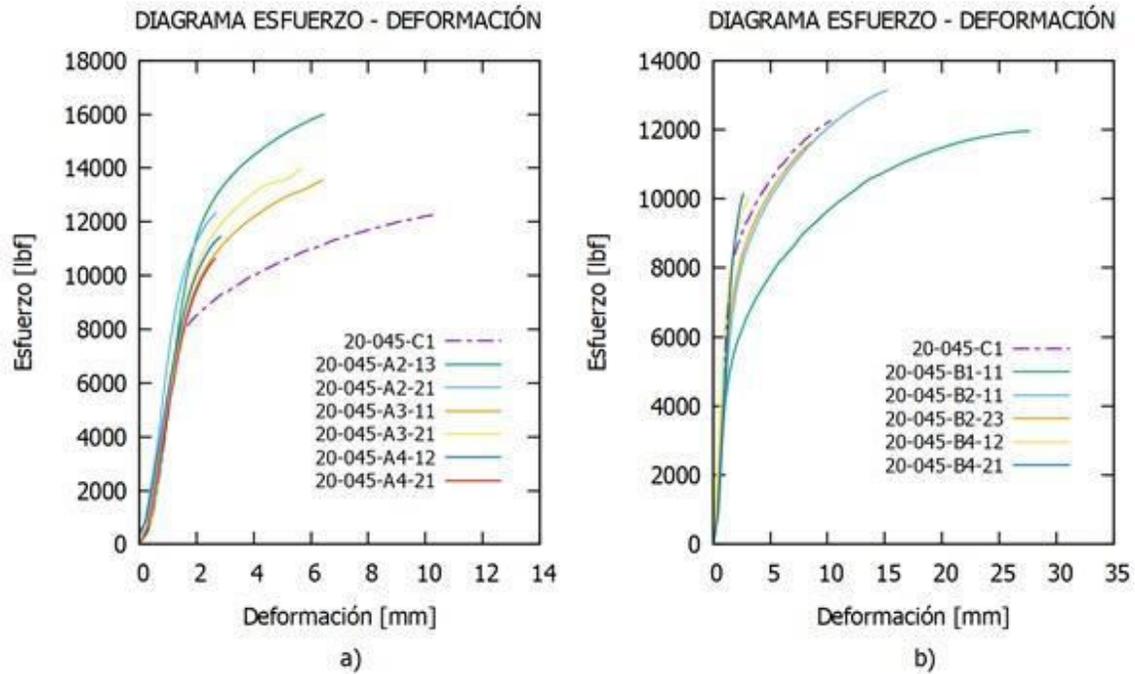


Figura 3.5. a) Diagrama esfuerzo-deformación probetas con adición de silicio, b) Diagrama esfuerzo-deformación probetas con adición de ferro silicio.
(Fuente: Propia)

3.1.5. Ensayo de dureza

Los valores obtenidos del ensayo de dureza se detallan en la Tabla del Anexo VIII. En la Figura 3.6 se muestra un resumen de la dureza de los materiales en forma de histograma de las probetas seleccionadas dependiendo del método de colado que se utilizó y de manera horizontal se encuentran detallados los valores referenciales del material C38500 obtenidos de manera experimental y los valores teóricos en base a la norma ASTM B455.

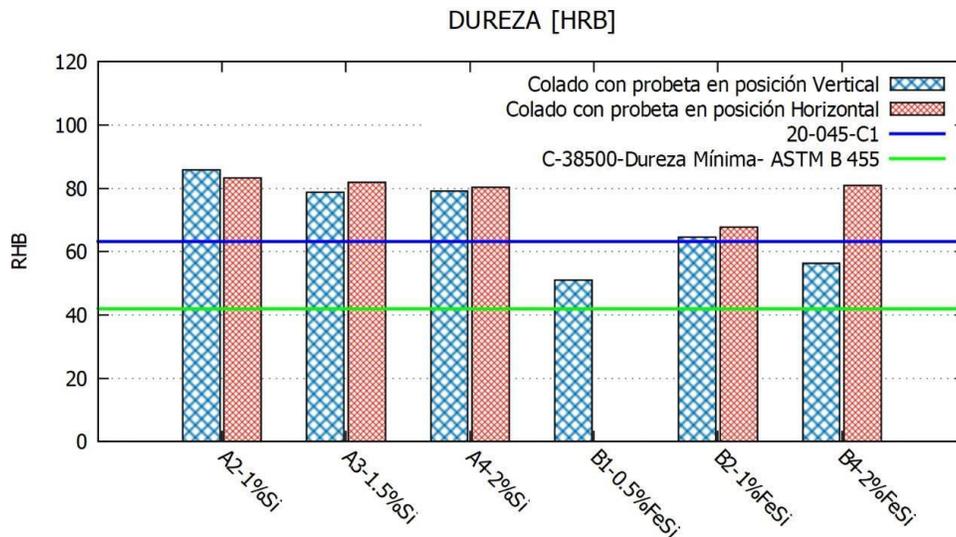


Figura 3.6. Dureza de las probetas con mejores resultados.
(Fuente: Propia)

La relación que existe entre la dureza y la resistencia a la tracción es directamente proporcional como se observa en la Figura 3.7.

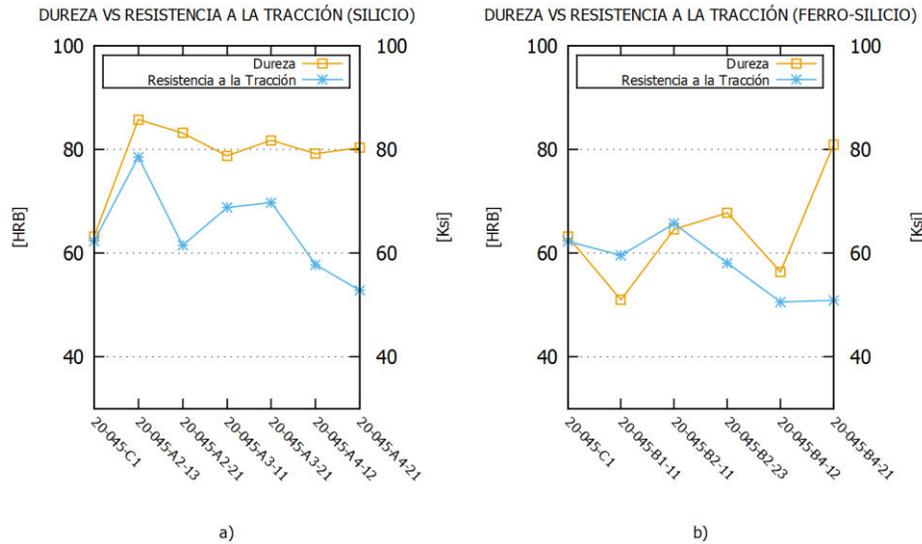


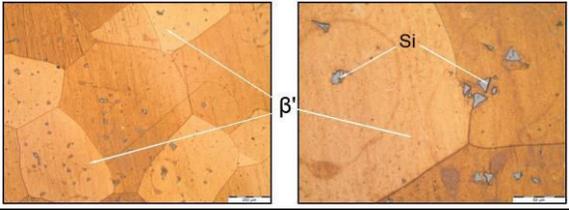
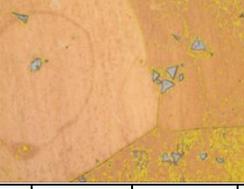
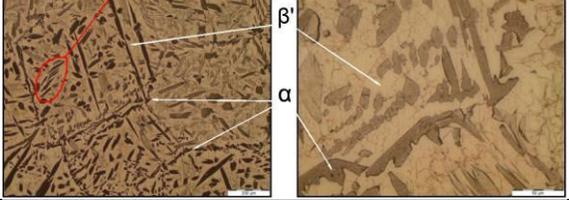
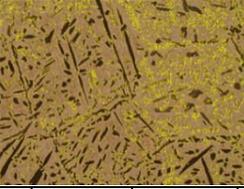
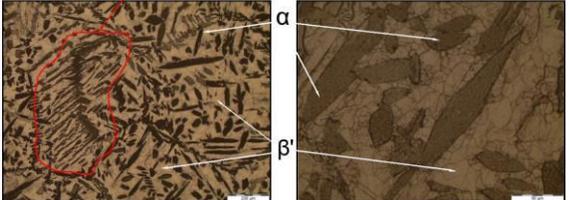
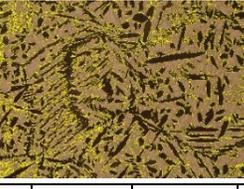
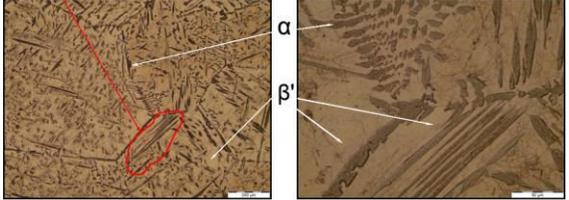
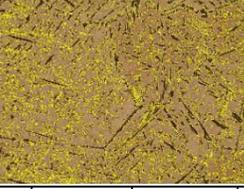
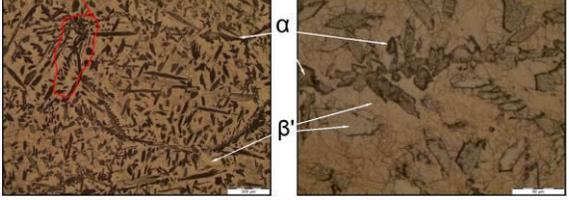
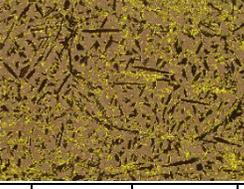
Figura 3.7. Dureza vs resistencia a la tracción a) adición de silicio, b) adición de ferro-silicio. (Fuente: Propia)

3.1.6. Ensayo de metalografía

En las Tablas 3.3 y 3.4 se muestran las interpretaciones de las microfotografías y la cuantificación de los porcentajes de la fase β' y de la fase α con un acercamiento de 100X y 500X de las aleaciones con adición de silicio y ferro-silicio respectivamente. En el Anexo IX se detallan las microestructuras Cu-Zn referenciales utilizadas para la identificación de las diferentes fases.

Tabla 3.3 Microestructura de las probetas con adición de silicio.

CÓDIGO	MICROESTRUCTURA A (100X), (500X)	FASES (β' + α)		
20-045-C1 (Material de referencia)	<p>Estructura Widmanstätten</p>			
	<p>Microestructura de una aleación de Cu-(2.5 -3%) Pb, que muestra la configuración de las partículas de plomo típica de las aleaciones a base de cobre con plomo. El plomo aparece como pequeñas esferas. Se observa la fase α de color claro dentro de una matriz de fase β de color más oscuro.</p>	Fase β' :	44.29%	Fase α :
20-045-A2-13				
	<p>Microestructura monofásica β'. El silicio primario se muestra en forma de poliedros irregulares y de color gris azulado. Se observan ángulos de 120° en la convergencia de tres granos debido a que se intenta alcanzar el equilibrio de las tensiones superficiales.</p>	Fase β' :	98.12%	Fase α :

20-045-A2-21		 <table border="1" data-bbox="987 415 1380 445"> <tr> <td>Fase β':</td> <td>98.44%</td> <td>Fase α:</td> <td>1.66%</td> </tr> </table> <p data-bbox="360 445 1377 489">Microestructura monofásica β', cuya coloración varía debido a la velocidad de enfriamiento. Se observa silicio primario de color gris azulado y con forma de poliedros irregulares.</p>	Fase β' :	98.44%	Fase α :	1.66%
Fase β' :	98.44%	Fase α :	1.66%			
20-045-A3-11	<p data-bbox="381 499 560 535">Estructura Widmanstätten</p> 	 <table border="1" data-bbox="987 688 1380 718"> <tr> <td>Fase β':</td> <td>71.45%</td> <td>Fase α:</td> <td>28.5%</td> </tr> </table> <p data-bbox="360 735 1377 808">Microestructura con matriz de fase β' (color claro) y la fase α (color más oscuro) se forma en los límites de los granos, debido a que esta fase nuclea en zonas de alta energía formando una estructura tipo Widmanstätten, en donde los cristales de la fase α se ordenan equidistantemente en forma de agujas.</p>	Fase β' :	71.45%	Fase α :	28.5%
Fase β' :	71.45%	Fase α :	28.5%			
20-045-A3-21	<p data-bbox="381 814 560 850">Estructura Widmanstätten</p> 	 <table border="1" data-bbox="987 1010 1380 1039"> <tr> <td>Fase β':</td> <td>54.95%</td> <td>Fase α:</td> <td>45.0%</td> </tr> </table> <p data-bbox="360 1056 1377 1102">Microestructura con matriz de fase β (color claro) y la estructura tipo Widmanstätten de la fase α (color más oscuro) se observa en los bordes de grano y su morfología es tipo aguja gruesa.</p>	Fase β' :	54.95%	Fase α :	45.0%
Fase β' :	54.95%	Fase α :	45.0%			
20-045-A4-12	<p data-bbox="381 1108 560 1144">Estructura Widmanstätten</p> 	 <table border="1" data-bbox="987 1304 1380 1333"> <tr> <td>Fase β':</td> <td>75.46%</td> <td>Fase α:</td> <td>24.5%</td> </tr> </table> <p data-bbox="360 1350 1377 1396">Microestructura con predominio de la fase β' (color claro) y la fase α (color oscuro) presenta la estructura tipo Widmanstätten; morfología de tipo agujas finas.</p>	Fase β' :	75.46%	Fase α :	24.5%
Fase β' :	75.46%	Fase α :	24.5%			
20-045-A4-21	<p data-bbox="381 1402 560 1438">Estructura Widmanstätten</p> 	 <table border="1" data-bbox="987 1598 1380 1627"> <tr> <td>Fase β':</td> <td>60.77%</td> <td>Fase α:</td> <td>39.2%</td> </tr> </table> <p data-bbox="360 1644 1377 1688">Microestructura con matriz de fase β (color claro) y la fase α (color más oscuro) morfología de tipo agujas gruesas forman la estructura tipo Widmanstätten, iniciando su origen en los límites de los granos.</p>	Fase β' :	60.77%	Fase α :	39.2%
Fase β' :	60.77%	Fase α :	39.2%			

(Fuente: Propia)

Tabla 3.4. Microestructura de las probetas con adición de ferro silicio.

CÓDIGO	MICROESTRUCTURA A (100X), (500X)	FASES ($\beta + \alpha$)		
20-045-B1-11				
	<p>Microestructura bifásica ($\beta' + \alpha$) la fase α presenta una coloración más oscura en forma de agujas y la fase β una coloración más clara. Se observa silicio primario de color gris azulado y con forma de poliedros irregulares de un menor tamaño en comparación a las otras microestructuras.</p>	Fase β' :	40.40%	Fase α :
20-045-B2-11				
	<p>Microestructura con matriz de fase β' (color claro) y la fase α (color más oscuro) se origina en los límites de grano en forma de agujas. Se observa silicio primario de color gris azulado y con forma de poliedros irregulares. El hierro se presenta en forma esferoidal de manera dispersa y con una tonalidad oscura.</p>	Fase β' :	37.60%	Fase α :
20-045-B2-23				
	<p>Microestructura con matriz de fase β (color claro) y la fase α (color más oscuro). La fase α presenta una morfología tipo agujas formando la estructura Widmanstätten. Se observa silicio primario de color gris azulado y con forma de poliedros irregulares.</p>	Fase β' :	50.48%	Fase α :
20-045-B4-12				
	<p>Microestructura bifásica ($\beta' + \alpha$) la fase α presenta una coloración más oscura en forma de agujas y la fase β una coloración más clara. Se observa silicio primario de color gris azulado y con forma de poliedros irregulares de mayor tamaño en comparación a las otras microestructuras. El hierro se presenta en forma esferoidal de manera dispersa y con una tonalidad oscura.</p>	Fase β' :	59.41%	Fase α :
20-045-B4-21				
	<p>Microestructura con predominio de la fase α (color más oscuro) en forma de tipo agujas finas y con una estructura tipo Widmanstätten. La fase β' presenta una coloración más clara. Se observa silicio primario de color gris azulado y con forma de poliedros irregulares a lo largo de toda la microestructura.</p>	Fase β' :	69.25%	Fase α :

(Fuente: Propia)

A medida que la fase α aumenta, el porcentaje de elongación también crece, por lo tanto, se determina que la fase α es directamente proporcional al porcentaje de elongación como se observa en la Figura 3.8.

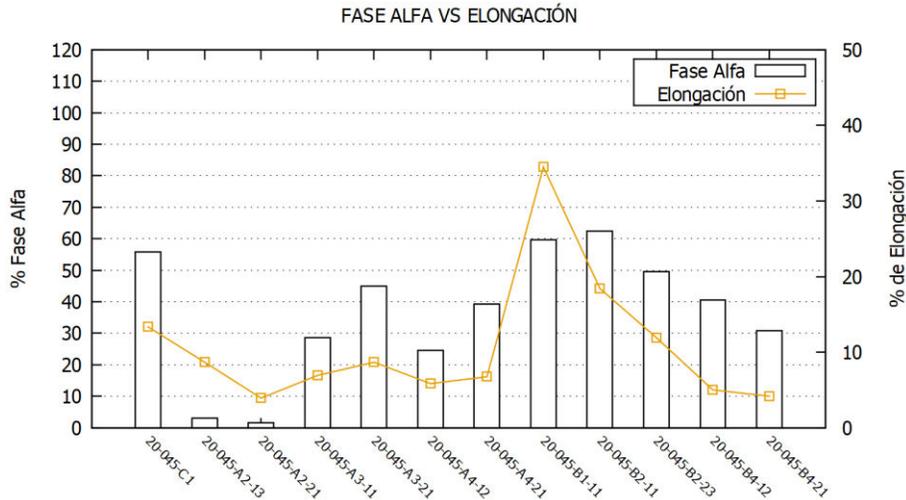


Figura 3.8 Cambio del porcentaje de elongación con respecto a la fase α .
(Fuente: Propia)

3.1.7. Ensayo de rugosidad superficial

En la Figura 3.9 se observan los valores de rugosidad equivalente de las diferentes probetas ensayadas en relación con el material de referencia. En el Anexo X se presentan las gráficas de rugosidad media aritmética en función del recorrido durante el ensayo.

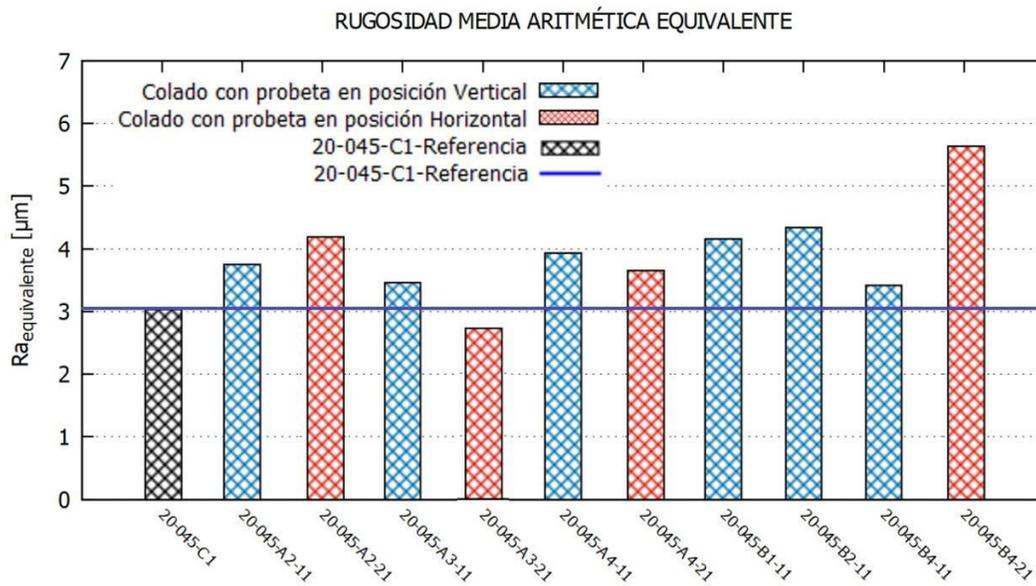


Figura 3.9 Rugosidad media aritmética equivalente.
(Fuente: Propia)

3.1.8. Desgaste del inserto

En la Figura 3.10 se puede observar los valores de las diferentes zonas de desgaste del inserto para cada uno de los ensayos de rugosidad realizados. En el Anexo XI se presenta la localización de dichas zonas en cada inserto utilizado.

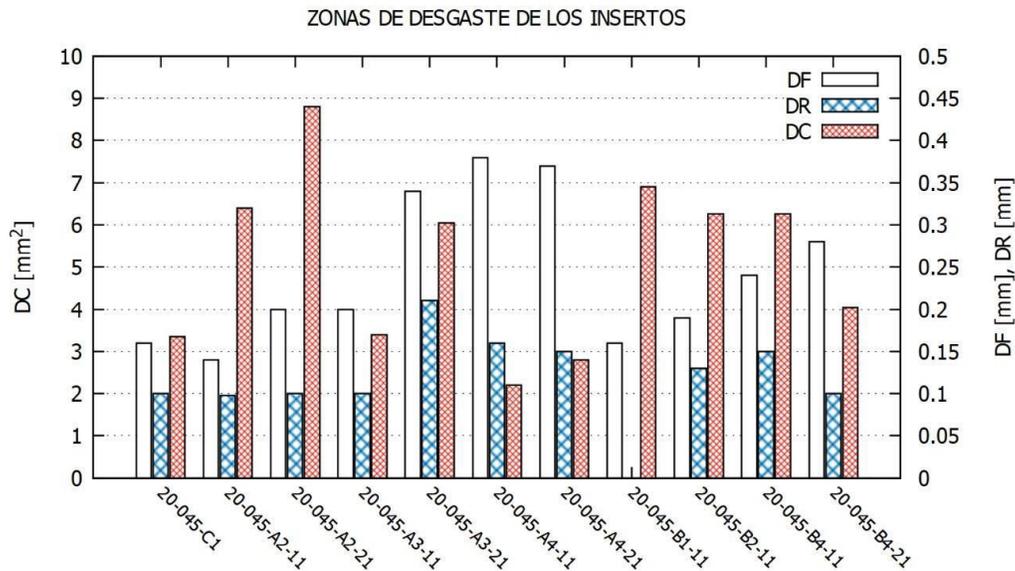


Figura 3.10 Zona de desgaste de los insertos en el ensayo de rugosidad superficial. (Fuente: Propia)

3.1.9. Forma de la viruta

En la Figura 3.11 se visualiza el tamaño y forma de la viruta de las aleaciones con adición de silicio en relación con el material de referencia. La viruta C1-01 tiene una viruta de 0.5 [mm] de ancho y 2 [mm] de largo, se caracteriza por ser cortas y arqueadas. La viruta de las aleaciones con adición de silicio presenta una viruta de 1.5 – 2 [mm] de ancho y 3.5 – 4 [mm] de largo, se caracteriza por ser dentada y fragmentada. En la Figura 3.12 se visualiza el tamaño y forma de la viruta de las aleaciones con adición de ferro-silicio en relación con el material de referencia. Esta viruta tiene 1.5 – 2 [mm] de ancho y 3 – 4 [mm] de largo, se caracteriza por ser dentada y fragmentada.

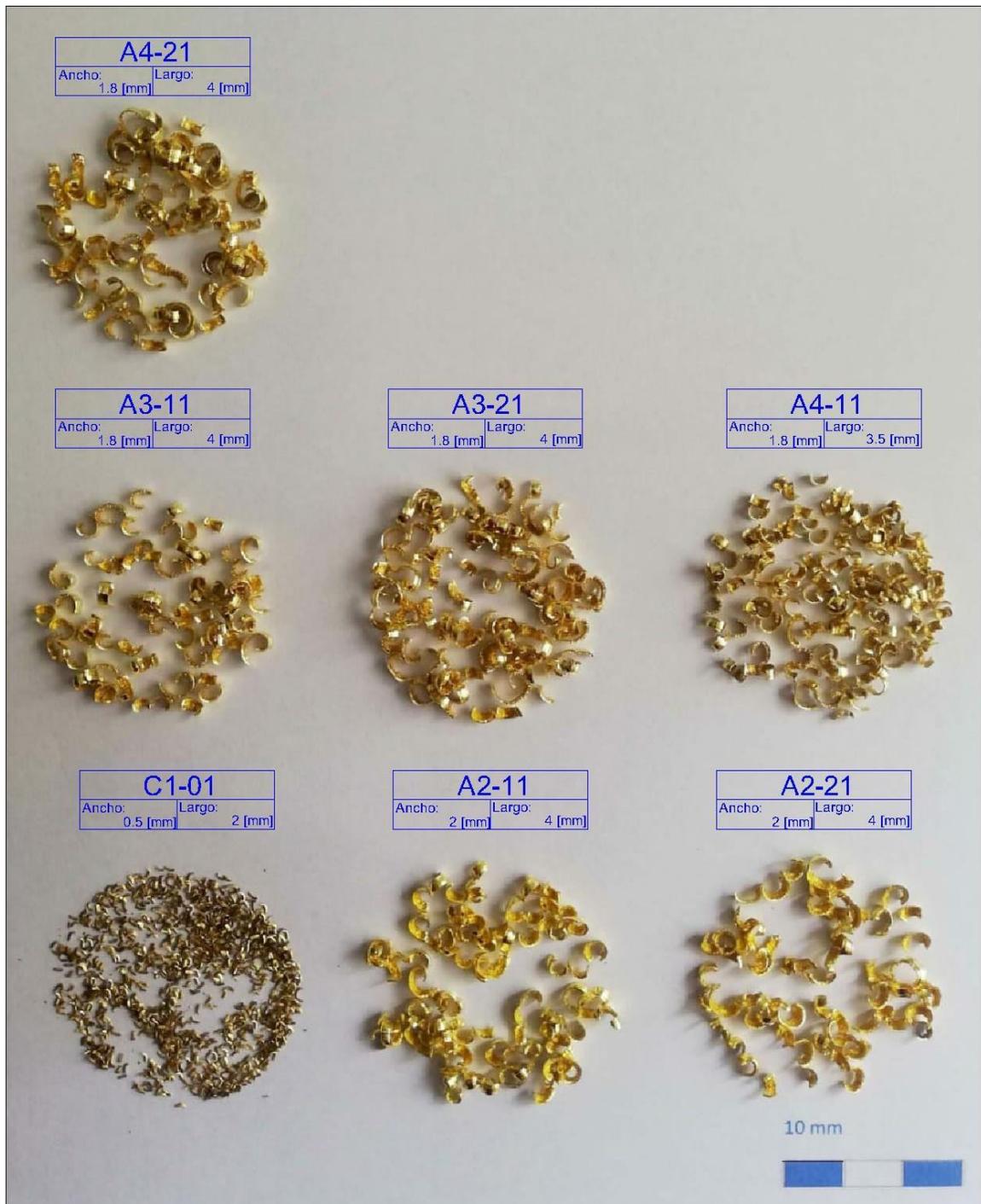


Figura 3.11 Morfología de las virutas de referencia C38500 y aleaciones Cu-Zn-Si.
(Fuente: Propia)

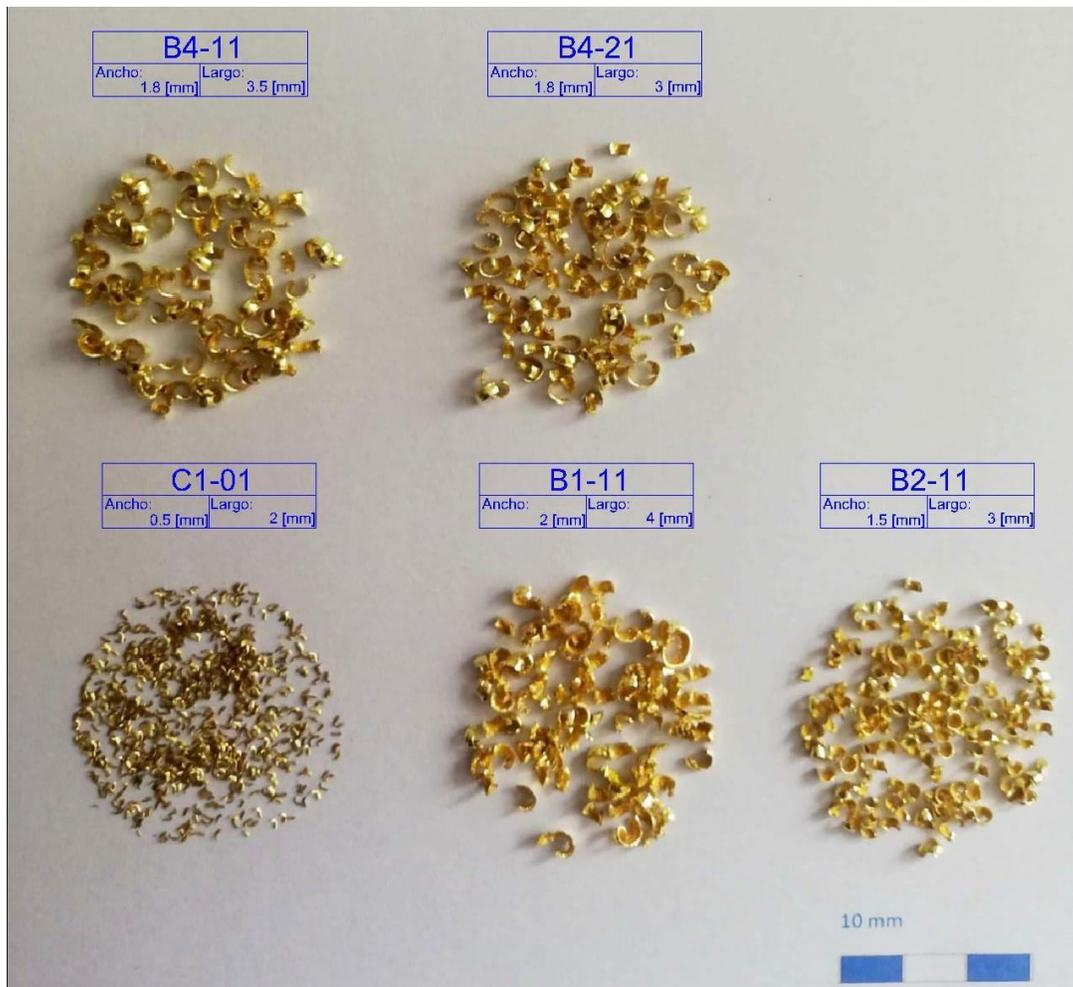


Figura 3.12 Morfología de las virutas de referencia C38500 y aleaciones Cu-Zn-FeSi.
(Fuente: Propia)

3.1.10. Probetas defectuosas

Las probetas de las aleaciones Cu-Zn al 0.5% de silicio (20-045-A1), Cu-Zn al 0.5% de ferro-silicio (20-045-B1) y Cu-Zn al 1.5% de ferro-silicio (20-045-B3) fueron las que presentaron fallas al momento de realizar los ensayos. Como se observa en las macrografías de vista superior, correspondientes a las Figuras 3.13, 3.15 y 3.17; la fractura de estas aleaciones ópticamente es una fractura dúctil, pues tiene una superficie opaca. Es posible apreciar la formación y coalescencia de micro cavidades, las cuales pueden ser el mecanismo de iniciación de la fractura. La superficie de fractura está constituida por cavidades o depresiones resultantes de la coalescencia de las micro cavidades, estas pueden haber sido iniciadas por la fluencia del material alrededor de inclusiones o discontinuidades, por lo general son concentradores de esfuerzos y producen aumento del flujo plástico [53].

En las Figuras 3.14, 3.16 y 3.18 se aprecia la presencia de fisuras al tomar macrográficas laterales de las probetas, las fisuras pueden ser causadas por la presencia de inclusiones o heterogeneidades que como se menciona anteriormente, son concentradores de esfuerzos y posibles inicios de la fractura. Debido a la mayor deformación que se da en la probeta con 0.5% de silicio, se puede decir que esta aleación es más dúctil que las otras [53].



Figura 3.13 Macrografía vista superior de la probeta con 0.5% de silicio.
(Fuente: Propia)

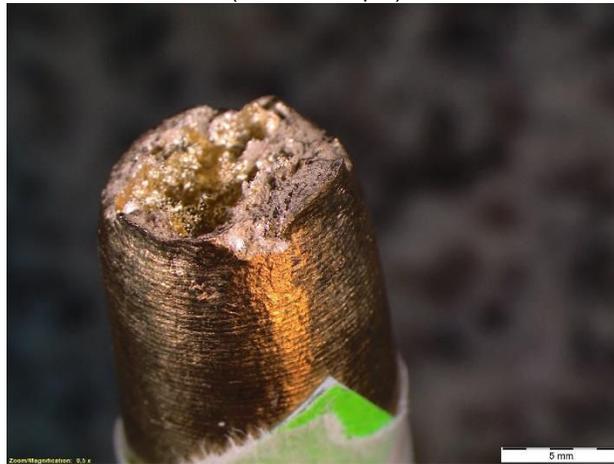


Figura 3.14 Macrografía vista lateral de la probeta con 0.5% de silicio.
(Fuente: Propia)

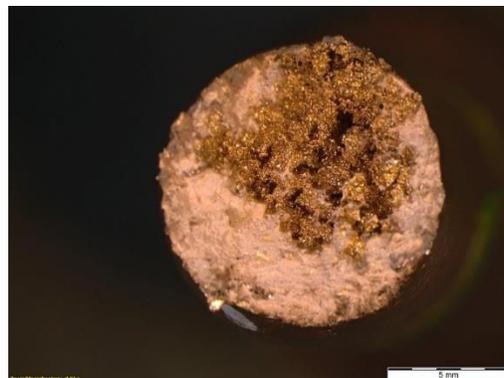


Figura 3.15 Macrografía vista superior de la probeta con 0.5% de ferro-silicio.
(Fuente: Propia)



Figura 3.16 Macrografía vista lateral de la probeta con 0.5% de ferro-silicio.
(Fuente: Propia)



Figura 3.17 Macrografía vista superior de la probeta con 1.5% de ferro-silicio.
(Fuente: Propia)



Figura 3.18 Macrografía vista lateral de la probeta con 1.5% de ferro-silicio.
(Fuente: Propia)

3.1.11. Matriz comparativa

Tabla 3.5 Matriz comparativa

%	PROBETA	DUREZA		RESISTENCIA A LA TRACCIÓN		ELONGACIÓN [%]	Fase α [%]	Fase β' [%]	Micrografías [50X] Fase β' / Fase α
		[HRB]		[Ksi]	[Mpa]				
2,5 - 3% - Pb	20-045-C1 (Material de referencia)	63.2		48	330	15.0	55.71	44.29	
	20-045-A2-13	85.8		78.6	542	10.4	1.88	98.12	
	20-045-A2-21	83.2		61.5	424.1	4.7	1.56	98.44	
1% - Si	20-045-A3-11	78.8		68.8	474.3	8.3	28.55	71.45	
	20-045-A3-21	81.8		69.8	481.5	10.4	45.05	54.95	
	20-045-A4-12	79.2		57.8	398.7	7.0	24.54	75.46	
2% - Si	20-045-A4-21	80.4		52.8	364	8.1	39.23	60.77	

%	PROBETA	DUREZA [HRB]	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN		ELONGACIÓN [%]	Fase α [%]	Fase β' [%]	Micrografías [50X] Fase β' / Fase α
			[Ksi]	[Mpa]				
0,5% - FeSi	20-045-B1-11	51	59.6	410.8	41.4	59.60	40.40	
	20-045-B2-11	64.6	65.7	452.8	22.1	62.40	37.60	
1% - FeSi	20-045-B2-23	67.8	58.1	400.8	14.3	49.52	50.48	
	20-045-B4-12	56.4	50.6	348.7	6.0	40.59	59.41	
2% - FeSi	20-045-B4-21	81	50.9	351	5.0	30.75	69.25	

3.2. Discusión

En este apartado se realizará el análisis de los resultados mostrados anteriormente, además, una comparación entre el material de referencia “C38500” con las adiciones de silicio y ferro-silicio.

3.2.1. Proceso de colado

La temperatura alcanzada por el horno a diésel fijo de crisol móvil fue aproximadamente de 1180 [°C], esta temperatura no supera el punto de fusión del silicio el cual es de 1410 [°C], sin embargo, al analizar el diagrama ternario de solubilidad parcial de la aleación Cu-Zn-Si (Figuras 1 - 5, Anexo XII), se determinó que a los 1100 [°C] de temperatura todos los elementos se encuentran en estado líquido (Figuras 6 - 9, Anexo XII), garantizando la homogeneidad de la colada y de los resultados obtenidos en el presente estudio. Considerando que el silicio pasa de un estado líquido a sólido, este se expande incrementado su volumen en un 12,7 % como se visualiza en el Anexo XIII, además, al tener un calor latente de fusión muy alto, aproximadamente $1.2 [kWh/m^3]$ en el cambio de fase libera una enorme cantidad de energía calorífica. En el estudio realizado por Blanco, C. menciona que si el silicio no alcanza el punto de fusión en la aleación, esta reduce su expansión volumétrica ocasionando un efecto negativo sobre las propiedades térmicas [54].

3.2.2. Inspección visual de las probetas

En la Figura 2.15 se presenta el acabado superficial de las probetas, estas al ser moldeadas en arena sílice con resinas furánicas y fenólicas generan un excelente acabado superficial con una disminución de los poros internos y superficiales. Los rechupes ocasionados en el cambio de sección se dieron debido a que en el proceso de enfriamiento la mazarota no se solidificó al final, esto generó que no pudiera cumplir su función principal de alimentar de material al sistema durante la etapa de solidificación. Además, es importante considerar la longitud de la probeta, en vista de que la mazarota tiene un radio de acción determinado, esto influyó para que el rechupe se localizara en el cambio de sección del canal de ataque afectando algunas probetas destinadas para el ensayo de metalografía.

3.2.3. Propiedades mecánicas de la aleación Cu-Zn-Si

Al comparar con la norma ASTM B 455 se determinó un error máximo del 1% en la composición química de las aleaciones de silicio, dicho valor se encuentra dentro del rango admisible. La probeta con el 1.5% de silicio con colado en posición vertical presentó propiedades mecánicas similares al material C38500 obteniendo un incremento del 10.43 % en la resistencia a la tracción, un decremento del 48.12% en su elongación, mientras que la dureza tuvo un aumento del 24.68% respecto al material de referencia, este comportamiento se debe a un predominio de la fase β' en su microestructura, la cual se caracteriza por su alta dureza y fragilidad, de igual manera se observa la nucleación en los límites de grano de la fase α en forma de agujas finas ocasionado por un enfriamiento rápido propio del colado vertical y una menor presencia de la estructura Widmanstätten como se determina en la Tabla 3.3. A través del ensayo de maquinado se observa un incremento de la rugosidad del 14.08% en comparación al material base, sin embargo, está dentro del rango para procesos de torneado de acuerdo con la norma ASME B46.1 como se visualiza en el Anexo XIV. Al presentar una dureza elevada la morfología de la viruta que se obtuvo fue dentada y fragmentada, este tipo de viruta es regular para procesos de torneado de acuerdo con la ISO 3685 presentado en el Anexo XV. Además, dicho incremento de la rugosidad genera un mayor desgaste del inserto, disminuyendo la productividad en procesos industriales.

En concordancia con el estudio de Taha, A [55]. Los mejores resultados se alcanzaron al adicionar el 1% de silicio en el colado de probetas en posición vertical, se obtuvo un incremento del 26.16% en la resistencia a la tracción, un descenso del 35% en su elongación y un aumento en la dureza del 35.76% si se compara con el material base. Estos valores se ven correlacionados con las fases presentes en la microestructura, puesto que la única fase que se observa es β' como consecuencia de un enfriamiento rápido, además se visualiza ángulos de 120 grados en la convergencia de 3 granos debido a que intenta alcanzar el equilibrio de las tensiones superficiales como se detalla en el Anexo IX, sin embargo, estas características no son factibles con la aplicación planteada en el estudio “componentes y accesorios de ingeniería”, por su elevada dureza y fragilidad, el material no es apropiado para un proceso de mecanizado libre, ya que en el inserto se genera un incremento en la fuerza de corte, ocasionando una mayor zona de desgaste, igualmente, la morfología de la viruta tiende a fragmentarse y ser discontinua, la rugosidad es elevada considerando que es directamente proporcional a la dureza del material.

3.2.4. Propiedades mecánicas de la aleación Cu-Zn-FeSi

Al comparar con la norma ASTM B 455 se determinó un error máximo del 2% en la composición química de las aleaciones de ferro-silicio, el cual está dentro del rango permitido. La probeta con el 1% de ferro-silicio con colado en posición vertical presentó similares propiedades al material base con un incremento del 5.46% en la resistencia a la tracción, 37.5% de elongación y 2.21% de dureza con respecto al material de referencia. La aleación presenta una microestructura bifásica ($\alpha + \beta'$) en la que predomina la fase α con una morfología de tipo aguja, el silicio primario se encuentra en forma de poliedros irregulares y de color gris azulado distribuidos de una manera aleatoria, mientras que el hierro se identifica con un aspecto esferoidal con una tonalidad más oscura en comparación al silicio (Tabla 3.4). El incremento de la elongación se debe a que existe una relación directa entre la fase α y la ductilidad del material como se detalla en la Figura 3.8. A través del ensayo de maquinado se observa un incremento de la rugosidad en un 43.03% en comparación al material base, sin embargo, está dentro del rango para procesos de torneado de acuerdo con la norma ASME B46.1 como se visualiza en el Anexo XIV. A pesar de que la dureza es similar al material de referencia el hierro influye de manera significativa en la morfología de la viruta la cual fue dentada, fragmentada y corta, este tipo de viruta es regular para procesos de torneado de acuerdo con la ISO 3685 presentado en el Anexo XV. Además, dicho incremento de la rugosidad es generado por una elevada fricción entre la viruta y la herramienta, aunque la viruta tiene una mayor facilidad de evacuación de la zona de corte tiende a presentar vibraciones al momento del mecanizado.

En la aleación con el 2% de ferro-silicio en el colado con probetas en posición horizontal, se obtuvo un decremento del 18.3% de resistencia a la tracción, 68.75% de elongación, mientras que en la dureza se tuvo un incremento del 28.16% en comparación con el material de referencia. Esto se evidencia en su microestructura, debido a que la fase predominante es β' , la cual se caracteriza por su alta dureza y fragilidad. La fase α presenta una configuración tipo aguja formando estructuras Widmanstätten como se determina en la Tabla 3.4. Además, se observa una mayor presencia de silicio primario acentuando su morfología poliédrica irregular y de un tamaño superior en comparación a las aleaciones con un menor porcentaje de ferro-silicio otorgándole una mayor dureza al material. La rugosidad tuvo un incremento del 85.88%, por lo que se tiene un mayor desgaste de la herramienta (Anexo XI) y la viruta (Figura 3.12) se caracterizó por tener una mayor longitud transversal (ancho) en comparación de la aleación con el 1% de ferro-silicio.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- En el presente estudio mediante la realización de los ensayos destructivos al material de referencia C38500 y a la aleación Cu – Zn con adición de silicio y ferro-silicio, se pudo alcanzar los objetivos específicos planteados en el plan de trabajo.
- Las propiedades mecánicas no se ven afectadas de manera significativa por la posición del colado, aunque en la probeta en posición vertical se utilizó una menor masa para su elaboración en comparación con la probeta en posición horizontal, obteniendo una relación de 1:2 aproximadamente.
- Las aleaciones obtenidas Cu-Zn con adición de silicio y ferro-silicio son apropiadas para trabajo en caliente debido a su matriz β' presente en su microestructura bifásica ($\alpha + \beta'$).
- La aleación que presenta similares propiedades mecánicas en cuanto a la resistencia a la tracción, dureza, acabado superficial y tipo de viruta con respecto al material de referencia fue la aleación Cu-Zn con el 1.5% de silicio y 1% de ferro-silicio.
- Las aleaciones Cu-Zn al 0.5% de silicio (20-045-A1), Cu-Zn al 0.5% de ferro-silicio (20-045-B1) y Cu-Zn al 1.5% de ferro-silicio (20-045-B3) no se tomaron en consideración dado que presentaron los peores resultados a causa de la presencia de inclusiones o discontinuidades, además de rechupes internos producidos durante el enfriamiento.
- La dureza en las aleaciones Cu-Zn-Si disminuye con respecto al incremento del porcentaje de silicio, mientras que en las aleaciones Cu-Zn-FeSi incrementa con el porcentaje de ferro-silicio teniendo el valor promedio más alto en la aleación Cu-Zn con 2% FeSi debido a la influencia del hierro en las composiciones.
- El material de referencia C38500 tiene una rugosidad y forma de viruta óptimas para procesos de maquinado, mientras que en las aleaciones Cu-Zn-Si y Cu-Zn-FeSi sus rugosidades están dentro de los límites recomendados por la norma ASME B46.1, pero presentaron una morfología de viruta fragmentada y discontinua, la cual no es recomendada.
- Una vez realizado el análisis de los resultados obtenidos en el estudio se determinó que la probeta que más se asemeja a las propiedades de la aleación de referencia

C38500 es la probeta con el 1% de ferro-silicio, siendo esta la alternativa más factible para la sustitución del plomo.

4.2. Recomendaciones

- Para el proceso de fundición de aleaciones Cu-Zn con adición de Si y FeSi es importante llegar a una temperatura de colada de 1400 [°C], debido a que el silicio y ferro-silicio presentan un elevado punto de fusión con el fin de asegurar la homogeneidad de la aleación y no se pierdan propiedades térmicas asociadas al silicio y ferro-silicio.
- Con el fin de ahorrar material y garantizar la localización de la mayoría de los defectos en proyectos de investigación relacionados con la caracterización de materiales se recomienda utilizar un colado con probetas en posición vertical.
- Debido a las propiedades mecánicas y térmicas del silicio se recomienda tomar en consideración al momento de realizar los cálculos de cargas, dado que este material modifica de forma significativa los porcentajes de los elementos aleados.
- Para evaluar a profundidad la microestructura de las aleaciones se recomienda realizar un análisis de rayos X de dispersión de energía (EDX) en conjunto con un microscopio electrónico de barrido (SEM), con el objetivo de poder reconocer de mejor manera las diferentes fases de la microestructura y la influencia del hierro en la aleación.
- Para un estudio a profundidad sobre la maquinabilidad del material recomendado Cu-Zn-FeSi al 1%, se sugiere realizar un estudio de vida útil de la herramienta de corte para obtener el grado de maquinabilidad modificando los parámetros de corte.
- Se recomienda ampliar el estudio de aleaciones libres de plomo tomando en consideración la viabilidad de su producción en las aplicaciones de ingeniería.

Referencias Bibliográficas

- [1] NTE INEN 3123, *Grifería. Llaves. Definiciones, requisitos y métodos de ensayo*. Quito, Ecuador, 2017, p. 44.
- [2] M. Tang, P. Sinsheimer, E. Sarver, J. Parks, and M. Edwards, "Evaluating 'lead-free' brass performance in potable water," *Corrosion*, vol. 75, no. 7, pp. 865–875, 2019, doi: 10.5006/3060.
- [3] P. Drinking and W. Systems, "P Rivate D Rinking W Ater," *Small*, no. 1, pp. 1–4, 2009.
- [4] A. V. Krishna, "LEAD FREE BRASS: Study and Analysis of the surface integrity of lead brass and unleaded brass," *Halmstad Univ.*, 2015.
- [5] M. A. Taha, N. A. E-Mahallawy, T. M. Mousa, R. M. Hamouda, and A. F. A. G. Yousef, "Microstructure and castability of lead-free silicon brass alloys," *Materwiss. Werksttech.*, vol. 43, no. 8, pp. 699–704, 2012, doi: 10.1002/mawe.201200932.
- [6] P. Poma, "Intoxicación por plomo en humanos," *An. la Fac. Med.*, vol. 69, no. 2, 2008.
- [7] M. Dozier, M. McFarland, and B. Lesikar, "Problemas del agua potable: El cobre," *Water Earth's Resour.*, pp. 1–7, 2006.
- [8] ASTM International, "Standard Specification for Copper-Zinc-Lead Alloy (Leaded-Brass) Extruded Shapes 1," *Astm*, vol. 30, no. Reapproved 2017, pp. 1–3, 2015, doi: 10.1520/B0453.
- [9] S. Schmid and S. Kalpakjian, *MANUFACTURA, INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA*, Quinta Edi. México: PEARSON EDUCACIÓN, 2008.
- [10] M. Groover, *Fundamentos de manufactura moderna*. España: McGraw-Hill, 2007.
- [11] J. García, "Estudio de la influencia de diferentes diseños de los sistemas de alimentación y compensación en la fundición en arena," Universidad de Sevilla, 2016.
- [12] J. D. Jaramillo, L. E. Li. Sanchez, and H. V. Amaris, "Estructura cristalina del cobre, propiedades macroscópicas mecánicas y de procesamiento," *Cienc. e Ing. Neogranadina*, vol. 16, no. 2, p. 9, 2006, doi: 0124-8170.
- [13] E. L. Rooy and J. H. L. Van Linden, "ASM Metals Handbook, Vol 02 Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials," pp. 3330–3345, 1990.
- [14] E. Solano, "Generalidades Zn," *Metalurgia*, 2009. <http://metalurgia-metalurgia.blogspot.com/2009/> (accessed Jun. 09, 2020).
- [15] E. B. Park, *Goodfellow Cambridge Limited Goodfellow Corporation Goodfellow*

GmbH Goodfellow (Shanghai) Trading Co ., Ltd. .

- [16] V. Kuklík and J. Kudláček, *Hot-Dip galvanizing of steel structures*. 2016.
- [17] K. I. Consultant, "Copper Development Association," *Anti-Corrosion Methods Mater.*, vol. 46, no. 3, pp. 3–11, 1999, doi: 10.1108/acmm.1999.12846cab.036.
- [18] ASM International Handbook Committee, *ASM Speciality Handbook, Copper and Copper Alloys*. 2001.
- [19] F. J. Gil Mur and J. M. Manero Planella, *Metalografía*. Universitat Politècnica de Catalunya, 2005.
- [20] E. Mora Ponciano, "Caracterización del Latón Brass characterization," *Rev. Met. N°*, vol. 30, pp. 57–64, 2011, [Online]. Available: http://www.revistasbolivianas.org.bo/pdf/rmuto/n30/n30_a08.pdf.
- [21] P. A. Albertsson and F. Tjerneld, *Phase diagrams*, vol. 228. 1994.
- [22] C. Llumiquinga, "PURIFICACIÓN DE RESIDUOS DE LATÓN DE LA INDUSTRIA DE LA GRIFERÍA PARA SU RECICLAJE," QUITO/EPN/2011, 2011.
- [23] A. Rodríguez Rey and I. Liliam Cuéllar Luna, "Efectos nocivos del plomo para la salud del hombre Harmful effects of lead on human health," *Rev. Cuba. Investig. Biomédicas*, vol. 35, no. 3, pp. 251–271, 2016.
- [24] F. Regio, "PLOMO Y SUS ALEACIONES," *Ing. Ind.*, 2008.
- [25] H. Doostmohammadi and H. Moridshahi, "Effects of Si on the microstructure, ordering transformation and properties of the Cu₆₀Zn₄₀ alloy," *J. Alloys Compd.*, vol. 640, pp. 401–407, 2015, doi: 10.1016/j.jallcom.2015.03.228.
- [26] I. Garcia, "ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL SILICIO EN LA SOLDABILIDAD DEL ACERO ASTM A588 MEDIANTE EL PROCESO SAW," Escuela Politecnica Nacional, 2019.
- [27] M. Martínez Bogado, "Silicio," *Mater. y Mater. primas*, p. 33, 2011, [Online]. Available: <http://www.inet.edu.ar/wp-content/uploads/2012/11/silicio.pdf>.
- [28] M. L. Williams, "CRC Handbook of Chemistry and Physics, 76th edition," *Occup. Environ. Med.*, vol. 53, no. 7, pp. 504–504, 1996, doi: 10.1136/oem.53.7.504.
- [29] Goodfellow, "Silicio - Catalogo en linea - Materiales en pequenas cantidades para el diseno." <http://www.goodfellowusa.com/S/Silicio-Metal.html> (accessed Jul. 15, 2020).
- [30] COMETAL S.A., "Ferro Silicio." <https://www.cometalsa.com/productos-y-servicios/ferroaleaciones-en-piedra/2#ancla10>.
- [31] J. Mestizo, "Efecto de la sustitución del plomo por bismuto en el grado de maquinabilidad de un latón plomado," Universidad de Colombia, 2019.
- [32] J. Davis, *Metals Handbook Ninth Edition, Machining*, vol. 69. 1969.

- [33] L. Picho, "ESTUDIO DEL DESGASTE DE LA PLAQUITA CNMG 120408-PM4325 EN FUNCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE MECANIZADO EN TORNEADO CNC," Escuela Politécnica Nacional, 2019.
- [34] American National Standard, "Surface Texture (Surface Roughness, Waviness and Lay).," *ASME B46. 1*, vol. 2009, 1978.
- [35] M. Correa, M. D. J. Ramírez, J. R. Alique, and C. a Rodríguez, "Factores que afectan el acabado superficial en los procesos de mecanizado: Técnicas de análisis y modelos," *XXV Jornadas Automática Ind. CEA-IFAC*, pp. 75–82, 2004.
- [36] ASTM International, *ASTM B455 Standard Specification for Copper-Zinc-Lead Alloy (Leaded-Brass) Extruded Shapes*, vol. 86, no. Reapproved 1995. 1986, p. 3.
- [37] N. Titov and Y. Stepánov, *TECNOLOGIA DEL PROCESO DE FUNDICION*. Moscú: Editorial Mir, 1981.
- [38] A. Mendoza and M. Oña, "CARACTERIZACIÓN COMPARATIVA DE UNA ALEACIÓN DE ALUMINIO ENTRE LOS PROCESOS DE COLADO ESTÁTICO Y COLADO DINÁMICO CON VARIACIÓN DE FRECUENCIA Y AMPLITUD EN LA MESA VIBRATORIA.," Escuela Politécnica Nacional, 2020.
- [39] A. Sanchez, "INNOVACIONES A UN SISTEMA DE COLADO PARA ALEACIÓN DE RANGO CORTO," Instituto Politécnico Nacional, 2019.
- [40] P. Bazante del Pozo, "Diseño de un Molde Permanente de Fundición por Gravedad para la Fabricación de Pesas Adhesivas de Plomo Utilizadas en Balanceo de Neumáticos," Universidad Internacional SEK, 2019.
- [41] J. Prieto Villamizar and C. Hernandez Barragan, "Ensayo de tracción," *Univ. Pamplona*, pp. 1–25, 2008.
- [42] ASTM International, *ASTM E8/E8M standard test methods for tension testing of metallic materials 1*, no. C. 2010, pp. 1–27.
- [43] W. Smith and J. Hashemi, *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*, Cuarta Edi. México: McGraw-Hill, 2006.
- [44] ASTM International, *ASTM E18 Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials* 1,2. 2014, pp. 1–38.
- [45] S. Avner, *Introduccion a la Metalurgia Fisica*, Segunda Ed. México: McGraw-Hill, 1998.
- [46] Sandvik, "Herramientas de torneado - Torneado general," p. 529, 2012, [Online]. Available: <http://www3.fi.mdp.edu.ar/tecnologia/archivos/Tecnologia1/SandvikTorno.pdf>.
- [47] Sandvik, "Torneado general Recomendaciones de velocidad de corte," pp. 66–69, 2012.

- [48] D. Morales, "Determinación de parámetros para la operación de cilindrado de acero sae12l 14, bronce sae40 y aluminio sae 1060 en el torno," Pontificia Universidad Javeriana, 2009.
- [49] A. Suárez Ramírez, P. M. Saenz, and M. A. Benavides C., "Herramientas de corte: materiales y aplicaciones," *Informador Técnico*, vol. 49, no. 49, p. 23, 1995.
- [50] ASTM International, "Standard Test Method for Evaluating Machining Performance of Ferrous Metals Using," *Control*, vol. 81, no. July 1981, pp. 1–11, 2001, doi: 10.1520/E0618-07R18.Copyright.
- [51] Prado Teresa, "Análisis de desgaste de herramienta y optimización de proceso mecanizado mediante visión computarizada y consumo eléctrico," Universidad de Vigo, 2015.
- [52] D. Askeland, *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*, Tercera., vol. 907. México, 2007.
- [53] I. M. and A. R. J., "Fractografía. Aplicaciones al análisis de fallas," *Com. Nac. Energ. At.*, vol. 69, pp. 363–377, 1988, [Online]. Available: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/22/018/22018630.pdf.
- [54] C. B. Blanco, "Caracterización de aleaciones de silicio para su empleo en el almacenamiento," Universidad Politécnica de Madrid, 2016.
- [55] M. A. Taha, N. A. El-Mahallawy, R. M. Hammouda, T. M. Moussa, and M. H. Gheith, "Machinability characteristics of lead free-silicon brass alloys as correlated with microstructure and mechanical properties," *Ain Shams Eng. J.*, vol. 3, no. 4, pp. 383–392, 2012, doi: 10.1016/j.asej.2012.05.004.
- [56] Vander Voort and W. Baldwin, "Metallography and Microstructures Handbook," *ASM Int.*, vol. 9, p. 2733, 2004, [Online]. Available: <http://www.worldcat.org/oclc/42469467>.
- [57] J. Marin, "Identificación de microconstituyentes en aleaciones de aluminio mediante metalografía óptica en color," 2019.
- [58] U. C. Madrid, "Proyecto de Innovación Atlas Metalográfico," *Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica*, 2017. <https://www.ucm.es/atlasmetalografico/x4> (accessed Jan. 31, 2021).
- [59] Y. A. Chang, J. P. Neumann, A. Mikula, and D. Goldberg, "Copper-Silicon-Zinc Ternary Alloy Phase Diagram (based on 1979 Chang Y.A.) - ASM International," *ASM International*. https://www.asminternational.org/search/-/journal_content/56/10192/APD-CU-SI-ZN-927233/APD-DATA-SHEET (accessed Mar. 23, 2021).
- [60] H. Baker, *ASM Handbook: Alloy Phase Diagrams Volume 3*. 1998.

- [61] I. Standard, "ISO 3685 Tool-life testing with single-point turning tools," *Tech. Comm. ISO*, vol. 2, p. 53, 1993.

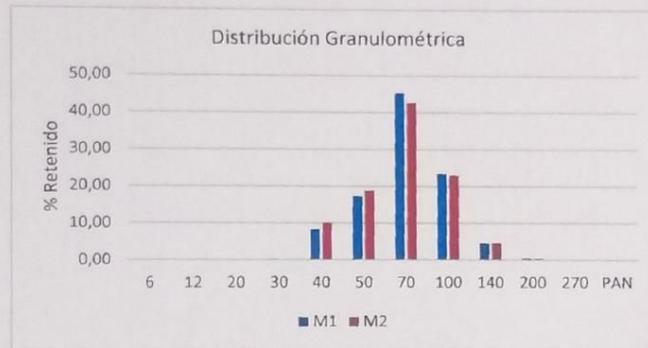
ANEXOS

Anexo I: Ensayo de granulometría y LOI de la arena mixta

		ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO		Código: LB-09-18																																																																							
				Versión: Primera																																																																							
NUMERO DE INFORME: LB-09-18/60 SOLICITADO POR: Fernando Chávez FECHA: 22/09/2020 TIPO DE MATERIAL: Arena reciclada, tomada el día 22/09/2020																																																																											
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Peso de la Muestra</th> </tr> <tr> <th>M1 (gr)</th> <th>M2 (gr)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>50</td> <td>50</td> </tr> </tbody> </table>						Peso de la Muestra		M1 (gr)	M2 (gr)	50	50																																																																
Peso de la Muestra																																																																											
M1 (gr)	M2 (gr)																																																																										
50	50																																																																										
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Malla</th> <th>M1 Peso Retenido Ws (gr)</th> <th>M2 Peso Retenido Ws (gr)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>6</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>12</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>20</td><td>0,01</td><td>0,01</td></tr> <tr><td>30</td><td>0,13</td><td>0,12</td></tr> <tr><td>40</td><td>4,3</td><td>5,12</td></tr> <tr><td>50</td><td>12,95</td><td>14,53</td></tr> <tr><td>70</td><td>35,59</td><td>35,84</td></tr> <tr><td>100</td><td>47,32</td><td>47,32</td></tr> <tr><td>140</td><td>49,63</td><td>49,65</td></tr> <tr><td>200</td><td>49,88</td><td>49,83</td></tr> <tr><td>270</td><td>49,9</td><td>49,89</td></tr> <tr><td>PAN</td><td>49,9</td><td>49,89</td></tr> </tbody> </table>						Malla	M1 Peso Retenido Ws (gr)	M2 Peso Retenido Ws (gr)	6	0	0	12	0	0	20	0,01	0,01	30	0,13	0,12	40	4,3	5,12	50	12,95	14,53	70	35,59	35,84	100	47,32	47,32	140	49,63	49,65	200	49,88	49,83	270	49,9	49,89	PAN	49,9	49,89																															
Malla	M1 Peso Retenido Ws (gr)	M2 Peso Retenido Ws (gr)																																																																									
6	0	0																																																																									
12	0	0																																																																									
20	0,01	0,01																																																																									
30	0,13	0,12																																																																									
40	4,3	5,12																																																																									
50	12,95	14,53																																																																									
70	35,59	35,84																																																																									
100	47,32	47,32																																																																									
140	49,63	49,65																																																																									
200	49,88	49,83																																																																									
270	49,9	49,89																																																																									
PAN	49,9	49,89																																																																									
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Malla</th> <th>M1 Peso Retenido Ws (gr)</th> <th>M2 Peso Retenido Ws (gr)</th> <th>M1 Total de Peso Retenido (Ws/Wt) (gr)</th> <th>M2 Total de Peso Retenido (Ws/Wt) (gr)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>6</td><td>0</td><td>0</td><td>0,0000</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>12</td><td>0</td><td>0</td><td>0,0000</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>20</td><td>0,01</td><td>0,01</td><td>0,0002</td><td>0,0002</td></tr> <tr><td>30</td><td>0,12</td><td>0,11</td><td>0,0024</td><td>0,0022</td></tr> <tr><td>40</td><td>4,17</td><td>5</td><td>0,0836</td><td>0,1002</td></tr> <tr><td>50</td><td>8,65</td><td>9,41</td><td>0,1733</td><td>0,1886</td></tr> <tr><td>70</td><td>22,64</td><td>21,31</td><td>0,4537</td><td>0,4271</td></tr> <tr><td>100</td><td>11,73</td><td>11,48</td><td>0,2351</td><td>0,2301</td></tr> <tr><td>140</td><td>2,31</td><td>2,33</td><td>0,0463</td><td>0,0467</td></tr> <tr><td>200</td><td>0,25</td><td>0,18</td><td>0,0050</td><td>0,0036</td></tr> <tr><td>270</td><td>0,02</td><td>0,06</td><td>0,0004</td><td>0,0012</td></tr> <tr><td>PAN</td><td>0</td><td>0</td><td>0,0000</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>Total Wt=</td><td>49,9</td><td>49,89</td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>						Malla	M1 Peso Retenido Ws (gr)	M2 Peso Retenido Ws (gr)	M1 Total de Peso Retenido (Ws/Wt) (gr)	M2 Total de Peso Retenido (Ws/Wt) (gr)	6	0	0	0,0000	0,0000	12	0	0	0,0000	0,0000	20	0,01	0,01	0,0002	0,0002	30	0,12	0,11	0,0024	0,0022	40	4,17	5	0,0836	0,1002	50	8,65	9,41	0,1733	0,1886	70	22,64	21,31	0,4537	0,4271	100	11,73	11,48	0,2351	0,2301	140	2,31	2,33	0,0463	0,0467	200	0,25	0,18	0,0050	0,0036	270	0,02	0,06	0,0004	0,0012	PAN	0	0	0,0000	0,0000	Total Wt=	49,9	49,89		
Malla	M1 Peso Retenido Ws (gr)	M2 Peso Retenido Ws (gr)	M1 Total de Peso Retenido (Ws/Wt) (gr)	M2 Total de Peso Retenido (Ws/Wt) (gr)																																																																							
6	0	0	0,0000	0,0000																																																																							
12	0	0	0,0000	0,0000																																																																							
20	0,01	0,01	0,0002	0,0002																																																																							
30	0,12	0,11	0,0024	0,0022																																																																							
40	4,17	5	0,0836	0,1002																																																																							
50	8,65	9,41	0,1733	0,1886																																																																							
70	22,64	21,31	0,4537	0,4271																																																																							
100	11,73	11,48	0,2351	0,2301																																																																							
140	2,31	2,33	0,0463	0,0467																																																																							
200	0,25	0,18	0,0050	0,0036																																																																							
270	0,02	0,06	0,0004	0,0012																																																																							
PAN	0	0	0,0000	0,0000																																																																							
Total Wt=	49,9	49,89																																																																									
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Malla</th> <th>M1 Porcentaje Retenido (%)</th> <th>M2 Porcentaje Retenido (%)</th> <th>Factor AFS</th> <th>M1 (Xi mi)</th> <th>M2 (Xi mi)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>6</td><td>0,00</td><td>0,00</td><td>3</td><td>0,00</td><td>0,00</td></tr> <tr><td>12</td><td>0,00</td><td>0,00</td><td>5</td><td>0,00</td><td>0,00</td></tr> <tr><td>20</td><td>0,02</td><td>0,02</td><td>10</td><td>0,20</td><td>0,20</td></tr> <tr><td>30</td><td>0,24</td><td>0,22</td><td>20</td><td>4,81</td><td>4,41</td></tr> <tr><td>40</td><td>8,36</td><td>10,02</td><td>30</td><td>250,70</td><td>300,66</td></tr> <tr><td>50</td><td>17,33</td><td>18,86</td><td>40</td><td>693,39</td><td>754,46</td></tr> <tr><td>70</td><td>45,37</td><td>42,71</td><td>50</td><td>2268,54</td><td>2135,70</td></tr> </tbody> </table>						Malla	M1 Porcentaje Retenido (%)	M2 Porcentaje Retenido (%)	Factor AFS	M1 (Xi mi)	M2 (Xi mi)	6	0,00	0,00	3	0,00	0,00	12	0,00	0,00	5	0,00	0,00	20	0,02	0,02	10	0,20	0,20	30	0,24	0,22	20	4,81	4,41	40	8,36	10,02	30	250,70	300,66	50	17,33	18,86	40	693,39	754,46	70	45,37	42,71	50	2268,54	2135,70																						
Malla	M1 Porcentaje Retenido (%)	M2 Porcentaje Retenido (%)	Factor AFS	M1 (Xi mi)	M2 (Xi mi)																																																																						
6	0,00	0,00	3	0,00	0,00																																																																						
12	0,00	0,00	5	0,00	0,00																																																																						
20	0,02	0,02	10	0,20	0,20																																																																						
30	0,24	0,22	20	4,81	4,41																																																																						
40	8,36	10,02	30	250,70	300,66																																																																						
50	17,33	18,86	40	693,39	754,46																																																																						
70	45,37	42,71	50	2268,54	2135,70																																																																						

100	23,51	23,01	70	1645,49	1610,74
140	4,63	4,67	100	462,93	467,03
200	0,50	0,36	140	70,14	50,51
270	0,04	0,12	200	8,02	24,05
PAN	0,00	0,00	300	0,00	0,00
100,00		100,00	5404,21		5347,77
Total (ΣX_i)			Total ($\Sigma(X_i \text{ mi})$)		

Resultados					
M1 [$\Sigma(X_i \text{ mi})/\Sigma X_i$]	M2 [$\Sigma(X_i \text{ mi})/\Sigma X_i$]	Indice de Finura (AFS) Promedio	Tipo de arena	Tamaño (mm)	% Polvo Fino
54,04	53,48	53,76	Media	0,25 a 0,5	0,51



Muestra	Observaciones
Arena reciclada	Su índice de finura (AFS) es de 53,76 lo que indica que es de tipo media (<60) y su tamaño de grano estará en el rango de 0,25 a 0,5 mm.

Conclusiones: La muestra de Arena reciclada tomada el día 22/09/2020 se caracterizó por presentar un índice de finura AFS de 53,76 y un porcentaje de polvos finos de 0,51% (mallas 200, 270 y PAN).

Elaborado por: Ing. Gerónimo Rosero	Revisado por: Ing. Giovanni Loachamin



INFORME ENSAYO LOI

Código: LB-07-

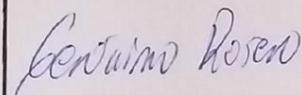
Versión: SEGUNDA

Cliente: Fernando Chávez **Fecha recepción muestras:** 09/09/2020
E-mail: **Fecha emisión del informe:** 10/09/2020
Nro. De informe: 10 **Tipo de arena:** Mixta: Reciclada 50% y Nueva 50%
Método utilizado: AFS 5100-12-S **Condiciones Ambientales:** 20°C 30%H

RESULTADOS

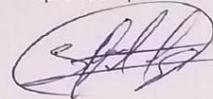
Nro. Crisol	Peso crisol vacío[g]	Peso crisol lleno inicial [g]	Peso crisol lleno final [g]	%LOI
1	24,48	34,5	34,26	2,40
2	25,45	35,47	35,24	2,30
3	25,25	35,25	35,02	2,30
PROMEDIO				2,33

Realizado por:


Ing. Gerónimo Rosero

Laboratorista

Aprobado por:



Ing. Giovanni Loachamin

Coordinador de diseño, desarrollo y ventas



25 de Noviembre #N4-363 y Calle 1, Barrio El Carmen, Parroquia Calderón Quito - Ecuador, Código postal: EC 17 0155

Ubicación Googlemaps: <http://goo.gl/uhhKG> - www.ecualnox.com

Anexo II: Dimensionamiento para colado con probeta en posición horizontal

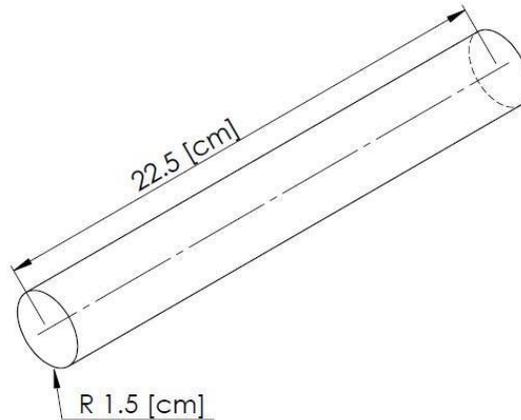


Figura 1. Pieza o moldura
Fuente: Propia

$$v = \pi \cdot r^2 \cdot h \quad [1]$$

$$v = \pi \cdot 1.5^2 \cdot 22.5$$

$$v = 159.043 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$v_{Total} = 3 \cdot v$$

$$v_{Total} = 3 \cdot 159.043$$

$$v_{Total} = 477.129 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$A_{Lateral} = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h$$

$$A_{Base} = \pi \cdot r^2$$

$$A_{Cilindro} = A_{Lateral} + A_{Base}$$

$$A_{Cilindro} = 2 \cdot \pi \cdot 1.5 \cdot 22.5 + \pi \cdot 1.5^2$$

$$A_{Cilindro} = 219.13 \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$A_{Total} = 3 \cdot A_{Cilindro}$$

$$A_{Total} = 3 \cdot 219.13$$

$$A_{Total} = 657.39 \text{ [cm}^2\text{]}$$

Donde:

v: volumen

r: radio

h: altura

m: masa

A: Área

Mazarota

Volumen mínimo mazarota

$$V_{maz} = k \cdot c \cdot V_{pieza} \quad [2]$$

$$V_{maz} = 44850.1 \text{ [mm}^3\text{]}$$

Donde:

V_{maz} : volumen de mazarota

V_{pieza} : volumen de pieza que se desea fabricar

k: factor de seguridad; K=2

c: coeficiente de contracción; c = 4.5

Tabla 1. Contracción volumétrica para distintos metales de fundición, debido a la contracción por solidificación.

Metal	Contracción por solidificación, %
Aluminio	7.1
Zinc	6.5
Al – 4.5 % de Cu	6.3
Oro	5.5
Hierro blanco	4 – 5.5
Cobre	4.9
Bronce (70 – 30)	4.5
Magnesio	4.2
90% de Cu – 10% de Al	4.0
Aceros al carbono	2.5 – 4.0
Al – 12% de Si	3.8
Plomo	3.2

(Fuente: [9])

El volumen de la pieza se multiplica por tres, puesto que se van a fabricar tres probetas en el mismo molde, por ello el volumen mínimo de la mazarota debe poder alimentar a las tres probetas.

Para el cálculo del diámetro se aplica la ecuación 3, la cual corresponde a la fórmula para encontrar el volumen de un cilindro.

$$V_{maz} = \frac{\pi \cdot D_{maz}^2}{4} \cdot h_{maz} \quad [3]$$

$$A_{maz} = \pi \cdot D_{maz} \cdot \left(h_{maz} + \frac{1}{2} D_{maz} \right) \quad [4]$$

$$D_{maz} = 25.91 [mm]$$

Donde:

D_{maz} : diámetro de mazarota

h_{maz} : altura de mazarota; $h_{maz} : 0.085 [m]$

A_{maz} : área de mazarota

Módulo de enfriamiento

El módulo de enfriamiento se define como un parámetro geométrico que relaciona el volumen de la pieza sobre el área de contacto de la pieza con el molde. En la ecuación 5, se sustituyen los valores del volumen y del área de la pieza.

$$M_{enfriamiento} = \frac{V_{pieza}}{A_{pieza}} \quad [5]$$

$$M_{enfriamiento} = 0.725 [cm]$$

Donde:

$M_{enfriamiento}$: módulo de enfriamiento

V_{pieza} : volumen pieza

A_{pieza} : área pieza

$$M_{maz} = 1.2 \cdot M_{enfriamiento} \quad [6]$$

$$M_{maz} = 0.87 [cm]$$

Donde:

M_{maz} : módulo de solidificación del alimentador

Con la finalidad de obtener un menor porcentaje de porosidad, es decir, se reduce al mínimo la posibilidad de aparición de porosidad y micro segregación, se utiliza el valor de 1,2 en la relación de módulos entre mazarota y pieza.

$$M_{maz} = \frac{V_{maz}}{A_{maz}} \quad [7]$$

$$V_{maz} = M_{maz} \cdot A_{maz}$$

$$\frac{\pi \cdot D_{maz}^2}{4} \cdot h_{maz} = M_{maz} \cdot \pi \cdot D_{maz} \cdot \left(h_{maz} + \frac{1}{2} D_{maz} \right)$$

$$D_{maz} = 5 \cdot M_{maz}$$

$$D_{maz} = 4.35 \text{ [mm]}$$

Entre los valores de D_{maz} se escoge el mayor $D_{maz} = 25.91 \text{ [mm]}$ por efectos de fabricación se trabajará con $D_{maz} = 26 \text{ [mm]}$.

Bebedero

Velocidad de vertido

A partir de la selección de las dimensiones del diseño de la caja se obtuvo que $h_1 = 20 \text{ [mm]}$ y $h_2 = 85 \text{ [mm]}$. Mediante la ecuación 8, se obtiene la velocidad de vertido.

$$V = \sqrt{2 \cdot g \cdot h_2} \quad [8]$$

$$V = 1.3 \left[\frac{m}{s} \right]$$

En la figura 1 se indica los puntos tomados para el cálculo del bebedero.

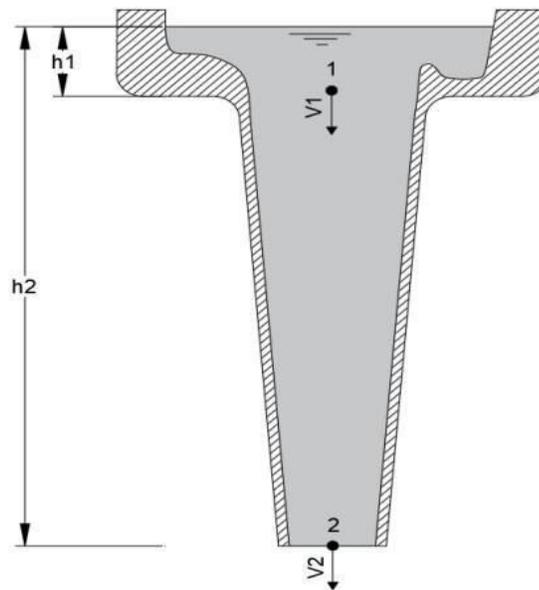


Figura 2. Puntos y alturas para el cálculo del bebedero.

Fuente: [40]

Donde:

v : velocidad de vertido

Tiempo de llenado

A continuación, se procede a calcular el tiempo de llenado mediante la ecuación de Mikhailov, la cual se muestra en la ecuación 9.

$$T = A \times \delta^m \times M^n \quad [9]$$

Tabla 2. Valores de las constantes A, m y n de la Ecuación de Mikhailov.

Metal	A	m	n
Acero	1,5	0,21	0,34
Hierro gris	0,76	0,23	0,5
Hierro maleable	1,89	0,43	0,5
Hierro nodular	0,97	0	0,5
Aluminio	1,42	0,18	0,5
Aluminio 2	1,7	0,334	0,334
Bronce	0,8	0,3	0,6
Aleaciones de magnesio	2,3	0,334	0,334

Fuente: [40]

$$T = 0.8 \times 30^{0.3} \times 7.83^{0.6}$$

$$T = 7.63 \text{ [s]}$$

Donde:

δ : espesor mínimo de la pieza [mm]

M: peso total de la pieza [Kg]; M: 7.83 [Kg]

A, m y n: constantes que dependen del metal de trabajo

T: tiempo de llenado

Altura efectiva de colada del bebedero

El cálculo de la altura efectiva de colado se determina mediante la ecuación 10. En la figura 3, se detallan las variables del sistema de alimentación que se requieren para realizar un llenado del molde por la línea de partición.



Figura 3. Esquema de llenado del molde por la línea de partición.

Fuente: [11]

Donde:

h: 8.5 [cm]

P: 1.5 [cm]

c: 3 [cm]

$$H = \frac{2 \times h \times c - P^2}{2 \times c} \quad [10]$$

$$H = \frac{2 \times 8.5 \times 3 - 1.5^2}{2 \times 3}$$

$$H = 9.625 \text{ [cm]}$$

Diámetro de la base del bebedero

El dimensionamiento de las diferentes partes de los conductos de llenado lo rige el teorema de Bernoulli representado en la ecuación 11. Este teorema, se basa en el principio de la conservación de la energía y relaciona la presión, la elevación del fluido a cualquier punto del sistema y las pérdidas por fricción en un sistema lleno de líquido [9].

$$P_{total} = \sqrt{2 \cdot g \cdot h_2} \cdot A_{beb_i} \cdot \rho \cdot t \cdot c \quad [11]$$

$$A_{beb_i} = \frac{P_{total}}{\sqrt{2 \cdot g \cdot h_2} \cdot \rho \cdot t \cdot c}$$

$$A_{beb_i} = 709 \text{ [mm}^2\text{]}$$

Donde:

P_{total} : peso total del sistema

g : gravedad

A_{beb_i} : área del bebedero

ρ : densidad

t : tiempo de llenado

Despejando el diámetro a partir de la ecuación 12 correspondiente a la ecuación para la obtención del área de un círculo.

$$A_{beb_i} = \pi \cdot \frac{D_{beb_i}^2}{4} \quad [12]$$

$$D_{beb_i} = \sqrt{\frac{A_{beb_i} \cdot 4}{\pi}}$$

$$D_{beb_i} = 30 \text{ [mm]}$$

El diámetro superior del bebedero se calcula a partir de la Ley de la continuidad de la masa expresada en la ecuación 13. Esta ley establece que para líquidos incompresibles y en un sistema con paredes impermeables, la velocidad de flujo es constante [9].

$$v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2 \quad [13]$$

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

$$\frac{\pi \cdot \left(\frac{D_{beb_s}}{2}\right)^2}{\pi \cdot \left(\frac{D_{beb_i}}{2}\right)^2} = \frac{\sqrt{2 \cdot g \cdot h_2}}{\sqrt{2 \cdot g \cdot h_1}}$$

$$\frac{D_{beb_s}}{D_{beb_i}} = \sqrt[4]{\frac{h_2}{h_1}}$$

$$D_{beb_s} = D_{beb_i} \cdot \sqrt[4]{\frac{h_2}{h_1}}$$

$$D_{beb_s} = 43.07 \text{ [mm]}$$

Donde:

D_{beb_i} : diámetro bebedero inferior

D_{beb_s} : diámetro bebedero superior

Taza de colado

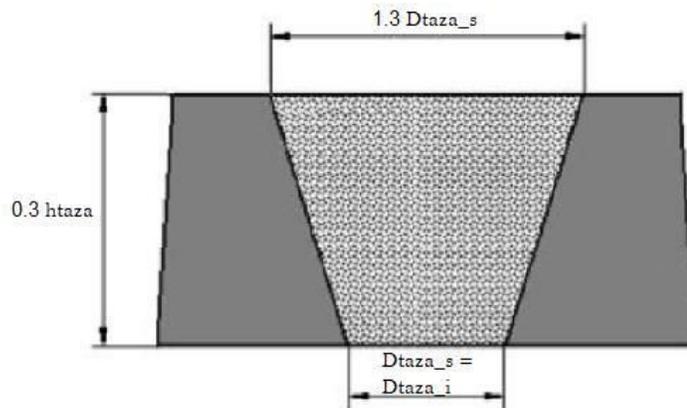


Figura 4. Dimensionamiento de la taza de colado.

Fuente: [11]

$$D_{taza_i} = D_{beb_s} \quad [14]$$

$$D_{taza_i} = 44 \text{ [mm]}$$

$$D_{taza_s} = 2.5 \cdot D_{taza_i} \quad [15]$$

$$D_{taza_s} = 110 \text{ [mm]}$$

Donde:

D_{taza_i} : diámetro de taza de colado inferior

D_{taza_s} : diámetro de taza de colado superior

Pozo de colada

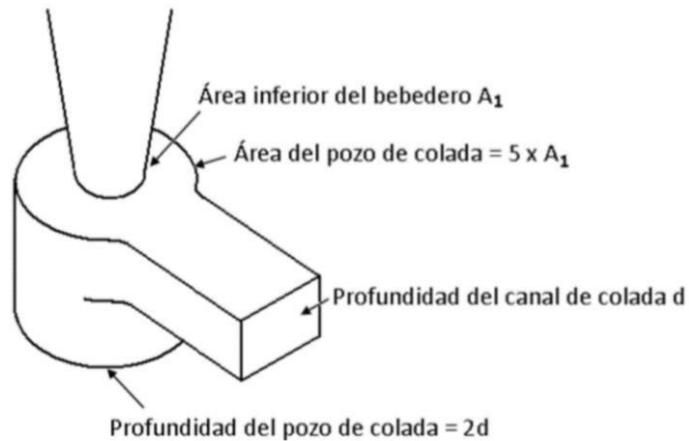


Figura 5. Dimensionamiento del pozo de colado.

Fuente: [11]

$$A_{pozo} = 5 \cdot A_{beb_i} \quad [16]$$

$$\pi \cdot \left(\frac{D_{pozo}}{2}\right)^2 = 5 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D_{beb_i}}{2}\right)^2$$

$$D_{pozo} = \sqrt{5} \cdot D_{beb_i}$$

$$D_{pozo} = 67.08 \text{ [mm]}$$

$$h_{pozo} = 2 \cdot h_{C_{colado}} \quad [17]$$

$$h_{pozo} = 36 \text{ [mm]}$$

Donde:

A_{pozo} : área del pozo de colado

A_{beb_i} : área del bebedero inferior

D_{pozo} : diámetro del pozo de colado

h_{pozo} : altura del pozo de colado

$h_{C_{colado}}$: altura del canal de colado

Canales de colado y ataque

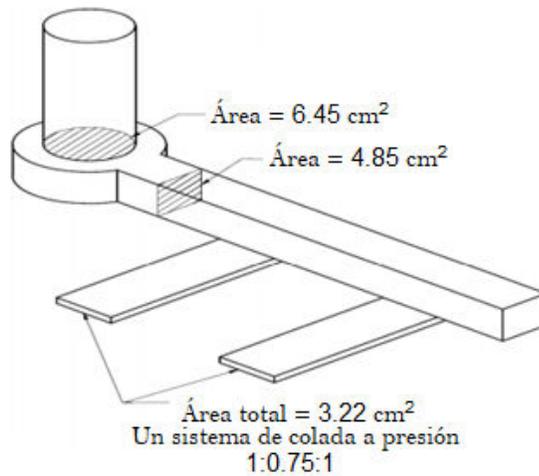


Figura 6. Relación de coladas en los canales de alimentación
Fuente: [11]

En este caso se prefirió tener un diseño de sección curva semicilíndrica con la relación de colada correspondiente al bronce de 1:1:1 mostrada en la tabla 3 con el propósito de que el llenado sea suave y la distribución del metal líquido a cada una de las piezas o molduras se produzca al mismo tiempo para que no existan diferencias microestructurales durante la etapa de solidificación y enfriamiento.

Tabla 3. Relación de colada más comunes.

Material	Relación
Acero	1:2:1,5
	1:3:3
	1:1:0,7
	1:2:2
Fundición Gris	1:3:3
	1:4:4
	1:1,3:1,1
Aluminio	1:2:4
	1:3:1
	1:3:3
Bronce	1:1:1
	1:1:3

Fuente: [11]

Para la realización del cálculo del diámetro de los alimentadores, se debe tener en cuenta que la sección inferior del bebedero debe mantenerse en cada uno de los alimentadores. Sustituyendo la ecuación 12 en la ecuación 18 y despejando el diámetro se obtiene el diámetro del alimentador.

$$A_{c_colada} = A_{beb_i} \quad [18]$$

$$A_{beb_i} = \pi \cdot \frac{D_{beb_i}^2}{4}$$

$$D_{alimentador} = \sqrt{\frac{A_{beb_i} \cdot 4}{\pi}}$$

$$D_{alimentador} = 30[\text{mm}]$$

Donde:

A_{c_colada} : área de canal de colado

A_{beb_i} : área del bebedero inferior

$D_{alimentador}$: diámetro del alimentador

Anexo III: Dimensionamiento para colado con probeta en posición vertical.

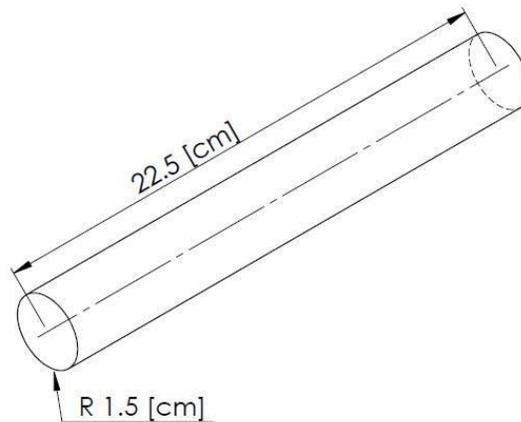


Figura 1. Pieza o moldura
Fuente: Propia

$$v = \pi \cdot r^2 \cdot h$$

$$v = \pi \cdot 1.5^2 \cdot 22.5$$

$$v = 159.043 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$v_{Total} = 3 \cdot v$$

$$v_{Total} = 3 \cdot 159.043$$

$$v_{Total} = 477.129 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$A_{Lateral} = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h$$

$$A_{Base} = \pi \cdot r^2$$

$$A_{Cilindro} = A_{Lateral} + A_{Base}$$

$$A_{Cilindro} = 2 \cdot \pi \cdot 1.5 \cdot 22.5 + \pi \cdot 1.5^2$$

$$A_{Cilindro} = 219.13 \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$A_{Total} = 3 \cdot A_{Cilindro}$$

$$A_{Total} = 3 \cdot 219.13$$

$$A_{Total} = 657.39 \text{ [cm}^2\text{]}$$

Donde:

v: volumen

r: radio

h: altura

m: masa

A: Área

Módulo de solidificación (Msp)

$$M_{sp} = \frac{\text{Volumen}}{\text{Área}}$$

$$M_{sp} = \frac{477.129}{657.39}$$

$$M_{sp} = 0.725 \text{ [cm]}$$

Módulo de solidificación del alimentador (Msa)

$$M_{sa} = 1.2 \times M_{sp} \text{ [cm]}$$

$$M_{sa} = 1.2 \times 0.725 \text{ [cm]}$$

$$M_{sa} = 0.87 \text{ [cm]}$$

El valor de 1,2 en la relación de módulos entre mazarota y pieza, esta se encuentra en su menor porcentaje de porosidad, es decir, se reduce al mínimo la posibilidad de aparición de porosidad y micro segregación.

Dimensiones del alimentador cilíndrico (Mazarota)

$$D_a = 5 \times M_{sa}$$

$$D_a = 4.35 \text{ [cm]}$$

$$H_a = 2 \times D_a$$

$$H_a = 8.7 \text{ [cm]}$$

$$V_a = \pi \times \left(\frac{D_a^3}{2}\right)$$

$$V_a = 129.3 \text{ [cm}^3\text{]}$$

Donde:

Da: Diámetro del alimentador
 Ha: Altura del alimentador
 Va: Volumen del alimentador

Número de alimentadores

$$N^{\circ}a = \frac{L \text{ [cm]}}{(Da \cdot Fd + E) \text{ [cm]}}$$

Tabla 1. Factor de distancia para diferentes metales o aleaciones.

Aleación	Factor de distancia
Acero 0.25% C	4.0
Aluminio 0.60%C	4.5
Aluminio 99.99 %	10.0
Aleaciones de cobre	6
Hierro gris (SC = 0.7%)	6.5
Hierro nodular C.E = 3.6	6.0
Hierro nodular C.E = 4.2	6.5

Fuente: [39]

$$N^{\circ}a = \frac{22.5 \text{ [cm]}}{(4.35 \cdot 6 + 3) \text{ [cm]}}$$

$$N^{\circ}a = 0.773$$

Como 0.773 es menor a 1, se determina que solo se necesita un alimentador.

El peso de la pieza (Pp)

$$m = \rho \cdot v \text{ [Kg]}$$

$$m = 8.7 \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right] \cdot 159.043 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$m = 1.383 \text{ [Kg]}$$

$$m_{Total} = 3 \cdot m \text{ [Kg]}$$

$$m_{Total} = 3 \cdot 1.383 \text{ [Kg]}$$

$$m_{Total} = 4.149 \text{ [Kg]}$$

$$Pp = 4.149 \text{ [Kg]}$$

Donde:

v: volumen

m: masa
 ρ: densidad
 Pp: Peso pieza

Peso total del alimentador (Pa)

$$Pa = Va \cdot \rho$$

$$Pa = 129.3 [\text{cm}^3] \cdot 8.7 \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]$$

$$Pa = 1.125 [\text{Kg}]$$

Peso total del sistema de colado (Psc)

$$Psc = Vsc \cdot \rho$$

$$Psc = 12.5 [\text{cm}^3] \cdot 8.7 \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]$$

$$Psc = 0.109 [\text{Kg}]$$

Peso total del molde (P_{total})

$$P_{total} = Pp + Pa + Psc$$

$$P_{total} = 4.149 + 1.125 + 0.109$$

$$P_{total} = 5.473 [\text{Kg}]$$

Tiempo de llenado

$$T = A \cdot \delta^m \cdot M^n$$

Tabla 2. Valores de las constantes A, m y n de la Ecuación de Mikhailov.

Metal	A	m	n
Acero	1,5	0,21	0,34
Hierro gris	0,76	0,23	0,5
Hierro maleable	1,89	0,43	0,5
Hierro nodular	0,97	0	0,5
Aluminio	1,42	0,18	0,5
Aluminio 2	1,7	0,334	0,334
Bronce	0,8	0,3	0,6
Aleaciones de magnesio	2,3	0,334	0,334

Fuente: [40]

$$T = 0.8 \times 30^{0.3} \times 5.473^{0.6}$$

$$T = 6.15 [s]$$

Donde:

δ : espesor mínimo de la pieza [mm]

M: peso total de la pieza [Kg]

A, m y n: constantes que dependen del metal de trabajo

Cálculo del gasto másico del metal

$$Q = \frac{\sqrt{w}}{(0.86 + (1.04 \times B))}$$

$$Q = \frac{\sqrt{12.07 [lb]}}{(0.86 + (1.04 \cdot 1.18 [plg]))}$$

$$Q = 1.66 \left[\frac{lb}{s} \right]$$

$$Q = 1.66 \left[\frac{lb}{s} \right] \cdot 0.454 \left[\frac{gr}{lb} \right]$$

$$Q = 0.75 \left[\frac{gr}{s} \right]$$

Donde:

W: Peso de metal en el molde [lb]

B: Espesor crítico de la pieza [plg]

Q: gasto másico [gr/s]

Cálculo de la altura efectiva de colada del bebedero

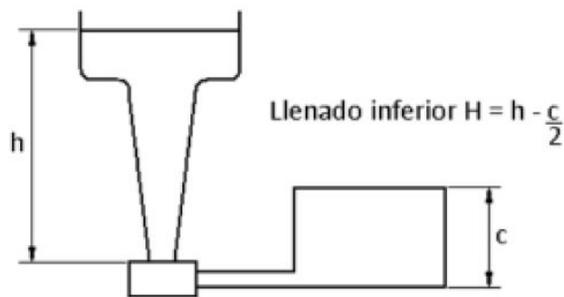


Figura 2. Esquema de llenado del molde por la línea de partición.

Fuente: [11]

Donde:

$h = 27.4$ [cm]
 $C = 22.5$ [cm]
 $H =$ Altura efectiva

$$H = h \times \frac{c}{2}$$

$$H = 27.4 \times \frac{22.5}{2}$$

$$H = 16.15$$
 [cm]

Cálculo del área de control del proceso

$$Q = V \cdot A \cdot \delta$$

$$A = \frac{Q}{V \cdot \delta}$$

$$A = \frac{Q}{\sqrt{2 \cdot g \cdot h} \cdot \delta}$$

$$A = \frac{0.75 \left[\frac{g}{s} \right]}{\sqrt{2 \times 981 \left[\frac{cm}{s^2} \right] \times 16.15 \text{ [cm]} \times 8.7 \left[\frac{g}{cm^3} \right]}}$$

$$A = 0.488$$
 [cm²]

Donde:

$$V = \sqrt{2 \times g \times h}$$

Cálculo del diámetro inferior del bebedero ($D_{inferior}$)

$$A_b = \frac{\pi \times D^2}{4}$$

$$D_{inferior} = \sqrt{\frac{4 \times A}{\pi}}$$

$$D_{inferior} = \sqrt{\frac{4 \times 0.668 \text{ [cm}^2\text{]}}{\pi}}$$

$$D_{inferior} = 0.788$$
 [cm]

Cálculo del diámetro superior del bebedero ($D_{superior}$)

$$D_{superior} = D_{inferior} \times \sqrt[4]{\frac{H}{H_t}}$$

$$D_{superior} = 0.92 \times \sqrt[4]{\frac{16.15}{3}}$$

$$D_{superior} = 1.40 \text{ [cm]}$$

Taza de colado

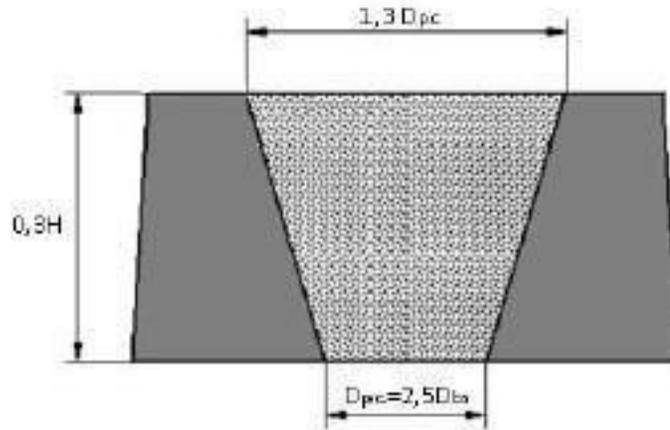


Figura 3. Dimensionamiento de la taza de colado.
Fuente: [11]

$$D_{taza_i} = 2.5 \cdot D_{beb_s}$$

$$D_{taza_i} = 35 \text{ [mm]}$$

$$D_{taza_s} = 1.3 \cdot D_{taza_i}$$

$$D_{taza_s} = 45.5 \text{ [mm]}$$

Donde:

D_{taza_i} : diámetro de taza de colado inferior

D_{taza_s} : diámetro de taza de colado superior

Pozo de colada

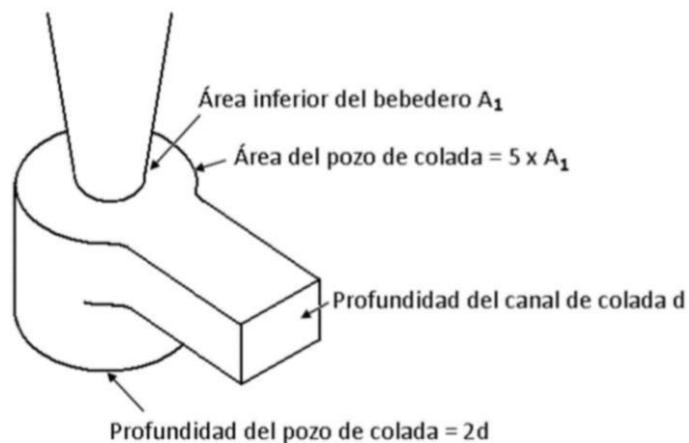


Figura 4. Dimensionamiento del pozo de colado.
Fuente: [11]

$$A_{pozo} = 5 \cdot A_{beb_i}$$

$$\pi \cdot \left(\frac{D_{pozo}}{2}\right)^2 = 5 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D_{beb_i}}{2}\right)^2$$

$$D_{pozo} = \sqrt{5} \cdot D_{beb_i}$$

$$D_{pozo} = 17.76 \text{ [mm]}$$

$$h_{pozo} = 2 \cdot h_{C_{colado}}$$

$$h_{pozo} = 30 \text{ [mm]}$$

Donde:

A_{pozo} : área del pozo de colado

A_{beb_i} : área del bebedero inferior

D_{pozo} : diámetro del pozo de colado

h_{pozo} : altura del pozo de colado

$h_{C_{colado}}$: altura del canal de colado

Canales de colado y ataque

$$A_{c_{colada}} = A_{beb_i}$$

$$A_{c_{colada}} = \left(\frac{B_{mayor} + b_{menor}}{2}\right) \cdot h$$

$$A_{beb_i} = \left(\frac{B_{mayor} + b_{menor}}{2}\right) \cdot h$$

$$2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{D_{beb_i}}{2}\right)^2 = \left(\frac{2a + a}{2}\right) \cdot 2a$$

$$a = \sqrt{\frac{\pi \cdot D_{beb_i}^2}{3}}$$

$$a = 7.23 \text{ [mm]}$$

Donde:

$A_{c_{colada}}$: área de canal de colado

A_{beb_i} : área del bebedero inferior

B_{mayor} : base mayor trapecio

b_{menor} : base menor trapecio

h : altura trapecio

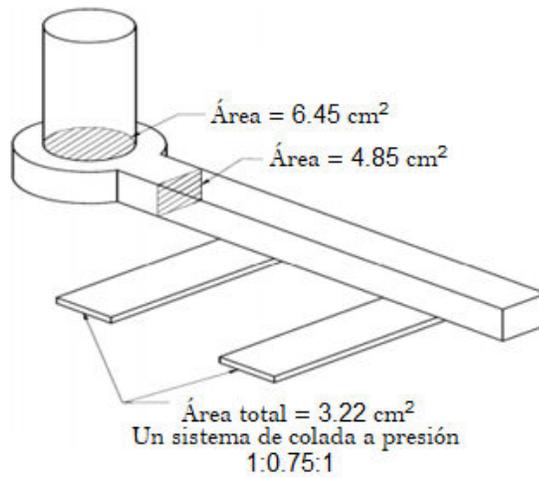


Figura 5. Relación de coladas en los canales de alimentación
Fuente: [11]

Tabla 3. Relación de colada más comunes.

Material	Relación	
Acero	1:2:1,5	
	1:3:3	
	1:1:0,7	
	1:2:2	
Fundición		
	Gris	1:3:3
		1:4:4
	1:1,3:1,1	
Aluminio	1:2:4	
	1:3:1	
	1:3:3	
Bronce	1:1:1	
	1:1:3	

Fuente: [11]

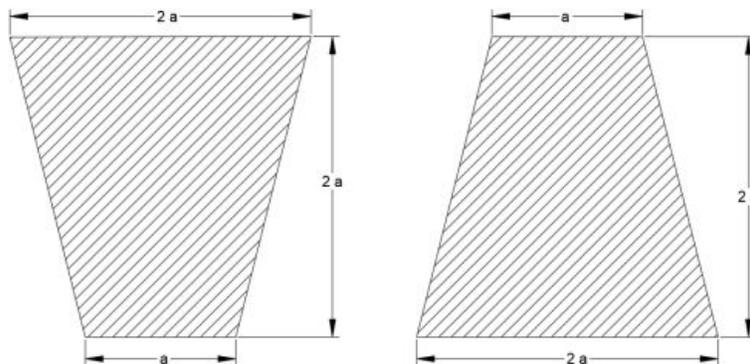


Figura 6. Dimensionamiento del canal de colado
Fuente: [40]

Tabla 4. Dimensiones del canal de colado y ataque.

Dimensión	Colada	Ataque
B_{mayor} [mm]	15	15
b_{menor} [mm]	8	8
$h_{canal\ colada}$ [mm]	15	15

Cálculo de la velocidad del metal en la entrada del molde para el sistema de referencia

Se utiliza la ecuación de Torricelli

$$V = \sqrt{2 \times g \times h}$$

$$V = \sqrt{2 \times 9.81 \left[\frac{m}{s} \right] \times 0.225[m]}$$

$$V = 2.1 \left[\frac{m}{s} \right]$$

Anexo IV: Códigos para plaquetas y portaherramientas

Clave de códigos

A Torno

B Torno y torneado

C Roscado

D Fresado

E Taladrado

F Mandrino

G Soporte de la herramienta

H Maquinabilidad

Otros datos

Clave de códigos

1. Forma de plaqueta

80° 55° 50° 45° 40° 35° 30° 25° 20° 15° 10° 5°

2. Ángulo de incidencia de la plaqueta

0° 15° 30° 45° 60° 75° 90° 105° 120° 135° 150° 165° 180°

3. Tipo de plaqueta

A M T G T

4. Tipo de plaqueta

A M T G T

5. Tamaño de plaqueta = longitud del filo

mm: 06-25 07-15 06-32 09-25 06-27 11-16 06-08

7. Radio de punta

RE

02 RE = 0.2
04 RE = 0.4
08 RE = 0.8
12 RE = 1.2
16 RE = 1.6
24 RE = 2.4

8. Geometría: opción del fabricante

El fabricante puede añadir dos símbolos adicionales al código para identificar la geometría de la plaqueta, p. ej.:

-PF = ISO P acabado
-MR = ISO M desbaste

B. Sistema de sujeción

D Sujeción rígida (RC)

M Sujeción por cara superior y por el agujero

P Sujeción por el agujero

S Sujeción por tornillo

D. Sentido de la herramienta

R Tipo a la derecha
L Tipo a la izquierda
N Neutro

E. Altura del mango

F. Anchura de mango

G. Longitud de la herramienta

Longitud de la herramienta = l_1 en mm

H = 100
K = 125
M = 150
P = 170
Q = 180
R = 200
S = 250
T = 300
U = 350
V = 400
W = 450
Y = 500

A 65

Clave de códigos

A Torno

B Torno y torneado

C Roscado

D Fresado

E Taladrado

F Mandrino

G Soporte de la herramienta

H Maquinabilidad

Otros datos

Clave de códigos

Clave de códigos para plaquetas y portaherramientas: SISTEMA MÉTRICO

Extracto de ISO 1832:1991

PLAQUETA

Tolerancias: 1 2 3 4

Grosor de plaqueta: 5 6 7 8

Radio de punta: 12 04 08 - PM

1. Forma de plaqueta

2. Ángulo de incidencia de la plaqueta

5. Tamaño de plaqueta = longitud del filo

PORTAHERRAMIENTAS

Exterior

B C L N R 25 25 M 12

B 1 C 2 D E F G 5

Interior

A 25 T D C L N R 12

H J G B 1 C 2 D 5

Tamaño del acoplamiento
Coromant Capto®

Diámetro de barra
S = Barra entera de acero
A = Barra de acero con suministro de refrigerante
E = Barra con mango de metal duro
F = Barra antivibratoria con mango de metal duro

Tipo de portaherramientas

A 64

Anexo V: Informe del ensayo de composición química



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

DEPARTAMENTO DE MATERIALES

LABORATORIO DE FUNDICIÓN

INFORME TÉCNICO



Solicitado por: Ing. Carlos Wime Díaz Msc.

Tipo de Trabajo: Espectrometría por chispa

Fecha: 17 de diciembre del 2020

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

Descripción: Muestras de material metálico

1. ANTECEDENTES.

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

Se solicita realizar la prueba de espectrometría 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:

Tabla 1.- Identificación gráfica de las muestras analizadas

Nombre	Identificación de la probeta	Identificación Gráfica
MUESTRAS METÁLICA	M-20-045-CI	
	M-20-045-A1-H	

MUESTRAS METÁLICA	M-20-045-A1-V	
	M-20-045-A2-H	
	M-20-045-A2-V	
	M-20-045-A3-H	
	M-20-045-A3-V	
	M-20-045-A4-H	

MUESTRAS METÁLICA	M-20-045-A4-V	
	M-20-045-B1-H	
	M-20-045-B1-V	
	M-20-045-B2-H	
	M-20-045-B2-V	
	M-20-045-B3-H	

	M-20-045-B3-V	
	M-20-045-B4-H	
	M-20-045-B4-V	

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 tomaron 2 mediciones en distintos puntos del espécimen y finalmente se promedió su valor:

Tabla 2.- Valores de composición química, parte 1

	M-20-045-CI	M-20-045-A1-H	M-20-045-A1-V	M-20-045-A2-H	M-20-045-A2-V	M-20-045-A3-H	M-20-045-A3-V	M-20-045-A4-H	M-20-045-A4-V
Componente	Valor [%]								
Cinc [Zn]	40,89	39,41	39,63	40,11	40,08	40,32	40,00	38,91	38,78
Plomo [Pb]	2,406	---	---	0,0059	0,0052	---	---	---	---
Estaño [Sn]	0,018	0,0051	0,0055	0,0049	0,0048	---	---	---	---
Hierro [Fe]	0,065	0,169	0,167	0,517	0,514	0,051	0,050	0,034	0,035
Níquel [Ni]	0,046	0,017	0,017	0,0044	0,0044	0,0036	0,0036	0,0036	0,0035
Silicio [Si]	---	0,436	0,457	0,926	0,968	1,485	1,578	1,904	1,881
Aluminio [Al]	---	---	---	0,334	0,335	0,019	0,017	---	---
Arsénico [As]	0,015	---	---	---	---	---	---	---	---
Cobre [Cu]	56,56	59,97	59,73	58,09	58,07	58,12	58,35	59,15	59,31
TOTAL [%]	100,00	100,00	100,00	99,99	99,99	99,99	99,99	100,00	100,00

Tabla 3.- Valores de composición química, parte 2

	M-20-045-B1-H	M-20-045-B1-V	M-20-045-B2-H	M-20-045-B2-V	M-20-045-B3-H	M-20-045-B3-V	M-20-045-B4-H	M-20-045-B4-V
Componente	Valor [%]							
Cinc [Zn]	41,13	41,01	40,22	39,73	38,59	38,56	39,62	39,81
Plomo [Pb]	---	---	0,0069	0,0093	0,0044	0,0041	0,0031	0,0048
Estaño [Sn]	---	---	0,0048	0,0056	---	---	---	---
Hierro [Fe]	0,194	0,196	0,339	0,338	0,878	0,601	1,024	0,847
Níquel [Ni]	0,0046	0,0043	0,0040	0,0046	---	0,0037	0,0034	0,0035
Silicio [Si]	0,424	0,445	0,958	0,958	1,420	1,600	1,889	1,863
Aluminio [Al]	0,0032	---	0,336	0,334	0,0038	0,0023	0,055	0,048
Arsénico [As]	---	---	---	---	---	---	---	---
Cobre [Cu]	58,25	58,34	58,13	58,62	59,10	59,23	57,40	57,42
TOTAL [%]	100,00	99,99	99,99	99,99	99,99	100,00	99,99	99,99



Ing. Luis G. Huilca

Técnico Responsable



Ing. Oscar Sotomayor Msc.

**Jefe del Laboratorio de
Fundición.**



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

Anexo VI: Resistencia a la tracción y porcentaje de elongación

Probetas	Código	Resistencia a la tracción	% elongación en 50
		[ksi]	[mm]
C38500	20-045-C1-01	60.9	19.6
	20-045-C1-02	62.3	16
	20-045-C1-03	59.1	18.8
	20-045-C1-04	60.6	13.8
	20-045-C1-05	59.4	15.3
	20-045-C1-06	63.7	23.1
Cu-Zn-0.5Si	20-045-A1-11	32.9	15.6
	20-045-A1-12	35	10.2
	20-045-A1-13	37.8	19.2
	20-045-A1-21	36.2	19.1
	20-045-A1-22	54.6	58.8
	20-045-A1-23	31.8	31.8
Cu-Zn-1Si	20-045-A2-11	74.3	8.7
	20-045-A2-12	71.2	8.1
	20-045-A2-13	78.6	10.4
	20-045-A2-21	61.5	4.7
	20-045-A2-22	33.3	2
	20-045-A2-23	53.3	4.9
Cu-Zn-1.5Si	20-045-A3-11	68.8	8.3
	20-045-A3-12	53.1	7
	20-045-A3-13	52.7	3.3
	20-045-A3-21	69.8	10.4
	20-045-A3-22	64.6	4.6
	20-045-A3-23	61.4	4.8
Cu-Zn-2Si	20-045-A4-11	47.7	3.5
	20-045-A4-12	57.8	7
	20-045-A4-13	52.4	5.9
	20-045-A4-21	52.8	8.1
	20-045-A4-22	18.1	4.4
	20-045-A4-23	60	4.5
Cu-Zn-0.5FeSi	20-045-B1-11	59.6	41.4
	20-045-B1-12	56.3	23.1
	20-045-B1-13	15.3	3.5
	20-045-B1-21	56.4	29.6
	20-045-B1-22	29.4	9.3
	20-045-B1-23	23.4	7.5
Cu-Zn-1FeSi	20-045-B2-11	65.7	22.1
	20-045-B2-12	17.1	1.4
	20-045-B2-13	48.6	10.8
	20-045-B2-21	17.6	5.3
	20-045-B2-22	48.2	11.6
	20-045-B2-23	58.1	14.3
Cu-Zn-1.5FeSi	20-045-B3-11	53.6	14.9
	20-045-B3-12	39	6.3
	20-045-B3-13	35.4	3.9
	20-045-B3-21	38.3	8.2
	20-045-B3-22	41.4	9.3
	20-045-B3-23	22.1	2.2
Cu-Zn-2FeSi	20-045-B4-11	50	5.1
	20-045-B4-12	50.6	6
	20-045-B4-13	28.6	2.5
	20-045-B4-21	50.9	5
	20-045-B4-22	-	-
	20-045-B4-23	24.8	2.9

Fuente: Propia.

Anexo VII: Informe del ensayo de tracción mecánica



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
MECÁNICA



LABORATORIO DE ANÁLISIS
DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES

F01-PE-LAEV-01 Rev.00

INFORME

LAEV – M20.062

Quito, 27 de octubre de 2020

Solicitado por: Msc. Carlos Díaz
Persona de contacto: Joao Heredia, Jefferson Medina
Teléfono: 0985944993
Correo: joao.heredia@epn.edu.ec
Fecha de recepción: 21/10/2020
Fecha de ejecución: 21/10/2020-22/10/2020
ORDEN DE TRABAJO Nº: DM-OT10083-2020

1. **MUESTRAS:** Cincuenta y tres (53) probetas metálicas para ensayo de tracción.
2. **GENERALIDADES E IDENTIFICACIÓN:**

La siguiente descripción fue proporcionada por el cliente:

Título de la tesis: ESTUDIO DE LA MICROESTRUCTURA Y DE LA AQUINABILIDAD DE UNA ALEACIÓN COBRE CINC (CU-ZN) AL ADICIONAR SILICIO Y FERRO SILICIO EN SU COMPOSICIÓN

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

Tabla 1. Identificación de las muestras

Id. cliente	Id. LAEV
20-045-C1 (01-06)	M20.062.01 – M20.062.06
20-045-A1 (11-23)	M20.062.07 – M20.062.12
20-045-A2 (11-23)	M20.062.13 – M20.062.18
20-045-A3 (11-23)	M20.062.19 – M20.062.24
20-045-A4 (11-23)	M20.062.25 – M20.062.30
20-045-B1 (11-23)	M20.062.31 – M20.062.36
20-045-B2 (11-23)	M20.062.37 – M20.062.42
20-045-B3 (11-23)	M20.062.43 – M20.062.48
20-045-B4 (11-23)	M20.062.49 – M20.062.53



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

3. CONDICIONES AMBIENTALES:

Temperatura: $25,6 \pm 1,8$ °C

Humedad relativa: $33,1 \pm 4,6$ %

4. ENSAYO DE TRACCIÓN

En las tablas 2 a la 10 se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de tracción.

Tabla 2. Resistencia a la tracción del grupo 20-045-C1

Id.	Diámetro promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción		% elongación en 50 mm
	mm	lbf	N	ksi	MPa	
M20.062.01	12,71	11 974	53 261	60,9	419,8	19,6 *
M20.062.02	12,72	12 262	54 545	62,3	429,2	16,0
M20.062.03	12,66	11 538	51 324	59,1	407,7	18,8 *
M20.062.04	12,66	11 824	52 594	60,6	417,8	13,8 *
M20.062.05	12,68	11 620	51 688	59,4	409,3	15,3 *
M20.062.06	12,84	12 788	56 883	63,7	439,3	23,1 *

Tabla 3. Resistencia a la tracción del grupo 20-045-A1

Id.	Diámetro promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción		% elongación en 50 mm
	mm	lbf	N	ksi	MPa	
M20.062.07	12,81	6 568	29 215	32,9	226,7	15,6
M20.062.08	12,74	6 917	30 768	35,0	241,4	10,2
M20.062.09	12,77	7 503	33 375	37,8	260,6	19,2
M20.062.10	12,80	7 217	32 102	36,2	249,5	19,1
M20.062.11	12,79	10 882	48 405	54,6	376,8	58,8
M20.062.12	12,75	6 298	28 014	31,8	219,4	14,7

Tabla 4. Resistencia a la tracción del grupo 20-045-A2

Id.	Diámetro promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción		% elongación en 50 mm
	mm	lbf	N	ksi	MPa	
M20.062.13	12,82	14 867	66 133	74,3	512,3	8,7
M20.062.14	12,77	14 136	62 879	71,2	490,9	8,1
M20.062.15	12,93	15 999	71 168	78,6	542,0	10,4
M20.062.16	12,84	12 347	54 920	61,5	424,1	4,7
M20.062.17	12,78	6 625	29 471	33,3	229,7	2,0
M20.062.18	12,77	10 579	47 057	53,3	367,4	4,9



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



Tabla 5. Resistencia a la tracción del grupo 20-045-A3

id.	Diámetro promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción		% elongación en 50 mm
	mm	lbf	N	ksi	MPa	
M20.062.19	12,79	13 700	60 941	68,8	474,3	8,3 *
M20.062.20	12,79	10 574	47 034	53,1	366,1	7,0
M20.062.21	12,80	10 518	46 785	52,7	363,6	3,3 *
M20.062.22	12,83	13 993	62 245	69,8	481,5	10,4
M20.062.23	12,85	12 984	57 755	64,6	445,3	4,6 *
M20.062.24	12,81	12 270	54 581	61,4	423,5	4,8 *

Tabla 6. Resistencia a la tracción del grupo 20-045-A4

id.	Diámetro promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción		% elongación en 50 mm
	mm	lbf	N	ksi	MPa	
M20.062.25	12,85	9 581	42 617	47,7	328,6	3,5
M20.062.26	12,76	11 462	50 987	57,8	398,7	7,0
M20.062.27	12,92	10 644	47 347	52,4	361,1	5,9
M20.062.28	12,86	10 628	47 274	52,8	364,0	8,1
M20.062.29	12,78	3 607	16 044	18,1	125,1	4,4
M20.062.30	12,88	12 123	53 928	60,0	413,9	4,5 *

Tabla 7. Resistencia a la tracción del grupo 20-045-B1

id.	Diámetro promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción		% elongación en 50 mm
	mm	lbf	N	ksi	MPa	
M20.062.31	12,85	11 977	53 275	59,6	410,8	41,4
M20.062.32	12,75	11 137	49 538	56,3	388,0	23,1 *
M20.062.33	12,77	3 045	13 544	15,3	105,8	3,5
M20.062.34	12,80	11 250	50 043	56,4	388,9	29,6
M20.062.35	12,78	5 838	25 969	29,4	202,4	9,3
M20.062.36	12,73	4 624	20 568	23,4	161,6	7,5

Tabla 8. Resistencia a la tracción del grupo 20-045-B2

id.	Diámetro promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción		% elongación en 50 mm
	mm	lbf	N	ksi	MPa	
M20.062.37	12,83	13 159	58 534	65,7	452,8	22,1
M20.062.38	12,78	3 398	15 117	17,1	117,8	1,4
M20.062.39	12,81	9 717	43 224	48,6	335,4	10,8
M20.062.40	12,83	3 523	15 670	17,6	121,2	5,3
M20.062.41	12,78	9 580	42 615	48,2	332,2	11,6
M20.062.42	12,83	11 649	51 818	58,1	400,8	14,3



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



Tabla 9. Resistencia a la tracción del grupo 20-045-B3

Id.	Diámetro promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción		% elongación en 50 mm
	mm	lbf	N	ksi	MPa	
M20.062.43	12,74	10 595	47 129	53,6	369,7	14,9 *
M20.062.44	12,75	7 721	34 344	39,0	269,0	6,3 *
M20.062.45	12,75	7 010	31 183	35,4	244,2	3,9
M20.062.46	12,77	7 606	33 831	38,3	264,1	8,2
M20.062.47	12,78	8 224	36 583	41,4	285,2	9,3
M20.062.48	12,79	4 401	19 578	22,1	152,4	2,2 *

Tabla 10. Resistencia a la tracción del grupo 20-045-B4

Id.	Diámetro promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción		% elongación en 50 mm
	mm	lbf	N	ksi	MPa	
M20.062.49	12,80	9 966	44 331	50,0	344,5	5,1 *
M20.062.50	12,75	10 007	44 515	50,6	348,7	6,0
M20.062.51	12,78	5 637	25 077	28,4	195,5	2,5 *
M20.062.52	12,78	10 121	45 021	50,9	351,0	5,0
M20.062.53	12,83	4 966	22 088	24,8	170,8	2,9

Los porcentajes marcados con * corresponden a ensayos en los que la fractura se produce fuera de los 50 mm marcados.

Nota.- Los resultados contenidos en el presente informe corresponden únicamente a las muestras ensayadas por el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones (LAEV).

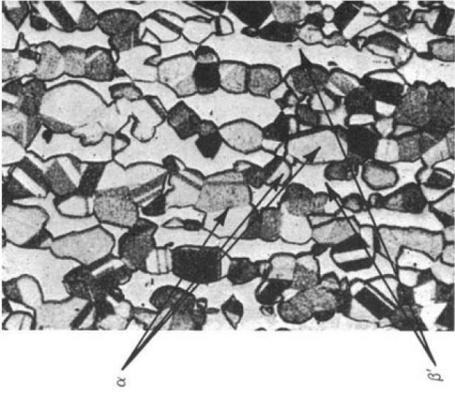
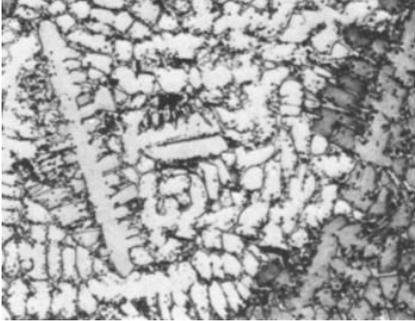
	REVISADO POR:	APROBADO POR:
Firma:		
Nombre:	Ing. Jonathan Castro, M.Sc.	Ph.D. Wilson Guachamán
Cargo:	ESPECIALISTA DE LABORATORIO	JEFE
		

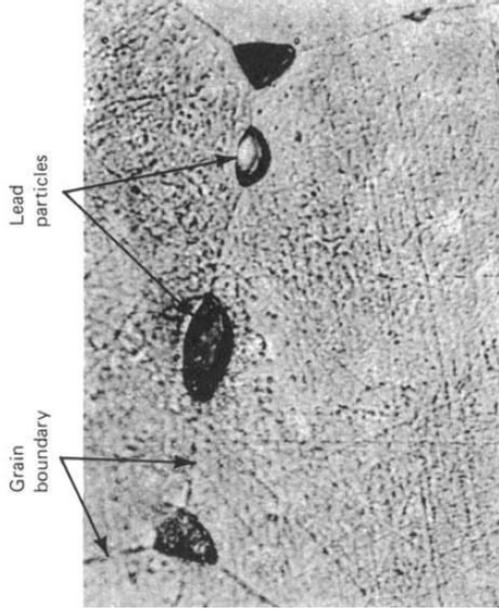
Anexo VIII: Dureza del material en escala Rockwell B

Probeta	Dureza [HRB]	Promedio [HRB]	Probeta	Dureza [HRB]	Promedio [HRB]
20-045-C1	65	63.2	20-045-A4-21	81	80.4
	61			81	
	61			80	
	64			80	
	65			80	
20-045-A2-13	85	85.8	20-045-B1-11	50	51
	87			51	
	85			53	
	86			52	
	86			49	
20-045-A2-21	84	83.2	20-045-B2-11	64	64.6
	83			64	
	82			65	
	83			65	
	84			65	
20-045-A3-11	80	78.8	20-045-B2-23	68	67.8
	81			68	
	74			68	
	78			68	
	81			67	
20-045-A3-21	83	81.8	20-045-B4-12	62	56.4
	80			46	
	82			47	
	81			52	
	83			75	
20-045-A4-12	79	79.2	20-045-B4-21	80	81
	80			79	
	80			82	
	79			81	
	78			83	

(Fuente: Propia)

Anexo IX: Microestructuras referenciales de aleaciones Cu-Zn

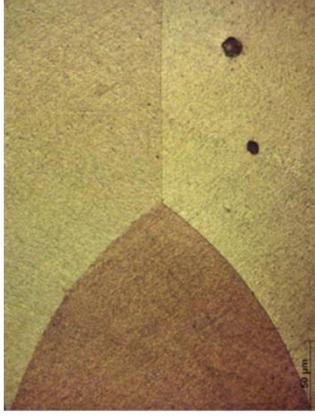
MICROESTRUCTURA	INFORMACIÓN
	<p>Microestructura típica de metal Muntz recocido (Cu-40Zn). Las regiones claras y blancas son β', y las regiones oscuras y grises son α. Micrografía de luz; 250x [18].</p>
	<p>Aleación C36000 (latón de corte libre), con dendritas primarias de fase α oscuras. El plomo aparece como pequeños esferoides. 50x [56].</p>



Microestructura de una aleación Cu-3Pb, que muestra la configuración de las partículas de plomo típicas de las aleaciones de base de cobre con plomo. Micrografía iluminada; 1000x [18].



El silicio primario se muestra en forma de poliedros irregulares y de color gris azulado [57].



Composición: Cu-48%Zn (Latón β').

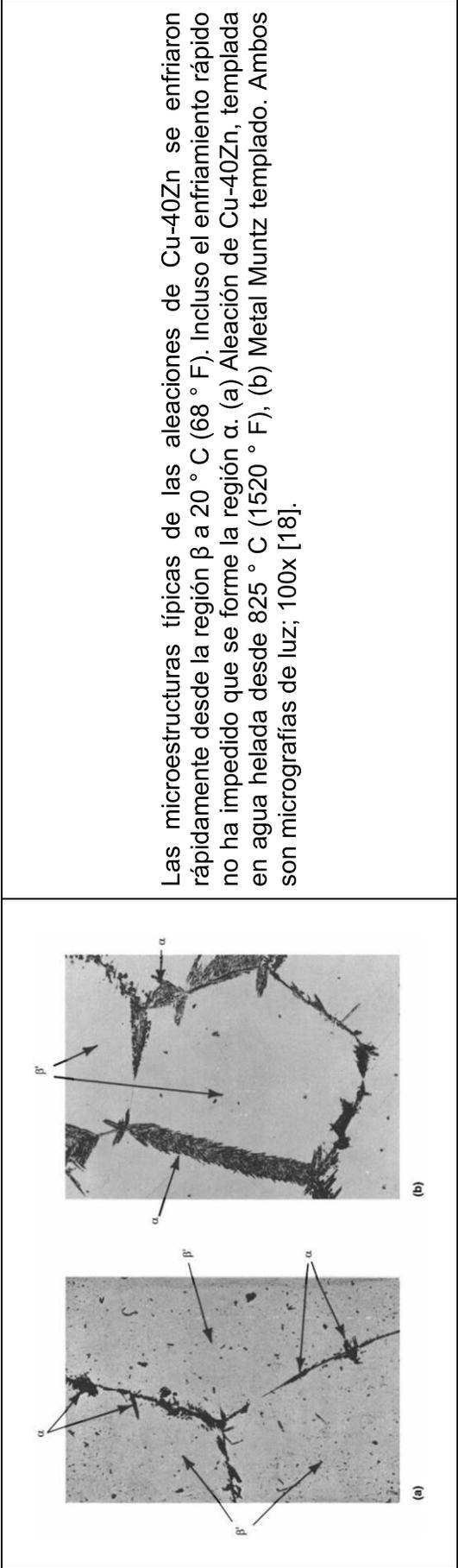
Procesado: Moldeado en arena.

Ataque: Inmersión durante 1 min en solución alcohólica de FeCl_3 .

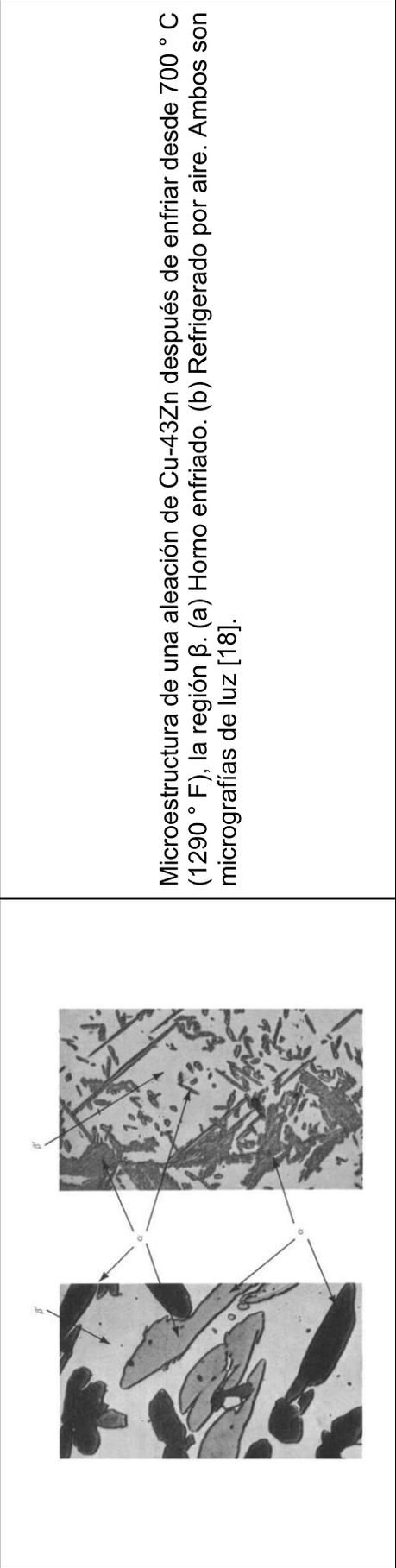
Su composición, según el diagrama de equilibrio Cu-Zn, corresponde a un campo monofásico β que se extiende en todo el intervalo de temperatura. La fase β , por enfriamiento, transforma a una fase ordenada β' entre 454 y 468°C. Esta fase es frágil, por lo que este tipo de latones se suele utilizar para soldas y no tienen otra utilización industrial. La microestructura muestra una distribución de granos columnares típica de un proceso de moldeo. Se observan también granos equiaxiales en la periferia, aunque con una distribución irregular debido a que la velocidad de enfriamiento no fue la misma en toda la pared del molde. La micrografía a mayores aumentos muestra tanto el carácter monofásico de esta aleación como la ausencia de micro segregación. Se observa como en la confluencia de tres granos se forman ángulos de 120°, intentando alcanzar el equilibrio de las tensiones superficiales [58].



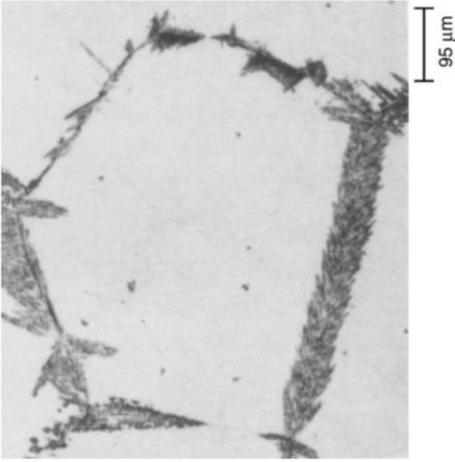
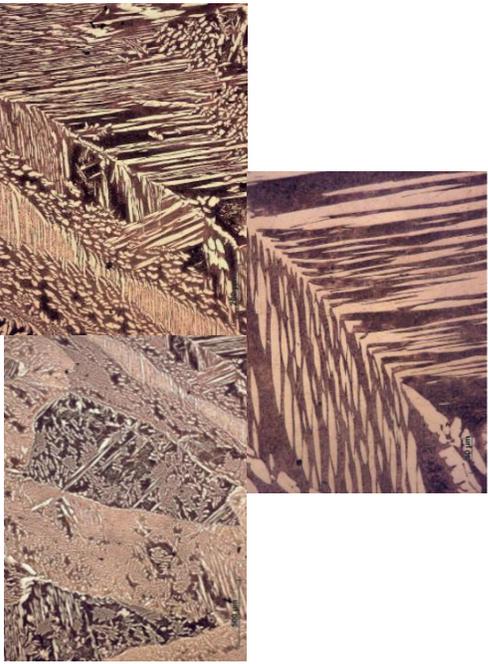
Microestructuras de aleación Cu-42Zn templadas de la región β y luego recalentadas para desarrollar una estructura α de precipitado. La temperatura de recalentamiento más alta da una estructura más gruesa y por lo tanto un material más blando. Todo β' . Templado desde 800 ° C (1470 ° F) [18].



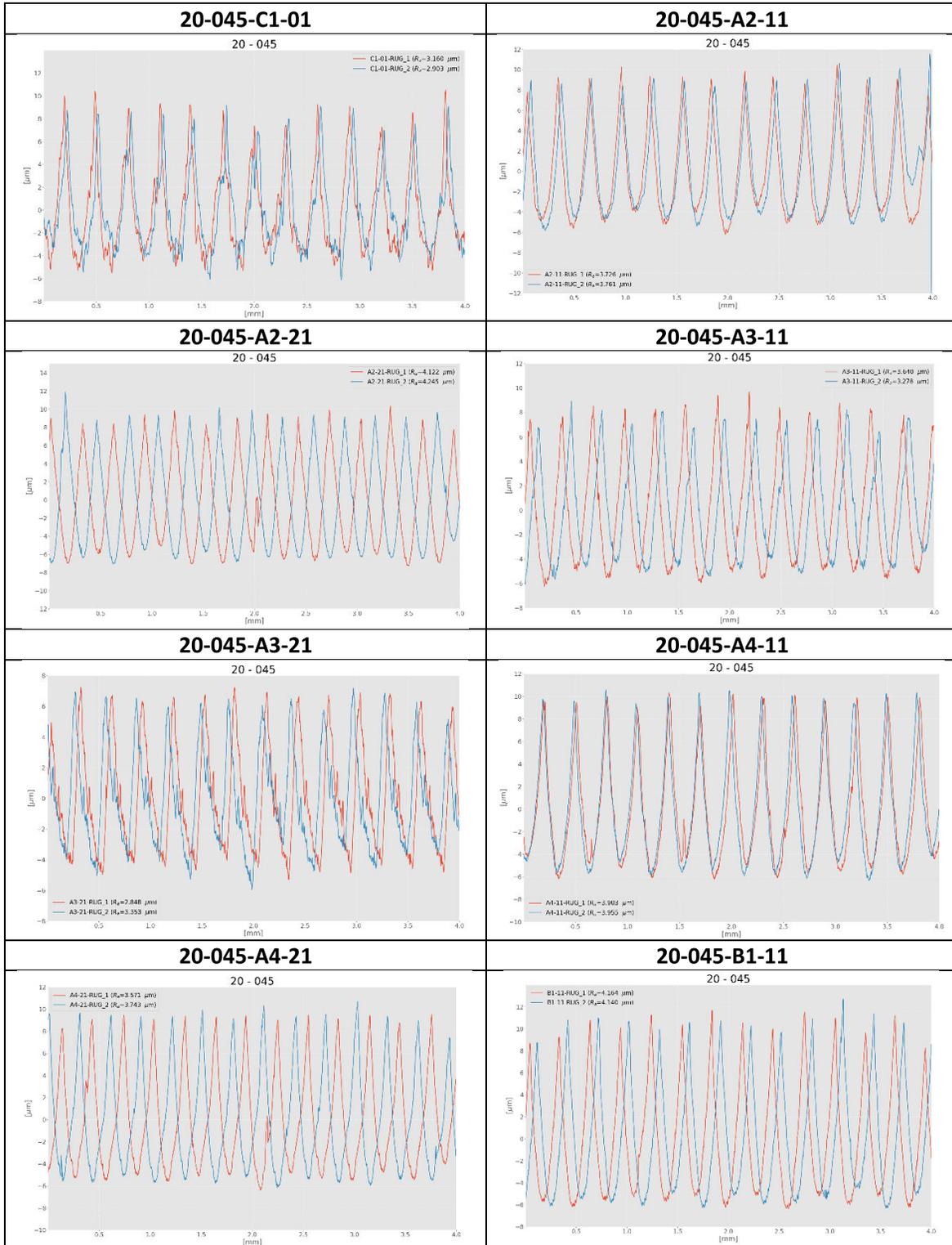
Las microestructuras típicas de las aleaciones de Cu-40Zn se enfriaron rápidamente desde la región β a 20 ° C (68 ° F). Incluso el enfriamiento rápido no ha impedido que se forme la región α . (a) Aleación de Cu-40Zn, templada en agua helada desde 825 ° C (1520 ° F), (b) Metal Muntz templado. Ambos son micrografías de luz; 100x [18].



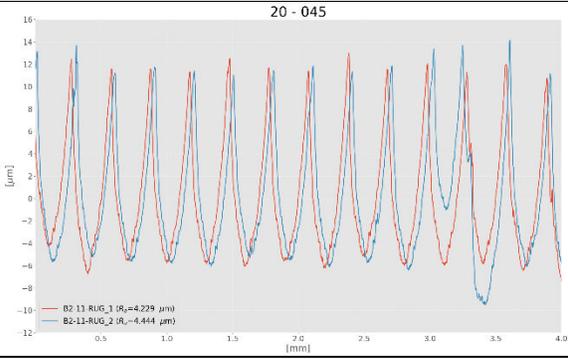
Microestructura de una aleación de Cu-43Zn después de enfriar desde 700 ° C (1290 ° F), la región β . (a) Homo enfriado. (b) Refrigerado por aire. Ambos son micrografías de luz [18].

	<p>Lingote de aleación C28000 (metal de Muntz), fundido, mostrando α plumas que se formaron en β límites de grano durante el enfriamiento de la estructura β. 105x [56].</p>
	<p>Composición: Cu-42%Zn.</p> <p>Procesado: Moldeado en arena.</p> <p>Ataque: Inmersión durante 30 s en solución alcohólica de FeCl_3.</p> <p>En la macrografía se observan granos columnares rodeados por otros equiaxiales y una cierta subestructura. Los granos corresponden a la fase β, primera en solidificar durante el enfriamiento desde el estado líquido (ver diagrama de equilibrio), mientras que la subestructura se debe a la precipitación de fase α (más rica en Cu). Esta última fase nuclea en zonas de alta energía como los límites de grano y crece en ciertos planos activos de la fase matriz β, formando una estructura tipo Widmanstätten, en la que los cristales de α adoptan formas de agujas más o menos anchas. En las micrografías se observa que el ataque tiende a oscurecer la fase β, dejando de color claro la fase α [58].</p>

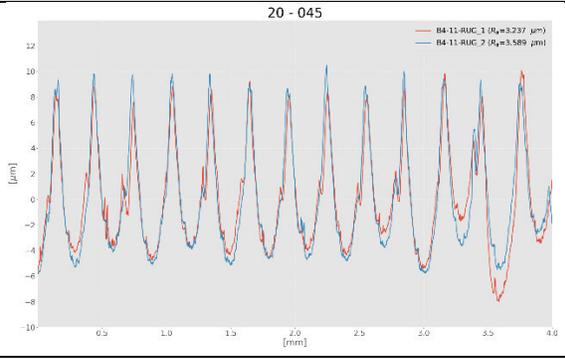
Anexo X: Gráficas de la rugosidad media aritmética



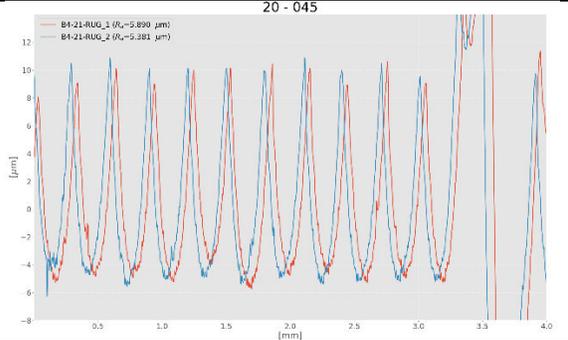
20-045-B2-11



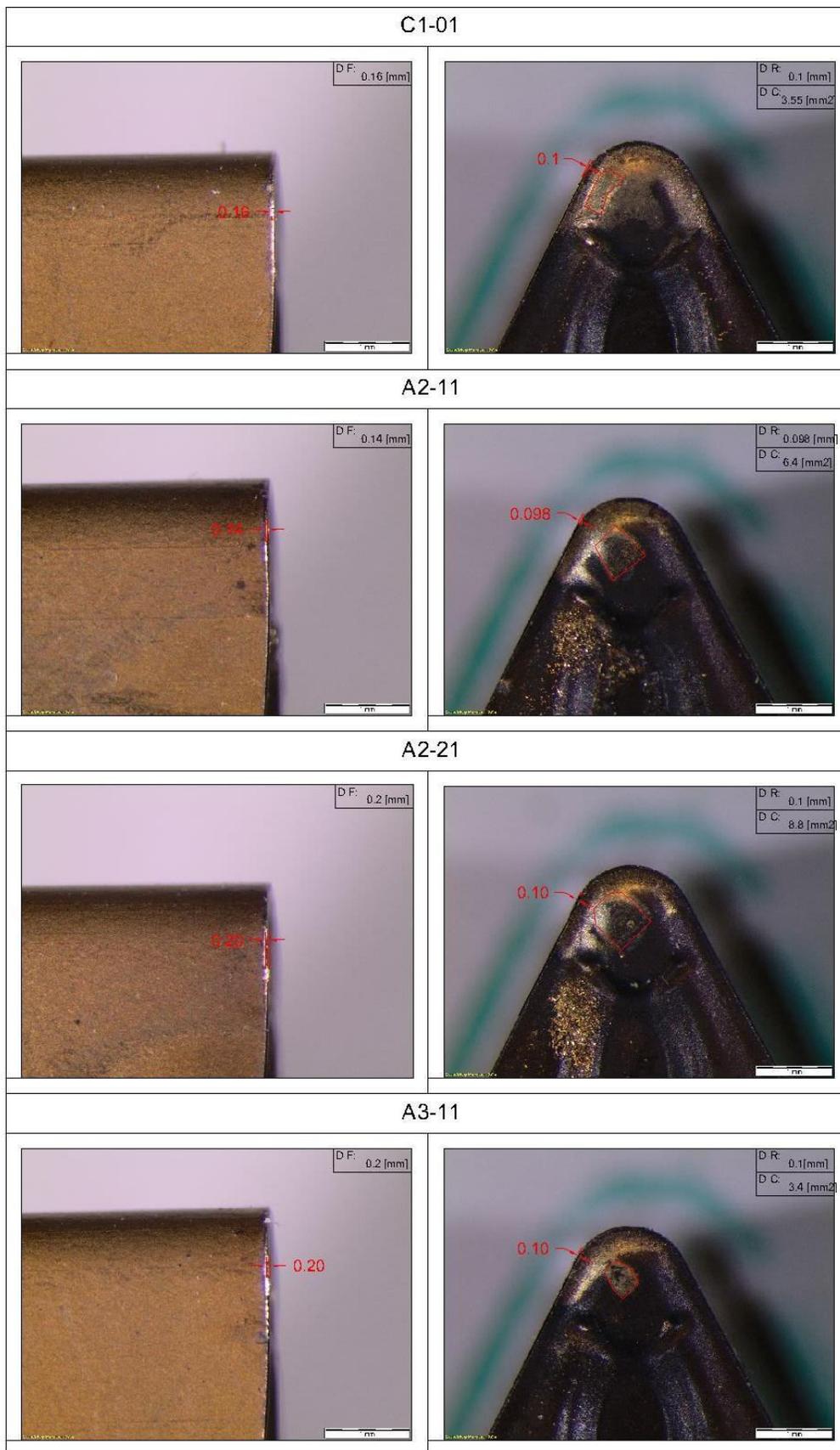
20-045-B4-11



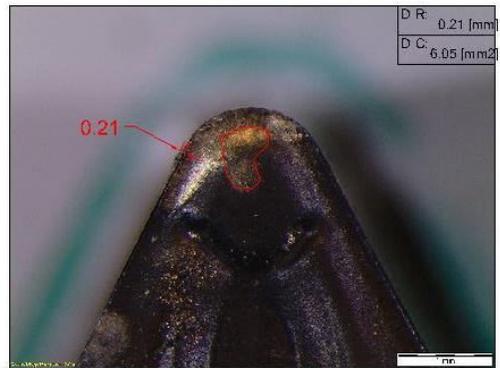
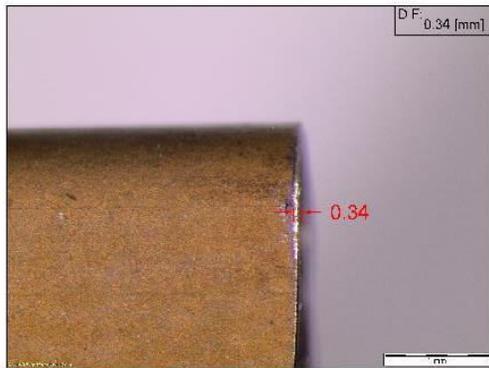
20-045-B4-21



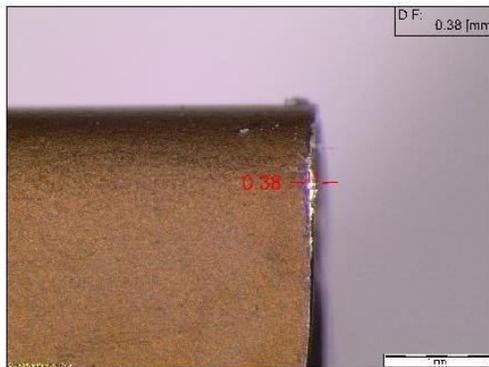
Anexo XI: Zona de desgaste de los insertos



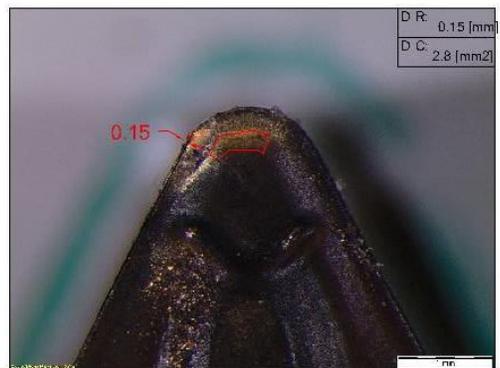
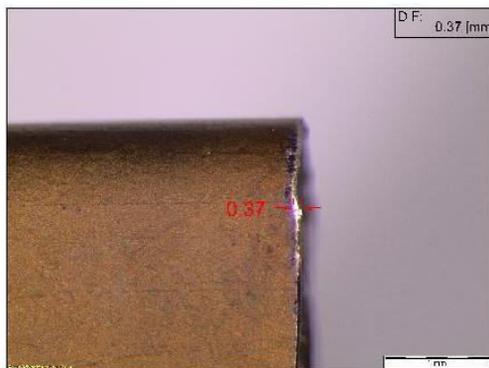
A3-21



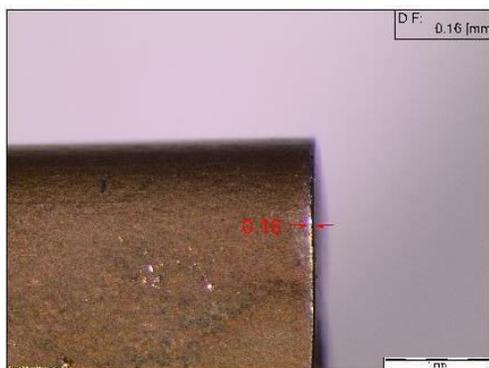
A4-11



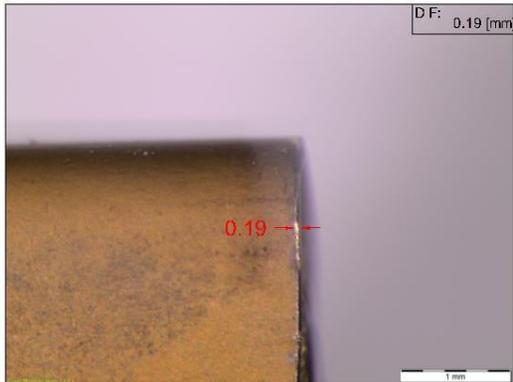
A4-21



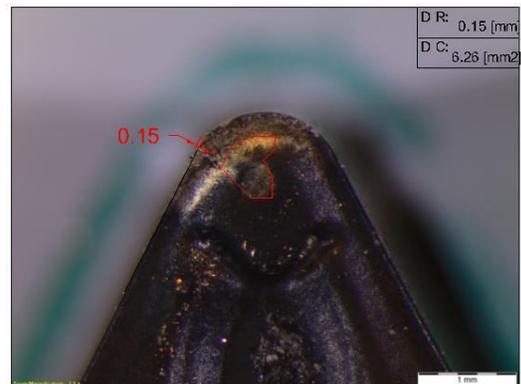
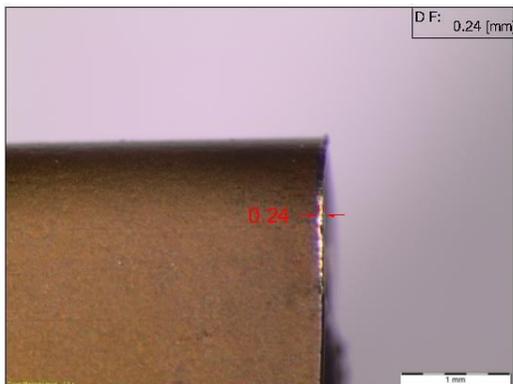
B1-11



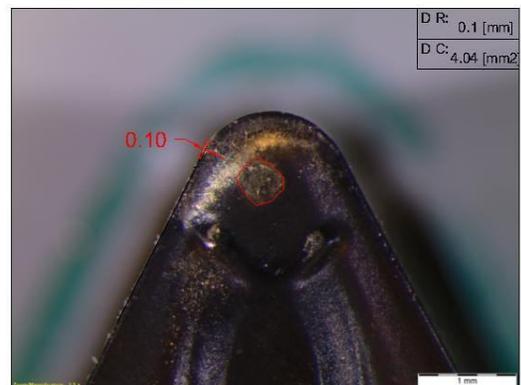
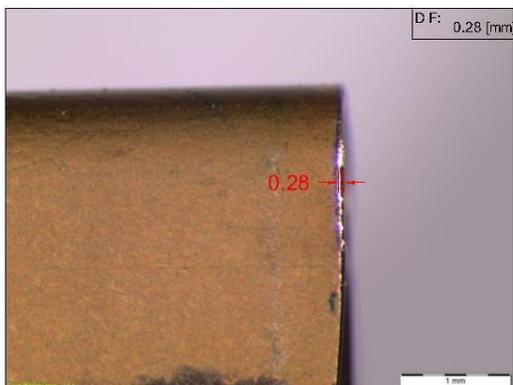
B2-11



B4-11



B4-21



DF: Desgaste del Flanco
DR: Desgaste del Radio
DC: Desgaste en Cráter

Anexo XII: Diagrama ternario de solubilidad parcial Cu-Zn-Si

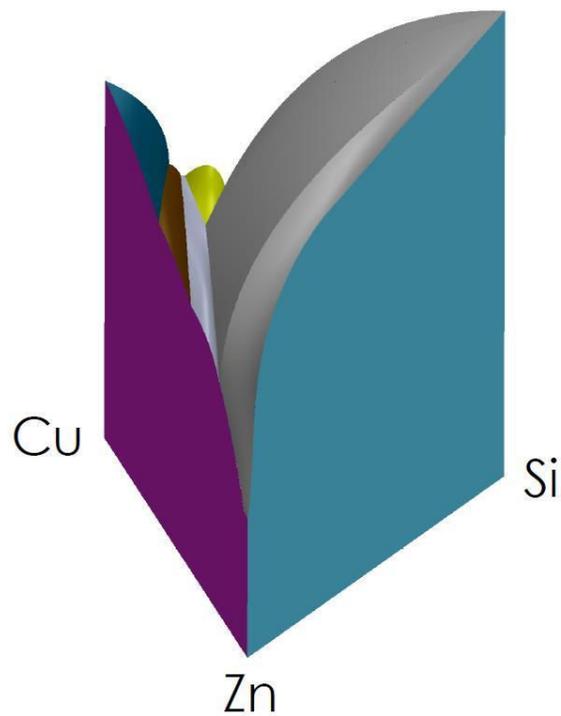


Figura1: Diagrama ternario de solubilidad parcial Cu-Zn-Si.
Fuente: Propia.

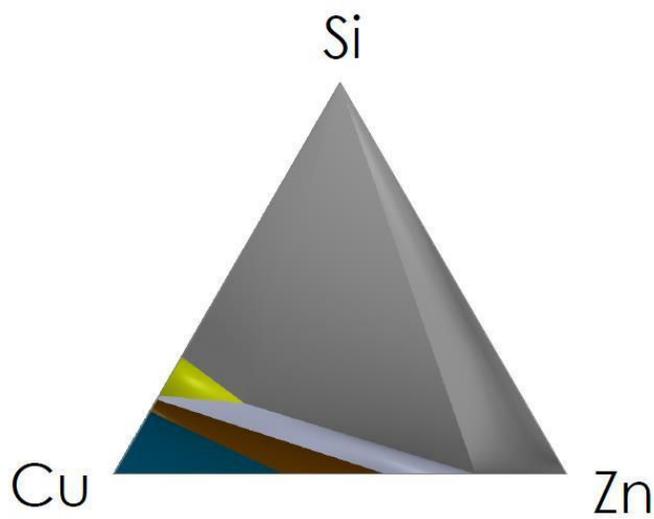
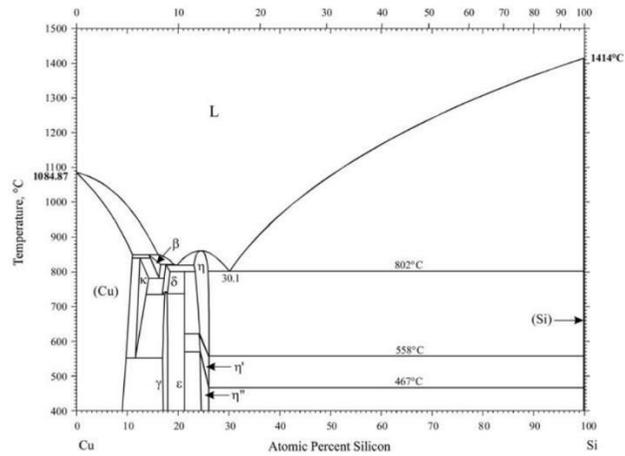


Figura 2: Diagrama ternario Cu-Zn-Si proyecciones líneas de liquidus.
Fuente: [59].

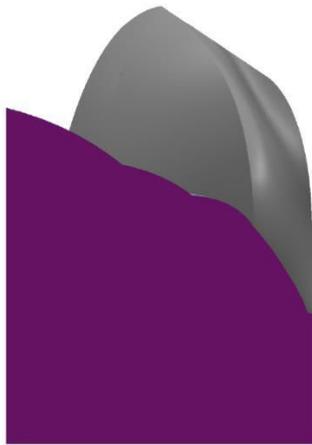


a)

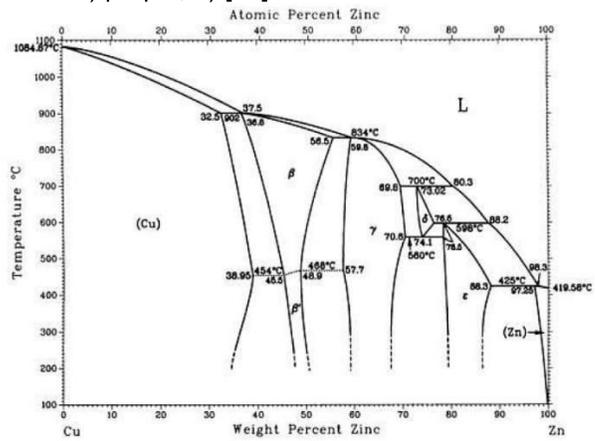


b)

Figura 3: a) Diagrama de fase ternario Cu -Si, b) Diagrama de fase binario Cu-Si. Fuente: a) propia, b) [60].

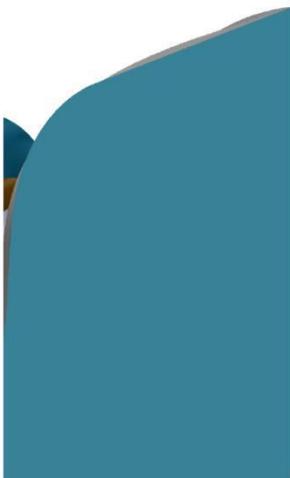


a)

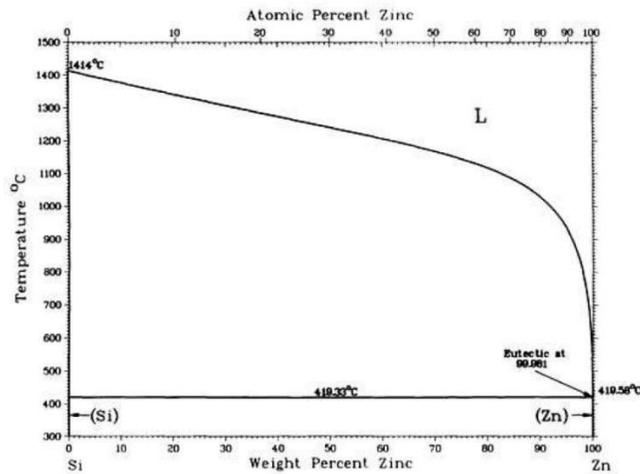


b)

Figura 4: a) Diagrama de fase ternario Cu -Zn, b) Diagrama de fase binario Cu-Zn. Fuente: a) propia, b) [60].



a)



b)

Figura 5: a) Diagrama de fase ternario Si -Zn, b) Diagrama de fase binario Si-Zn. Fuente: a) propia, b) [60].

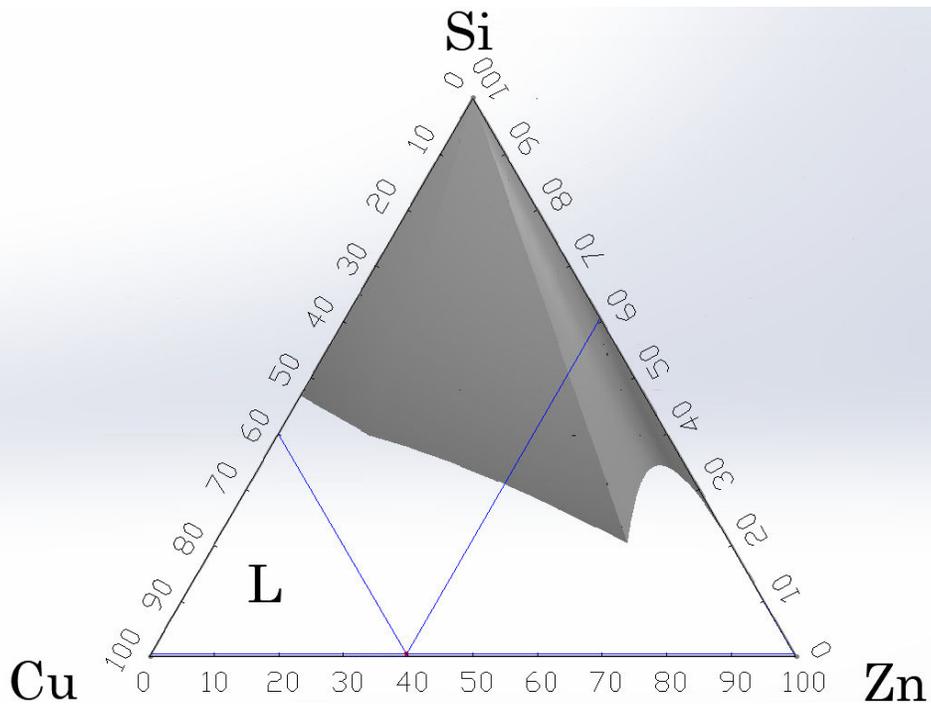


Figura 6: Diagrama ternario Cu-Zn-Si. Temperatura 1100 [°C] con un 0.5 % en peso de Si.
Fuente: Propia.

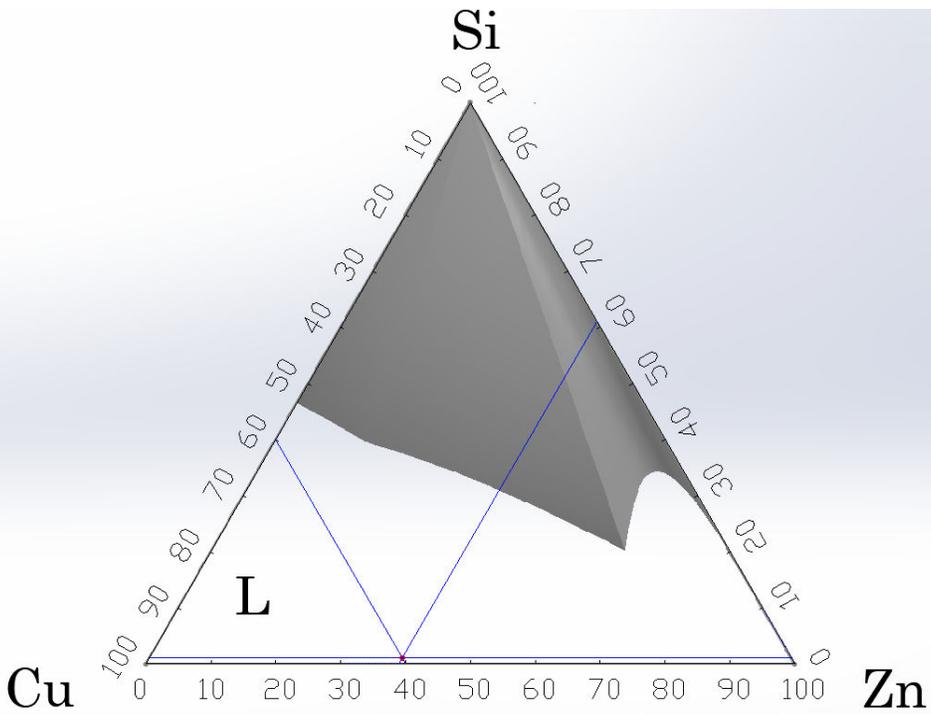


Figura 7: Diagrama ternario Cu-Zn-Si. Temperatura 1100 [°C] con un 1 % en peso de Si.
Fuente: Propia.

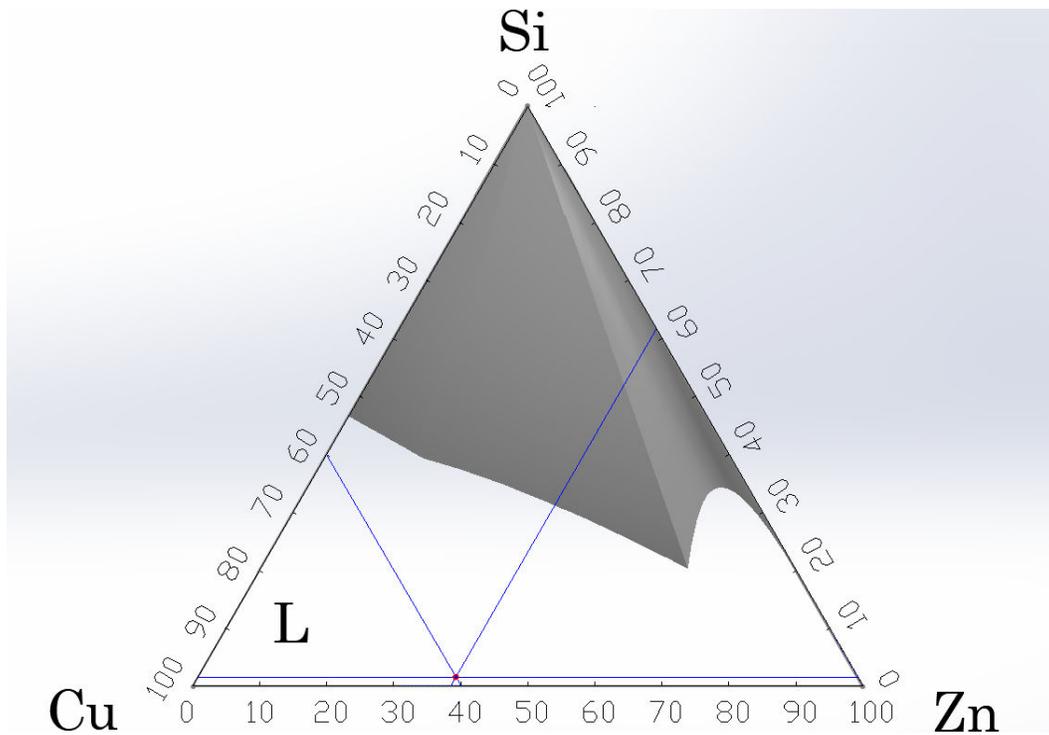


Figura 8: Diagrama ternario Cu-Zn-Si. Temperatura 1100 [°C] con un 1.5 % en peso de Si.

Fuente: Propia.

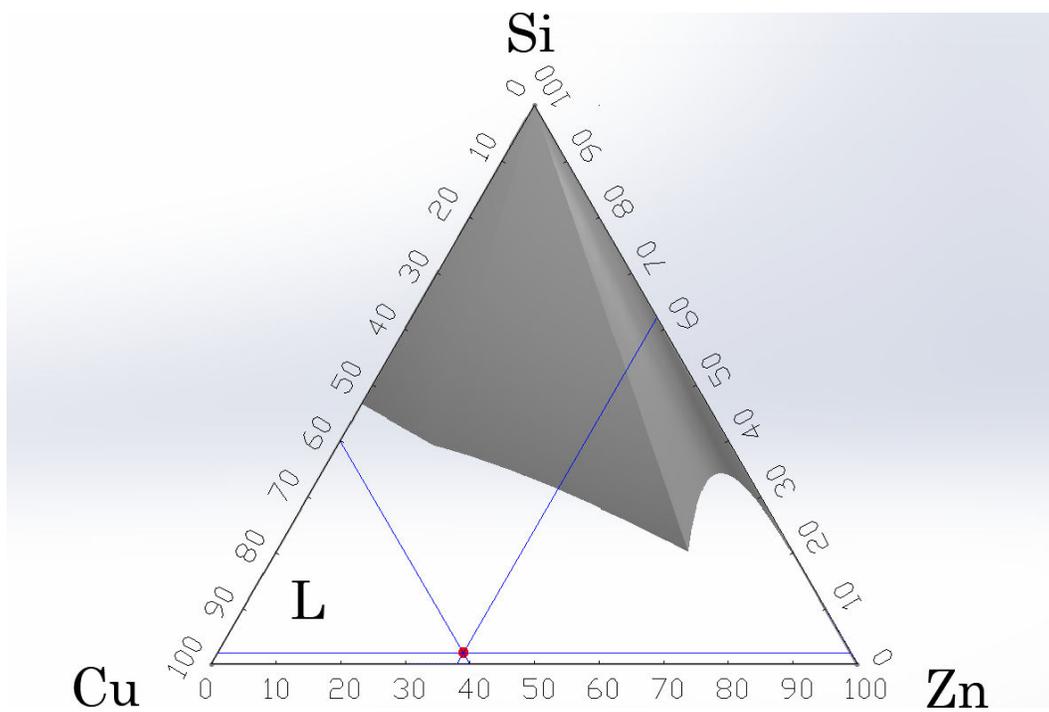
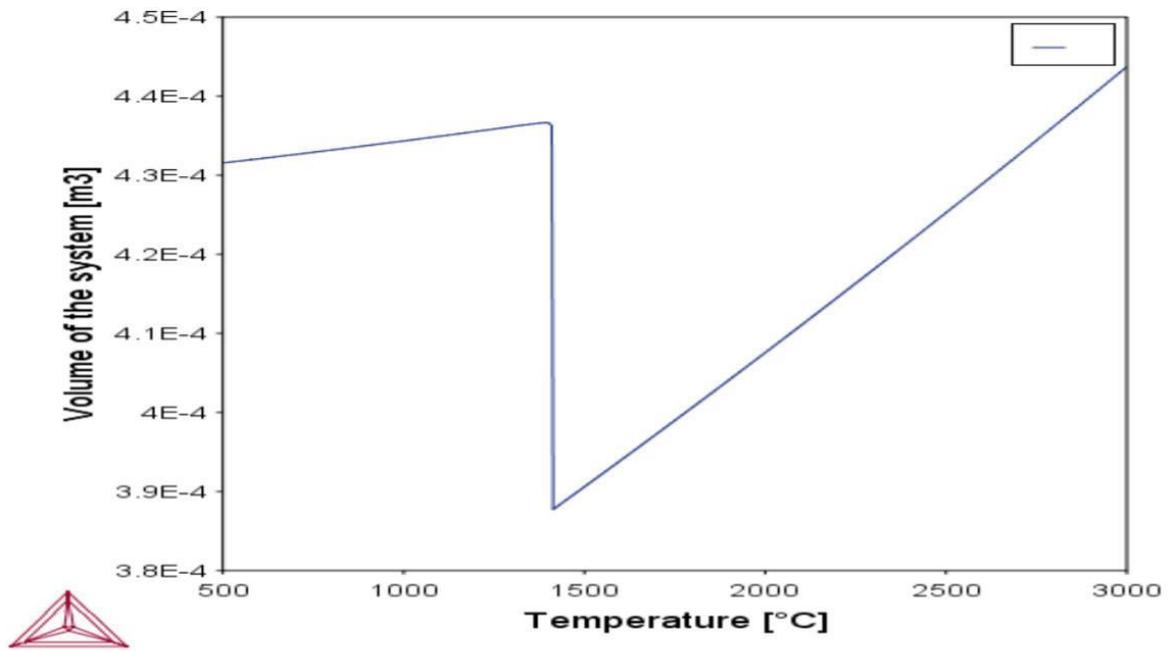


Figura 9: Diagrama ternario Cu-Zn-Si. Temperatura 1100 [°C] con un 2 % en peso de Si.

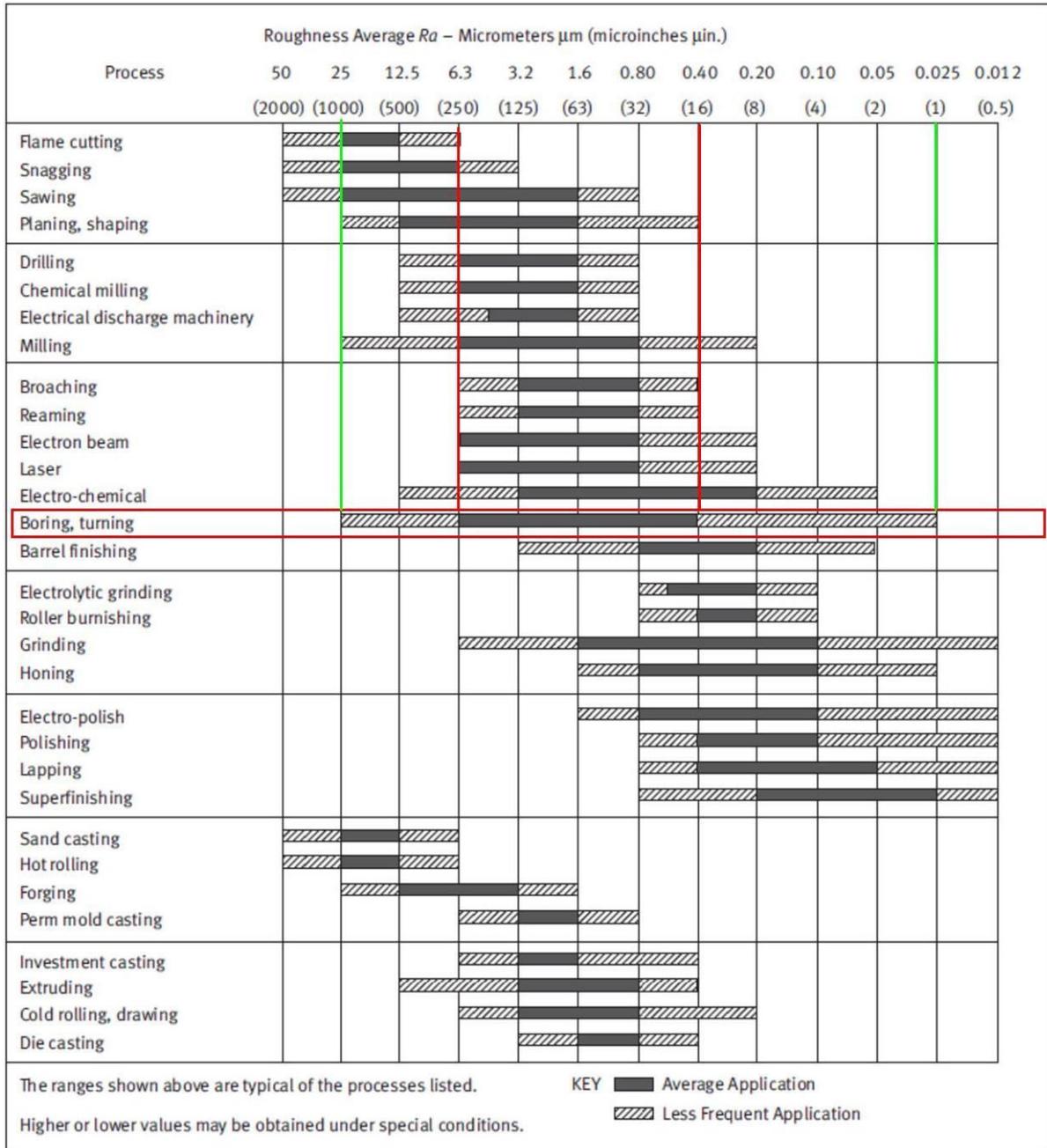
Fuente: Propia.

Anexo XIII: Variación del volumen ocupado por 1 [kg] de silicio



(Fuente: [54])

Anexo XIV: Rugosidad para procesos de torneado de acuerdo con la norma ASME B46.1



(Fuente: [34])

Anexo XV: Morfología de la viruta para procesos de torneado de acuerdo con la ISO 3685.

1 Planas	 1.1 Largas	 1.2 Cortas	 1.3 Enmarañadas
2 Tubulares	 2.1 Largas	 2.2 Cortas	 2.3 Enmarañadas
3 Espirales	 3.1 Planas	 3.2 Cónicas	
4 Helicoidales	 4.1 Largas	 4.2 Cortas	 4.3 Enmarañadas
5 Helicoidal cónica	 5.1 Largas	 5.2 Cortas	 5.3 Enmarañadas
6 Arqueadas	 6.1 Sueltas	 6.2 Conectadas	
7 Fragmentadas	 7. Fragmentadas		
8 Aciculares	 8. Aciculares		

(Fuente: [61])