



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

**EFECTO DE LA SUSTITUCIÓN DEL PLOMO POR
BISMUTO EN EL GRADO DE MAQUINABILIDAD DE UN
LATÓN PLOMADO**

JOSE DAVID MESTIZO GRANADOS

Universidad Nacional de Colombia
Departamento De Ingeniería Mecánica y Mecatrónica
Facultad de Ingeniería
Bogotá D.C, Colombia
2019

EFECTO DE LA SUSTITUCIÓN DEL PLOMO POR BISMUTO EN EL GRADO DE MAQUINABILIDAD DE UN LATÓN PLOMADO

JOSE DAVID MESTIZO GRANADOS

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título
de:

Magister en Materiales y Procesos.

Director (a):

Título Msc. Edgar Espejo Mora

Línea de Investigación:

NUEVOS MATERIALES

Grupo de Investigación:

Análisis de Fallas, Integridad y Superficies - AFIS

Universidad Nacional de Colombia

Departamento De Ingeniería Mecánica y Mecatrónica

Facultad de Ingeniería

Bogotá D.C, Colombia

2019

A Dios por permitirme alcanzar mis propósitos siempre con su respaldo, a mi familia porque nunca dejaron de creer en mí, a ti por tu amor y tu apoyo incondicional y a todas aquellas personas que de una u otra manera aportaron un grano de arena para que este sueño fuese realidad.....

Agradecimientos

Al Alma Mater de la Universidad Nacional de Colombia por permitirme hacer parte de esta gran familia, al departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica a través del programa de Maestría en Materiales y Procesos quienes me formaron como un ingeniero Master capaz de ser un representante digno de esta comunidad académica.

Agradezco al ingeniero Edgar Espejo Mora por su direccionamiento y apoyo durante toda la investigación como director principal del proyecto, sus consejos, su experiencia y formación.

Al conjunto de ingenieros docentes del programa de Maestría en Materiales y Procesos, quienes con su enseñanza han transmitido su conocimiento que me permitió culminar con éxito esta investigación.

Al equipo de laboratoristas, y demás colaboradores del Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, quienes con su tiempo y trabajo apoyaron todas las actividades prácticas y experimentales que hicieron parte de este proyecto.

Resumen

Recientes investigaciones, han corroborado que el uso del Plomo como elemento aleante en aplicaciones industriales y domésticas, representa un riesgo para la salud de los seres vivos. A nivel mundial se están generando normas que restringen su uso en aplicaciones como piezas en grifería, fabricadas en aleaciones de cobre para el transporte de agua potable.

En la presente investigación se desarrolló una evaluación de maquinabilidad para una aleación de latón, con diferentes concentraciones de Bismuto, en rangos desde 0,65 % hasta 2,45 % en peso, como principal elemento sustituyente del Plomo. Una vez obtenidas las aleaciones por fundición, se efectuaron pruebas de caracterización tales como espectrometría de emisión óptica (OES), análisis de durezas Brinell, análisis químico por fluorescencia de rayos X (XRF), microscopía electrónica SEM, análisis metalográfico y pruebas de maquinado por taladrado.

Fue posible identificar mediante las metalografías y las microscopias SEM, la presencia del elemento Bismuto en la matriz metálica, como partícula insoluble entre las fases Alfa y Beta, presentes en algunas de las aleaciones; sin embargo hubo predominio de fase Alfa en la mayoría de los latones. Se identificó la formación de precipitados de Bismuto y su agrupación en zonas de agrietamiento, actuando como concentrador de esfuerzos, favoreciendo el deslizamiento de las bandas y la plasticidad del material, propiciando mecanismos de fractura dúctil. La dureza de estas aleaciones es inversamente proporcional al contenido del elemento, fue posible evidenciar la disminución significativa de esta propiedad cuando las aleaciones tienen contenidos de Bi superiores al 2% en peso, en comparación a la dureza del latón plomado. En cuanto a la maquinabilidad la presencia de Bismuto en los latones disminuye notoriamente los tiempos de mecanizado por taladrado y favorece la formación de virutas helicoidales cortas, propias de un buen proceso de mecanizado.

Palabras clave: Latón al bismuto, Maquinabilidad, Taladrado, Fundición.

Abstract

Recent investigations have corroborated that the use of Lead as an alloying element in industrial and domestic applications, represents a risk to the health of living beings. At the global level, standards are being generated that restrict its use in applications such as parts in taps, manufactured in copper alloys for the transport of drinking water.

In the present investigation, an evaluation of machinability was developed for a brass alloy, with different concentrations of Bismuth, in ranges from 0.65% to 2.45% by weight, as the main substitute element of Lead. Once the cast alloys were obtained, characterization tests were carried out such as optical emission spectrometry (OES), Brinell hardness analysis, X-ray fluorescence chemical analysis (XRF), SEM electron microscopy, metallographic analysis and machining tests boring.

It was possible to identify by means of metallographies and SEM microscopies, the presence of the Bismuth element in the metallic matrix, as an insoluble particle between the Alpha and Beta phases, present in some of the alloys; however, there was a predominance of the Alpha phase in most of the brass. The formation of Bismuth precipitates and their grouping in cracking zones was identified, acting as a stress concentrator, favoring the sliding of the bands and the plasticity of the material, propitiating ductile fracture mechanisms. The hardness of these alloys is inversely proportional to the content of the element, it was possible to demonstrate the significant decrease of this property when the alloys have Bi contents greater than 2% by weight, in comparison to the hardness of the leaded brass. Regarding the machinability, the presence of Bismuth in the brass significantly decreases the machining times by drilling and favors the formation of short helical shavings, typical of a good machining process.

Key words: Bismuth Brass, Machinability, Drilling, Foundry.

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Lista de figuras	1
Lista de tablas	4
Antecedentes	5
Introducción.	11
1. Marco teórico	13
1.1 Clasificación.	14
1.1.1 Latones	14
1.2 Propiedades Mecánicas de los Materiales.....	18
1.2.1 Propiedades ante la Tensión:	19
1.2.2 Propiedades ante la compresión:	21
1.2.3 Dureza.....	22
1.3 Maquinado.....	24
1.3.1 Maquinabilidad	25
1.3.2 Maquinaria y herramientas de corte.	29
1.3.3 Formación de virutas.	33
1.4 Toxicidad y efectos del Plomo en la salud humana.	38
1.4.1 Efectos en la salud por exposición de Plomo.	39
2. Desarrollo Experimental.	41
2.1 Pruebas piloto de taladrado.....	41
2.2 Obtención de latones al Bismuto	43
2.2.1 Pruebas piloto Cu-Bi.....	43
2.2.2 Selección de materiales y cálculos de carga.	46
2.2.3 Moldeo, fusión latón madre y limpieza.....	48
2.3 Análisis químico por espectrometría de emisión óptica OES del latón madre.....	51
2.4 Fundición latones al Bismuto.....	53
2.4.1 Preparación de materias primas y pesaje.....	58
2.4.2 Moldeo, fusión y limpieza de latones al Bi.	59
2.4.3 Fusión.	60
2.5 Solidificación, enfriamiento y desmoldeo.	64
2.6 Toma y preparación de muestras	64
2.7 Medición de Durezas Brinell.	66
2.8 Análisis químico por XRF.	67
2.9 Ensayos metalográficos.	67

2.9.1 Montaje de muestras.....	68
2.9.2 Desbastado de las muestras.....	68
2.9.3 Pulido metalográfico.....	69
2.9.4 Ataque químico y revelado metalográfico.....	70
2.10 Pruebas de taladrado.....	71
2.11 Análisis gravimétrico de las virutas.....	73
2.12 Análisis por microscopia electrónica SEM.....	74
3. Resultados.....	75
3.1 Composición Química Latón Madre por espectrometría de Emisión Óptica OES.....	75
3.2 Composiciones químicas Latones por XRF.....	76
3.3 Durezas Brinell.....	77
3.4 Pruebas de Taladrado.....	80
3.5 Metalografía.....	81
3.6 Microscopía SEM.....	85
3.6.1 Análisis químico Bismuto metálico.....	85
3.6.2 Análisis morfológico virutas de latones.....	89
3.7 Gravimetría virutas latones al Bismuto.....	93
4. Analisis de Resultados.....	94
4.1 Durezas Brinell.....	94
4.2 Taladrado.....	98
4.3 Análisis metalográfico.....	101
4.4 Microscopia SEM para las Virutas.....	107
5. Conclusiones y Recomendaciones.....	113
Recomendaciones.....	115
A Anexo: Cálculos y balances de carga.....	116
B Anexo: Metalografías.....	119
C Anexo: Micrografías SEM- virutas.....	134
D. Anexo: Datos estadísticos.....	142
Bibliografía.....	146

Lista de figuras

	<u>Pág.</u>
Figura 1-1. A) Pieza de Grifería en Latón 6040. B). Micrografía Latón 7030.....	15
Figura 1-2. Diagrama Equilibrio de Fases Cu-Zn.	16
Figura 1-3. Prueba de tensión.	19
.....	19
Figura 1-4. Gráfica normal del esfuerzo-deformación de ingeniería durante una prueba de tensión de un metal	20
Figura 1-5. Prueba de compresión.	21
Figura 1-6. Esfuerzo de Ingeniería Vs. deformación de Ingeniería en prueba de compresión.....	22
.....	24
Figura 1-7. Método de prueba de la dureza Brinell.	24
Figura 1-8. Clasificación de los procesos de remoción de material.....	28
Figura 1-9. Los tres procesos más comunes de maquinado.....	29
a) Torneado, b) taladrado y dos formas de fresado: c) fresado periférico, d) fresado de frente.....	29
Fig. 1-10 Nomenclatura de las partes de broca.	31
Figura. 1-11. Vista seccional de los detalles del husillo de una taladradora típica	32
Fig. 1-12 A. Principios del corte ortogonal. B: Deformación de la viruta y la pieza de trabajo por el corte	33
Fig. 1-13. Vista seccional de (a) viruta discontinua; (b) viruta continua y (c) viruta continúa con borde acumulado.....	35
Fig. 1-14. Clasificación de las virutas según ISO 3865, anexo G	37
Figura 2-1. Montaje muestras prueba piloto de taladrado.....	42
Figura 2-2. A) Horno eléctrico Romanoff. B) Carga material Cu-Bi.....	44
Figura 2-3. Analisis Químico SEM EDS Aleación Cu-Bi.	45
.....	45
Figura 2-4. Materias primas para fabricación de latón madre: Cobre electrolítico 99.9 - Zinc metálico.	46
Figura 2-5. Moldes de arena en verde.....	48
.....	48
Figura 2-6. De izquierda a derecha: Horno Basculante a Gas. / Fusión Aleaciones ..	49
Figura 2-7. Horno detenido para vaciado del material / piezas obtenidas colada 1.....	49
Figura 2-8. Muestras de Latón Madre obtenidas	50
Figura 2-9. Espectrómetro de emisión óptica MINILAB 150.....	51

Figura 2-10. De Izq. a Derec: A) Balanza analítica Sartorius QUINTIX-224-1S. B) Bismuto Metálico-Latón Madre-Zinc Metálico-Cu Electrolítico.	59
Figura 2-11. Moldes en arena al CO ₂	60
Figura 2-12. Horno Mufla Lindenberg.....	61
Figura 2-13. Diagrama de flujo proceso de fusión latones al Bismuto.	62
Figura 2-14. Perfil térmico proceso de fusión latones al Bismuto.	63
Figura 2-15. Barra Latón al Bismuto.....	64
Figura 2-16. A). Montaje de piezas en cortadora metalográfica Buehler 10-1000AB. B). Cortadora metalográfica SAMPLEMET para muestras pequeñas.	65
Figura 2-17. Muestras Obtenidas por Corte..	66
Figura 2-18. A. Durómetro de banco. B. Montaje muestra de Latón.....	67
Figura 2-19. Montaje de muestras de latón para metalografía.	68
Figura 2-20. Pulido Metalográfico muestras de latón.....	69
Figura 2-21. Microscopio metalográfico LECO 500.	70
Figura 2-22. A Taladro de prensa. B montaje de muestras al taladro.....	72
Figura 2-23. Proceso de Verificación de peso aplicado para la prueba de taladrado.	72
Figura 2-24. Balanza Analítica PA 220 Symmetry y muestras de viruta.	73
Figura 2-25. Microscopio electrónico SEM TESCAN. Universidad Nacional-Física. ..	74
Figura 3-1. Micrografía Laton LBi1 100X-formaciones dendríticas.	84
Figura 3-2 Micrografía Latón LBi12 100X- granos equiaxiales, poliédricos.....	84
Figura 3-3. Micrografía LBi11 100X- granos columnares, formación Widmanstätten.	85
Figura 3-4. Microscopia SEM a 200X-Bismuto.....	86
Figura 3-5. Identificación del Bismuto visto en SEM.....	87
Figura 3-6. Micrografía SEM a 1.00 kx. Muestra de Cu-Bi hecha en la prueba piloto.	88
.....	88
Figura 3-8. Microscopia SEM Virutas, muestras <i>LBi 7</i> y <i>LBi 15</i> , Magnificaciones 23X y 13X.	92
Figuras 3-9. Microscopia SEM Virutas, identificación del Bismuto (partículas <i>blancas</i>) en las grietas y la matriz del latón, muestras <i>LBi15</i> y <i>LBi 13</i>	92
Figura 4-1. Grafica Box -Plot durezas (HB) Vs. % Bismuto	96
Figura 4-2. Datos de correlación latones al bismuto (HB). Fuente: Autor.	97
Figura 4-3. Grafica Box -Plot tiempos de taladrado Vs. % Bismuto	100
Figura 4-4. Metalografía muestra LBi15 a 100X, conteo de poros.....	101
Figura 4-5. Metalografía muestra LBi1 a 100X, formación granos dendríticos y fase α	102
Figura 4-6. Metalografía muestra LBi3 a 100X, formación granos equiaxial y fase α	103
Figura 4-7. Metalografía muestra LBi2 a 100X, formación granos equiaxial y fase α	104
Figura 4-8. Metalografía muestra LBi12 a 100X, crecimiento de granos en fase α	105
Figura 4-9. Metalografía muestra LBi11 a 200X, crecimiento de granos en fase α y β	106

Figura 4-10. Microscopia SEM muestra LBi7 a 800X, identificación del Bi.	107
Figura 4-11. Microscopia SEM muestra LBi7 a 800X, identificación del Bi	108
Figura 4-12. Microscopia SEM muestra LBi8 a 800X, precipitados de Bi en grieta.	109
Figura 4-13. Microscopia SEM muestra LBi3 800X, superficies de deslizamiento al corte.	110
Figura 4-14. Microscopia SEM muestra LBi4 800X, fractura dúctil.	111
Figura 4-15. Microscopia SEM muestra LBi4 800X, fractura dúctil.	112

Lista de tablas

	<u>Pág.</u>
Tabla 2-1. Cálculos y resultados en prueba piloto aleación Cobre-Bismuto.....	45
Tabla 2-2. Cálculos de Carga Horno Basculante-Capacidad 10 Kg.	47
Tabla 2-3. Composición química Latón Madre colada 1- C1.....	52
Tabla 2-4. Composición química Latón Madre colada 2 -C2.....	52
Tabla 2-5. Contenidos de Teóricos de Bismuto y otros aleantes de los latones bismutados.	54
Tablas 2-6. Cálculos de Carga Latones al Bi.	58
Tabla 3-1. Composiciones químicas latones Madre, coladas C1 y C2 respectivamente.....	75
Tabla 3-1. Composiciones químicas latones Madre, coladas C1 y C2 respectivamente. (continuación)	76
Tabla 3-2. Composiciones químicas porcentuales latones al Bismuto.	76
Tabla 3-3. Diámetros de indentación-latones obtenidos (187.5X).....	77
Tabla 3-3. Diámetros de indentación-latones obtenidos (187.5X). Continuación.	78
Tabla 3-4. Durezas Brinell de los latones al Bismuto.	79
Tabla 3-5. Tiempos promedio de maquinados latones al Bismuto y muestra de referencia.....	80
Tabla 3-6. Analisis Metalográfico latones al Bismuto.	81
Tabla 3-6. Analisis Metalográfico latones al Bismuto. (Continuación)	82
Tabla 3-6. Analisis Metalográfico latones al Bismuto. (Continuación)	83
Tabla 3.7. Analisis de las virutas de mecanizado de los latones con y sin Bismuto. .	89
Tabla 3.7. Analisis de las virutas de mecanizado de los latones con y sin Bismuto. (Continuación).....	90
Tabla 3.7. Analisis de las virutas de mecanizado de los latones con y sin Bismuto. (continuación).	91
Tabla 3-6. Datos gravimétricos virutas latones.	93
Tabla 4-1. Test de Normalidad- análisis comparativo durezas latones al Bismuto	95
Tabla 4-2. Parámetro selección prueba estadístico.	95
Tabla 4-3. Test de normalidad: análisis comparativo –tiempos taladrado latones con y sin contenido Bismuto	99
Tabla 4-4. Parámetro selección prueba análisis estadístico del taladrado.	99

Antecedentes.

Recientemente las restricciones en el contenido de plomo en aleaciones de aplicación en sistemas de agua potable, ha llevado a remplazar el plomo por elementos tales como Bismuto. Donde las propiedades finales de las nuevas aleaciones de Cu-Zn, dependen de la distribución del elemento agregado, la interacción de este con la matriz, la energía interfacial, la solubilidad del elemento, la temperatura de fusión de este, así como de las diferentes etapas del proceso de manufactura de la aleación.

A nivel mundial se están generando normativas que restringen el uso del plomo dentro de las aleaciones para grifería, debido a los problemas relacionados con la salud, condición que está tomando gran importancia y relevancia en múltiples sectores, que se está siendo extendida geográficamente. [22].

Obtener piezas con aplicaciones en grifería en latón al Bismuto, que conserven las características propias de este tipo de aplicaciones, puede presentar una opción alternativa de solución a la problemática que en la actualidad se refleja en la venta y distribución de accesorios y piezas para instalación y transporte de agua potable. El posible desempeño que puede tener el Bismuto en una matriz de un latón amarillo, con relación al grado de maquinabilidad de este tipo de aplicaciones, puede representar un gran interés, ya que si los resultados son ideales o cercanos a los de los latones al Plomo, tendrían un impacto directo en la producción de este tipo de piezas que pueden ser comercializadas sin restricción.

Teniendo como premisa esta situación, el presente trabajo se basó en la fabricación de dos aleaciones madre de latón amarillo libres de contenido Plomo, las cuales le fue adicionado el Bismuto en diferentes concentraciones, que fueron caracterizadas por múltiples técnicas y que permitieron evaluar la maquinabilidad por taladrado de estas aleaciones al Bismuto, donde el elemento sustituto dio características particulares al material.

Teniendo en cuenta que empresas dedicadas a la grifería a nivel nacional pretenden exportar sus productos a otros mercados donde la restricción del uso de Plomo es vigente y que éstas centran su manufactura en latones plomados, se hace necesario hacer un cambio tecnológico de sus aleaciones para ajustarse a estos nuevos requerimientos, de tal manera que las

nuevas aleaciones no eleven demasiado los costos de producción y que las propiedades del producto sigan siendo satisfactorias.

Nuevas investigaciones, han corroborado que el uso del Plomo como elemento aleante en latones en aplicaciones industriales y domésticas, representa un riesgo para la salud de los seres vivos, por tal razón hay estudios que buscan encontrar aleaciones para sustituir este metal; en el año 2004 los autores Christoph Nobel, Fritz Klocke, Dieter Lung, Sebastián Wolf, desarrollaron una aleación de latón al silicio como posible sustituyente del plomo, buscando comparar propiedades como la maquinabilidad propia que poseen los latones plomados, concluyendo que en “comparación con latones de plomo, el latón especial aleado al silicio CW724R mostró una mejor maquinabilidad en términos de mejor viruta de rotura y menor carga térmica para las herramientas de mecanizado, sin embargo, causa mayor desgaste de flanco debido a su abrasividad” [1], esto contextualiza que hay posibles elementos químicos que reemplazarían al plomo en aleaciones de latón usadas en la vida cotidiana.

El mismo año, Dieter Lung, desarrolló una investigación donde se construyó un procedimiento experimental para evaluar la influencia del silicio como elemento sustituto del plomo en las aleaciones de latón, en este se caracterizó la maquinabilidad de piezas que se fundieron con esta composición y cómo el elemento químico influye desde la microestructura para el proceso de mecanizado. [3]

En el 2015, Gan Chunlei, Song Dongfu, desarrollaron una investigación cuyo objetivo fue la evaluación detallada de análisis de falla de una pieza de grifería hecha en latón totalmente libre de plomo, donde se sustituyó este elemento por bismuto. Desarrollaron un análisis macroscópico, análisis químico y microscópico de las grietas presentes en la pieza de grifería para determinar las causas de la falla. Los autores pudieron encontrar que la microsegregación del Bismuto, estaba presente donde se formó la falla, los análisis microscópicos SEM-EDS, corroboraron que las fases o zonas ricas en Bismuto, estaban distribuidas a lo largo de los límites de grano, de igual forma la morfología de la grieta reveló una falla intergranular típica, que a su vez, permitió el desarrollo de un mecanismo de falla de fractura frágil, situación que a los autores permitió establecer en su estudio, algunas de las posibles incidencias de fallas que pueden ser relevantes en los procesos de producción de piezas de grifos en latones libres de Plomo [4].

Otros investigadores, han evaluado el comportamiento de los latones con otros metales aleantes sustituyentes del Plomo, como por ejemplo el Telurio, el Níquel, el Bismuto y Cobalto, y su comportamiento de segregación en la fase γ del latón. En el año 2010 J. Kozana, llevó a cabo una investigación donde valoró las cantidades de solución sólida de la fase γ que se presenta en los latones y llevo a cabo evaluación de la influencia del adicionamiento de aleaciones en su formación [6].

En México, en el año 2012 se desarrolló una investigación donde se evaluó el análisis de falla de un latón amarillo aleado al Bismuto, M. Martinez-Hernandez, A. Juarez-Hernandez y C. González-Rivera, analizaron mediante OM y SEM-EDS el efecto que ejerce el elemento químico en la formación y propagación de grietas en este tipo de aleaciones, en las cuales las fallas fueron identificadas durante la solidificación de la pieza de grifería. Los autores concluyen que el Bismuto y su alta concentración en las zonas donde se forma la grieta, conllevo a un proceso de desgarre en caliente, ya que este elemento actuó como concentrador de esfuerzos que favorecieron el mecanismo de falla. [2].

Debido a que el latón es una aleación que presenta un buen comportamiento frente a la corrosión, la búsqueda de elementos sustitutos de Plomo ha tomado mucha fuerza en la actualidad. En el año 2009 se llevó a cabo una evaluación del comportamiento de un latón con contenido de silicio en ambientes salinos y corrosivos, P. Banerjee, autor de la investigación determinó que los latones al silicio tienen una mejor resistencia en este tipo de ambientes [7].

En el año 2009, en la universidad de Asturias, se llevó a cabo un estudio donde se evaluó el efecto de la maquinabilidad de los latones [8]. Los autores de esta investigación han llevado a cabo un estudio comparativo entre dos muestras de un latón CuZn39Pb3 con la misma geometría pero diferentes comportamientos en operaciones de corte. Se deseó evaluar las propiedades, la microestructura, la composición química de estas dos muestras y hacer comparación de la influencia de la formación de los glóbulos en las fases Alpha y Beta, y la influencia de estas en el desempeño mecánico de la aleación.

La resistencia y la maquinabilidad de los latones libres de plomo también ha sido tema de estudio; en el año 2011 Haruhiko Atsumia, Hisashi Imaib [9], quisieron investigar las propiedades de maquinabilidad, propiedades mecánicas y microestructura, de una serie de latones dúplex alfa-beta libres de contenido de plomo fabricadas por fundición, con 0,3% en peso de Cr, 0,2% en peso de Fe, 0,6% en peso de Sn y 1-3 % en peso de Bi, denominadas Cu-40Zn- Cr-Fe-Sn-Bi.. Los autores, lograron identificar microestructuralmente en estas aleaciones la fase dúplex Alfa-Beta, con presencia de partículas intermetálicas Cr-Fe dispersas en la matriz y partículas esféricas de Bismuto en la fase Beta. Desarrollaron pruebas de resistencia mecánica de estas aleaciones comparándolas con una aleación de latón con contenido de Plomo, denominada Cu-40Zn.Pb; obteniendo valores de 288 MPa y 601 MPa respectivamente. En cuanto a la maquinabilidad, los investigadores concluyeron que las aleaciones de latón con Bismuto; mantuvieron un 75% de la maquinabilidad del latón con Plomo, situación que también pudo ser reflejada en las aleaciones de Cu-40Zn-Cr-Fe-Sn-Bi en cuanto a la compensación entre la relación de dureza y maquinabilidad de estas aleaciones frente a un latón convencional maquinable.

En este mismo marco, las aleaciones libres de plomo con sus sustitutos han dado cabida a otros elementos químicos, investigadores como Hisashi Imai [10], Yoshiharu Kosaka llevaron a cabo una investigación cuyo objetivo era obtener un latón de libre contenido de plomo, llevando a cabo una sustitución de éste por grafito, para la obtención de este latón maquinable los autores emplearon técnicas en pulvimetalurgia, la investigación deseaba evaluar algunas propiedades y características mecánicas de este producto manufacturado con esta técnica para hacer un comparativo frente a un latón plomado también obtenido por SPS. Ellos pudieron concluir que la aleación de latón libre de Plomo, contenía partículas de grafito disperso en estas muestras extruidas y que se presentaron algunas pérdidas de latón en peso debido a la vaporización del Zinc a 873 °K. De igual manera, al comparar los latones con grafito frente a un latón plomado también obtenido pulvimetalúrgicamente, concluyeron la eficacia del grafito en la mejora de la maquinabilidad de estos latones, comparable a la obtenida en un latón plomado convencional.

En el año 2009, A. La Fontaine [11], llevo a cabo una caracterización microscópica donde evaluó la influencia del Bi segregado en latones libres de plomo. El autor comparó la distribución de la composición química de una serie de aleaciones de latón con alto contenido

de Cobre, en las cuales el Bismuto hace presencia, paralelo a otros elementos químicos como el Estaño, y el Níquel, confrontando con una aleación de latón plomado tradicional. La investigación concluye que la presencia de otros elementos en aleaciones con alto contenido de cobre como la C84400 y C889520 o para cobres de puros, puede alterar el comportamiento de segregación del Bismuto en los límites de grano; situación que fue posible observar mediante SEM, donde la presencia del Estaño no favoreció el proceso de precipitación de las partículas de Bismuto.

Otros autores como V. Vázquez [12], desarrollaron investigaciones con latones amarillos al bismuto. Sus investigaciones estuvieron enmarcadas a productos de grifería fundidos en latón al Bismuto como principal elemento sustituto del plomo, donde hicieron una evaluación detallada de estos productos e identificaron algunas defectologías problema en la calidad de los productos de las piezas.

Muchas de estas investigaciones, buscan como objetivo principal ofrecer soluciones alternativas a problemas reales con piezas de latón que tienen contenidos de Plomo, que pueden ser altamente nocivos para la salud de los seres vivos.

En el año 2012, Simoni Triantafyllidou [13], quiso desarrollar una investigación donde centra su interés en cómo las aleaciones en latones plomados, pueden representar riesgo de contaminación en la calidad de la salud de los seres vivos que tienen contacto o consumo de agua potable donde típicamente se usan piezas en latón de este tipo como contempla la EPA. En esta investigación se evaluaron varios factores que pueden favorecer o mitigar el proceso de lixiviación del plomo en contacto con el agua.

En la versión 2013 de la NFS/ANSI 61 [14], el Instituto Nacional Estadounidense de Estándares; en este documento establece los parámetros mínimos en los efectos de salud causados por contaminantes químicos e impurezas que son indirectamente agregados al agua potable a partir de productos, componentes y materiales usados en sistemas de agua potable.

Teniendo en cuenta algunas investigaciones como las citadas anteriormente, se amplía la posibilidad de encontrar una solución real y factible a la sustitución del Plomo por otros elementos, que no solo podría influir en la calidad de vida de los seres vivos, propiedades características de este tipo de aleaciones sino que también ofrecer alternativas a la industria como por ejemplo aplicaciones en grifería donde se desea obtener productos y accesorios que presenten un buen comportamiento de maquinado y desgaste.

Introducción.

Obtener piezas con aplicaciones en grifería en latón al Bismuto, que conserven las características propias de este tipo de aplicaciones, puede presentar una opción alternativa de solución a la problemática que en la actualidad se refleja en la venta y distribución de accesorios y piezas para instalación y transporte de agua potable. El posible desempeño que puede tener el Bismuto en una matriz de un latón amarillo, con relación al grado de maquinabilidad de este tipo de aplicaciones, puede representar un gran interés, ya que si los resultados son ideales o cercanos a los de los latones al Plomo, tendrían un impacto directo en la producción de este tipo de piezas que pueden ser comercializadas sin restricción.

En el presente trabajo se desarrolló un estudio, donde a dos aleaciones madre de latón amarillo, fabricadas a nivel de laboratorio por fundición, cuyos contenidos de Cobre de 60,91 y 61,40 % en peso y Zinc de 38,52 y 39,01 % en peso, le fue adicionado Bismuto en concentraciones desde 0 % hasta 2,48 % en peso, con algunas trazas de Estaño y Aluminio para efectos de colabilidad de las aleaciones. Las cuales fueron caracterizadas por técnicas de microscopía óptica, análisis químico por espectrometría de emisión óptica, microscopía electrónica SEM, análisis químico por fluorescencia de rayos X, análisis de dureza Brinell y pruebas de maquinado por taladrado.

En la investigación se evaluó la influencia de diferentes niveles de concentración de Bismuto como sustituyente del Plomo en un latón amarillo y mediante técnicas analíticas y mecánicas se buscó la relación de este elemento en el grado de maquinabilidad de la aleación metálica de interés.

Mediante procesos de fundición, se obtuvo a nivel de laboratorio una serie de muestras de latón plomado, las cuales se agregó Bismuto como elemento sustituyente del Plomo en quince niveles de concentración. Una vez obtenidas las muestras de latones al Bismuto, se evaluó el comportamiento de la maquinabilidad de los latones, frente a un latón plomado mediante ensayos de taladrado.

Dentro de los análisis de mayor interés de la investigación, se desarrollaron análisis microestructurales de los latones libres de plomo, con el fin de evaluar la relación de la distribución del Bismuto en la matriz de la aleación en sus distintos grados de concentración y complementado con otras pruebas analíticas poder Determinar mediante un análisis comparativo de los resultados obtenidos cuál aleación de laton al Bismuto presenta un mejor comportamiento de maquinado comparable al laton plomado.

1. Marco teórico.

El cobre y sus aleaciones son algunas de las aleaciones de mayor y amplio uso en la actualidad en el mercado de los metales estratégicos, junto a los aceros y al aluminio. El cobre se usa ampliamente por sus óptimas propiedades tales como la conductividad eléctrica y térmica; y su indiscutible resistencia a la corrosión. Es posible fabricarlo de múltiples formas, con facilidad ya que su resistencia mecánica y a la fatiga lo hace ser muy adecuado para diferentes tipos de aplicaciones.

En general, el Cobre y sus aleaciones son materiales de tipo no magnético, que pueden ser soldados fácilmente por diferentes procesos. Ya que este tipo de aleaciones tienen una gran variedad de tonalidades las aleaciones de Cobre, se les utiliza con fines decorativos (lustradas, pulidas o recubiertas con sustancias orgánicas para producir diferentes texturas y terminaciones superficiales). Las aleaciones de Cobre están constituidas principalmente por este elemento como constituyente primario, más algún tipo de elemento químico que le da el nombre a la aleación.

El Cobre electrolítico comercialmente puro, es el primero en la lista de aleaciones de Cobre más reconocidas, ya que es usado principalmente en la fabricación de dispositivos electrónicos, alambres y cables eléctricos, contactos eléctricos, múltiples aplicaciones en la conducción de la electricidad. El Cobre electrolítico, ciertos latones, algunos bronce y cuproníqueles se usan en servicios que requieran alta conducción del calor, como radiadores de vehículos, sistemas de calefacción en hogares, paneles solares, etc. La resistencia a la corrosión de estas aleaciones, les permiten un amplio uso en caños y válvulas de sistemas de agua potable, sistemas de procesamiento de aguas industriales u otros fluidos acuosos. [15]

Además de la resistencia mecánica, la resistencia a la fatiga y la conformabilidad (excelente en estos materiales), es posible encontrar otras características de interés de estas aleaciones al momento de ser usadas, tales como: *resistencia a la corrosión, conductividad eléctrica, conductividad térmica, color, facilidad de fabricación.*

1.1 Clasificación.

Las aleaciones de cobre más importantes pueden ser clasificadas de la siguiente manera:

- **Latones- Aleaciones de Cobre y Zinc:**
Latones Alfa: aleaciones que contienen hasta el 35% de Zinc: *Latones Amarillos* (20-35% Zn) y *Latones Rojos* (5 al 20 % de Zn).
- **Latones Alfa –Beta** (35 a 45% de Zinc).
- **Bronces Hasta el 12 % del elemento de Aleación:**
Bronces al Estaño.
Bronces al Silicio.
Bronces al Aluminio.
Bronces al Berilio.
- **Cuproníqueles-Aleaciones de Cobre y Níquel.**
- **Platas- Níquel Aleaciones de Cobre, Níquel y Zinc.**

Las aleaciones de Cobre se clasifican de acuerdo a un sistema de designación alfanumérico, que comprende los números C10100 al C79900 para las aleaciones conformables y los números C80000 al C99900 para designar las aleaciones de fundición. La norma ASTM B 601, "*Standard Practice for Temper Designations for Copper and Copper Alloys--Wrought and Cast*" establece un código alfa-numérico que se relaciona con cada estado de entrega (temper) de las aleaciones: el código alfa-numérico TB00 es la siguiente condición del material (o temper): "tratado en solución o solubilizado para cualquier aleación que endurezca por precipitación" [17].

1.1.1 Latones.

Se denominan latones a todas las aleaciones formadas a base de Cobre con Zinc, en proporciones desde 0.5 hasta 45% de Zinc normalmente. Al variar el contenido de estos

elementos, los latones cambian sus características físicas y consecuentemente varían sus aplicaciones, dentro las más conocidas están las piezas en latón amarillo para aplicaciones en transporte de agua potable, Figura 1-1. Los latones se pueden clasificar en dos grupos principalmente: en el primer grupo están aquellos que pueden trabajarse fácilmente en frío, caracterizados por combinar una buena resistencia a la tensión con gran ductilidad, magnífica resistencia a la corrosión y fácil soldabilidad. Este grupo de latones son denominados "alfa", cuyo contenido de zinc no es mayor de 37%. Reciben este nombre ya que la fase predominante es la solución sólida "alfa" del cobre, cuya estructura es cúbica centrada en las caras (FCC).

Figura 1-1. A) Pieza de Grifería en Latón 6040. B). Micrografía Latón 7030.

Atacada con Cloruro Férrico, aumento 100X, se distingue el predominio de la fase alfa (clara) en la aleación. [21].

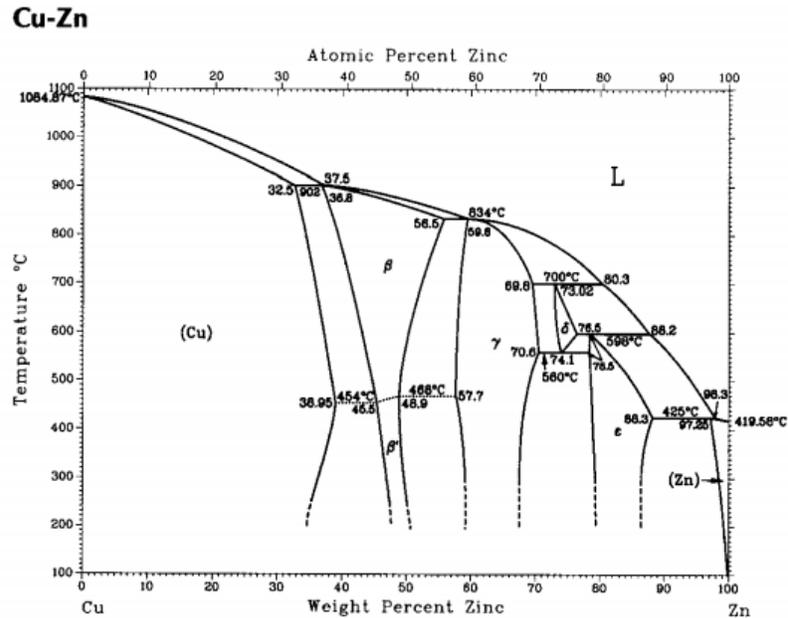
A



En el segundo grupo se encuentran aquellos latones que poseen menos ductilidad que los anteriores, principalmente se caracterizan por ser buenos materiales para trabajarse en caliente. Estos son los latones "alfa-beta", cuyo contenido en zinc es superior a 35%. Sin embargo, cabe aclarar que todos los latones pueden ser trabajados en caliente.

La tenacidad de estas aleaciones, aumenta al crecer el porcentaje de Zinc hasta 30% y después del cual, disminuye bruscamente debido a la aparición de la fase "beta". El efecto de esta fase en frío es la reducción de la tenacidad, ya que se trata de una fase menos dúctil y más dura debido a su estructura cúbica centrada en el cuerpo (BCC). La formación de las fases en los latones y sus características particulares, esta principalmente asociado a las relaciones que puedan desarrollarse esencialmente entre el Cobre y Zinc, Figura 1-2.

Figura 1-2. Diagrama Equilibrio de Fases Cu-Zn. [18]



Los latones α no presentan fenómenos de segregación debido a la cercanía de las curvas Solidus-Liquidus. En general, las aleaciones que contienen menos de un 20 % de cinc se conocen como latones rojos. Dentro de esta denominación se incluyen el metal de dorar (aproximadamente, un 5 % Zn) para joyería como imitación del oro, el bronce comercial (aproximadamente 10 %) para bisutería y ferretería y, finalmente, con el mismo nombre, el latón rojo (15% Zn) para embutición y radiadores de automóvil. Son aleaciones de gran resistencia a la corrosión que no sufren procesos de descincificación. Los latones amarillos alfa son aleaciones con un contenido en cinc de entre un 20 % y un 39 %. Son más dúctiles y se pueden laminar y estirar en frío [16].

La conductividad y el precio en el mercado de los latones bajan, a medida que el porcentaje del Cobre es disminuido. Cuando un latón es trabajado en frío, el metal se deforma tendiendo a endurecer. Cuando se ha endurecido por trabajos en frío, el latón puede suavizarse mediante un calentamiento a 600 °C, el período de tiempo de este tratamiento

puede variar de unos minutos a varias horas, dependiendo considerablemente del tiempo en que el metal tome para alcanzar la temperatura requerida el cual a su vez, depende de la masa de la carga del horno y de otros factores. Al analizar microscópicamente un latón trabajado en frío, se podrá observar que la deformación ha tenido lugar por distorsión de los cristales individuales o granos del metal. Estos granos deformados son más duros y ofrecen resistencia aumentada para más amplia deformación. De esta manera, la resistencia a la tracción aumenta, pero la ductilidad disminuye. Durante el calentamiento los cristales deformados, vuelven a formar nuevos cristales y la aleación recupera su estado original. [32]

Cuando se han formado nuevos cristales durante el calentamiento, son muy pequeños y el tipo de cristal primario, con relación a los últimos formados, aumentarán de tamaño, si la temperatura del recocido sube. A menor extensión, el tiempo de recocido es también un factor determinante en la formación del último tipo de grano. El recocido a elevadas temperaturas puede causar también la deterioración de la superficie de los latones, debido al escamado. Para aminorar la oxidación en el horno, se utiliza una atmósfera no oxidante. Templando después por inmersión en agua el latón, inmediatamente después de sacar del horno, para ahorrar tiempo en el enfriamiento y para limpiar el metal.

Los latones amarillos alfa, están sujetos también a la corrosión; donde la formación de cavidades superficiales, se denominada *dezincificación*. Este tipo de corrosión suele ocurrir cuando el latón está expuesto con agua de mar o con agua dulce rica en oxígeno y dióxido de carbono. Por tal razón, estas aleaciones contienen pequeñas cantidades de Estaño, Antimonio o Aluminio para minimizar el efecto de dezincificación.

De igual manera, otros elementos aleantes como el Plomo, están presentes en los latones. Para el caso de los latones amarillos (65 Cu-35 Zn), la adición de 0,5 % a 3% de Plomo, mejora la maquinabilidad; brindando a esta aleaciones un amplio uso en piezas de máquinas para hacer tornillos, placas para grabado, llaves, cerraduras, tambores, engranajes, griferías entre múltiples aplicaciones. La mayoría de estos latones son fabricados por procesos de forja, los cuales básicamente son aleaciones binarias entre Cobre y Zinc. [23].

Los *latones fundidos o aleados*, son otro tipo de latones muy similares a los forjados, pero generalmente tienen contenidos de otros elementos químicos en cantidades apreciables.

El Estaño puede estar presente desde el 1% hasta el 6% y el Plomo hasta un 10% en peso. Otras familias de aleaciones de latón también tener presencia de Hierro, Manganeso, Níquel y Aluminio.

De los ejemplos más conocidos de este de latones fundidos, se encuentran los *latones rojos al Plomo (85 Cu-5 Pb-5 Zn)*, que son ampliamente usados para piezas fundidas en general y que demandan propiedades de regular resistencia, pocos defectos internos y una buena maquinabilidad (*válvulas para bajas presiones, accesorios de tuberías, engranajes pequeños etc.*). [23].

1.2 Propiedades Mecánicas de los Materiales.

Las propiedades mecánicas de un material determinan su comportamiento cuando se le sujeta a esfuerzos mecánicos. Dentro de propiedades están incluidos el módulo de elasticidad, la ductilidad, la dureza y distintas medidas de la resistencia. Las propiedades mecánicas desempeñan un papel importante en el diseño porque el funcionamiento y eficiencia de un producto dependen esencialmente de su capacidad para resistir la deformación ante los esfuerzos externos a que se le somete durante su uso. En el diseño, el objetivo principal de un producto y sus componentes consiste en resistir dichos esfuerzos sin que su geometría se vea afectada o modifique significativamente. Esta capacidad es dependiente de propiedades tales como el *módulo de elasticidad* y la *resistencia a la deformación plástica*. En procesos de manufactura el objetivo es el opuesto. En ella se desea aplicar esfuerzos que logren exceder la resistencia a la deformación del material a fin de alterar su forma y geometría. Procesos mecánicos tales como el conformado y el maquinado tienen gran efecto al momento de desarrollar fuerzas que excedan la resistencia del material ante la deformación. [20].

Existen tres tipos de esfuerzo estáticos a los que se sujetan los materiales: **tensión**, **compresión y cortante**, Figura 1-3. Los esfuerzos de tensión generan estiramientos al material, los de compresión a compactarlo, y las cortantes comprenden tensiones que tienden a ocasionar que porciones adyacentes del material se deslicen una respecto a la otra. En la ciencia de los materiales existe una curva esfuerzo-deformación que es la relación básica que describe las propiedades mecánicas para los tres tipos.

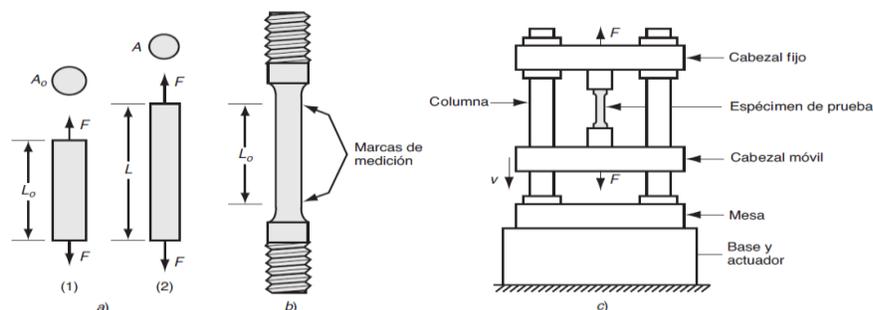
1.2.1 Propiedades ante la Tensión:

La prueba de tensión es uno de los procedimientos más empleados para el estudio de la relación esfuerzo-deformación, en particular para los metales. Durante el desarrollo de esta prueba, es aplicado una fuerza que tira del material y tiende a estirarlo y reducir su diámetro, Figura 1-3. Los estándares de la ASTM (American Society for Testing and Materials) especifican el modo de preparación del espécimen de prueba y de la realización de la prueba misma.

La probeta con que se inicia la prueba tiene una longitud original L_0 y un área transversal A_0 . La longitud es medida como la distancia entre las marcas de referencia sobre la probeta y el área como la sección transversal (circular, por lo general) del espécimen. Durante el desarrollo de la prueba sobre un material metálico el ejemplar se estira, luego le aparece un estrangulamiento denominado “cuello” y por último se fractura. La carga y el cambio de longitud del espécimen son registrados conforme la prueba va avanzando a fin de obtener los datos que se requieren para determinar la relación esfuerzo-deformación. Existen dos tipos de curvas esfuerzo-deformación: la *curva de esfuerzo-deformación de ingeniería*, y la *esfuerzo-deformación verdadera*. La primera es más importante para el diseño, y la segunda lo es para la manufactura [20].

Figura 1-3. Prueba de tensión.

a) la fuerza de tensión que se aplica en 1) y 2) da como resultado el estiramiento del material; b) espécimen de prueba común; y c) disposición de la prueba de tensión. [20].



1.2.2 Propiedades ante la compresión:

En una prueba de compresión es aplicada una carga que comprime una muestra cilíndrica colocada entre dos placas, Figura 1-5. Conforme ésta comprime, su altura se reduce y el área de su sección transversal se incrementa. El esfuerzo de ingeniería se define como:

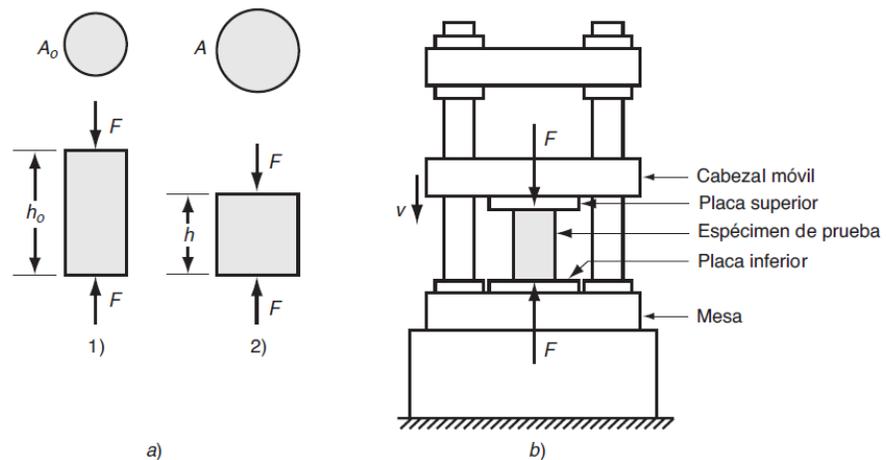
$$\sigma_e = \frac{F}{A_0} \quad (1.1)$$

Donde A_0 = área original del espécimen. Ésta es la misma definición del esfuerzo de ingeniería que se utilizó en la prueba de tensión. La deformación de ingeniería se define como:

$$e = \frac{h - h_0}{h_0} \quad (1.2)$$

Figura 1-5. Prueba de compresión.

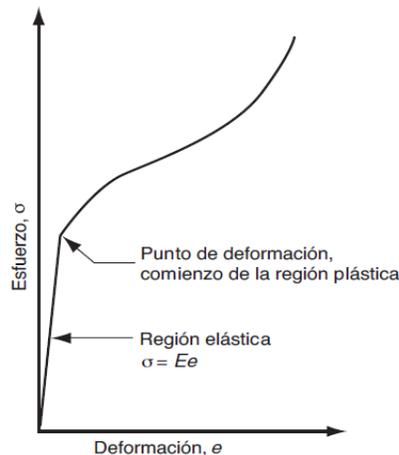
a) Fuerza de compresión que se aplica al ejemplar de prueba (1) y (2) cambio resultante de la altura; b) disposición de la prueba, exagerando el tamaño del espécimen de prueba. [20].



Donde h = altura del espécimen en un momento particular de la prueba, mm (in); y h_0 = altura inicial, mm (in). Debido a que durante la compresión la altura disminuye, el valor de e será negativo.

Si en un ensayo de compresión se grafica el esfuerzo de ingeniería contra la deformación de ingeniería (Figura 1-6), la curva se dividirá en dos regiones: elástica y *plástica*, pero la forma de la parte plástica es diferente de aquella correspondiente zona que es observada en la prueba de tensión. Debido a que la compresión ocasiona que la sección transversal se incremente (en vez de disminuir, como en la prueba de tensión), la carga se incrementa con mayor rapidez que antes. Esto da como resultado un valor más alto del esfuerzo de ingeniería calculado.

Figura 1-6. Esfuerzo de Ingeniería Vs. deformación de Ingeniería en prueba de compresión [20].



1.2.3 Dureza.

La **dureza** de un material se define como su resistencia a la indentación permanente. Por lo general, una dureza buena se traduce como la capacidad que el material es resistente a las rayaduras y al uso. Ésta es una característica importante para muchas aplicaciones de ingeniería, incluyendo la mayoría los accesorios y herramientas usadas en procesos de manufactura.

1.2.3.1 Pruebas de dureza

Es común utilizar pruebas de dureza para evaluar las propiedades del material porque son rápidas y convenientes. Sin embargo, son varios los métodos de prueba apropiados debido a las diferencias de dureza de materiales distintos. Las pruebas de dureza más conocidas son las de Brinell y Rockwell.

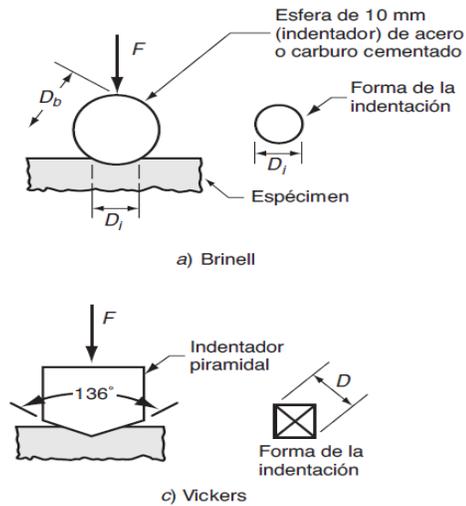
1.2.3.2 Prueba de dureza de Brinell

La prueba de dureza de Brinell se usa mucho para medir la dureza de metales y no metales de dureza baja a media. Recibe su nombre en honor del ingeniero sueco que la creó alrededor de 1900. En la prueba, es presionada una esfera de acero endurecido (o carburo cementado) de 10 mm de diámetro, contra la superficie de un espécimen, con una carga de 500, 1 500 o 3 000 kg. Después, se divide la carga entre el área de indentación para obtener el Número de Dureza de Brinell (BHN). En forma de ecuación se tiene:

$$HB = \frac{2F}{\pi D_b (D_b - \sqrt{D_b^2 - D_i^2})} \quad (1.3)$$

Donde HB = Número de Dureza de Brinell (BHN); F = carga de indentación (kg); D_b = diámetro de la esfera, mm; y D_i = diámetro de la indentación sobre la superficie, mm, Figura 1.7). El BHN resultante tiene unidades de kg/mm², pero por lo general las unidades se omiten cuando se expresa el número. Para materiales más duros (por arriba de 500 BHN), se emplea la esfera de carburo cementado porque la de acero experimenta deformación plástica que falsea la exactitud de la lectura. Asimismo, para materiales más duros es común utilizar cargas mayores (1500 y 3000 kg). Debido a las diferencias en los resultados según las distintas cargas, al hacer reportes de las lecturas HB se considera una práctica buena indicar cuál fue la que se usó en la prueba [20].

Figura 1-7. Método de prueba de la dureza Brinell.



1.3 Maquinado.

En los procesos de manufactura moderna se emplea una gran variedad de principios y técnicas de ingeniería para conformar los materiales y obtener los productos deseados. Entre los procesos industriales más ampliamente empleados están unión, formado, moldeado, colada y corte. El proceso de cortar un material a fin de darle la forma deseada dentro de especificaciones se denomina llama *maquinado* (mecanizado).

En los procesos de maquinado, la remoción de material permite la formación de virutas o la separación del material. Las piezas de plástico, madera y metal se someten a maquinado en alguna etapa de la manufactura. Adicional a los procesos de arranque de virutas y separación, existen otros métodos como: rayos láser, electrodescarga y electroquímicos. Ahora bien, en la mayoría de los procesos de remoción de material se utilizan métodos para arranque de virutas y en este numeral se trata de ellos.

1.3.1 Maquinabilidad.

A la facilidad con la que es posible remover material por planeado, cepillado, torneado, taladrado, aserrado, rectificado, roscado, brochado y esmerilado, se le denomina *maquinabilidad* o facilidad de maquinado. Además de la facilidad para remoción del material, la calidad de la superficie resultante y la duración de la herramienta de corte son de primordial importancia en el concepto de facilidad de maquinado, donde muchos factores influyen en el acabado de la superficie, duración de las herramientas y facilidad para remover el material.

1.3.1.1 Factores que influyen en la maquinabilidad.

Los factores que influyen en la maquinabilidad pueden clasificarse por consideraciones del material, diseño y tipo de herramientas y lubricación. Las consideraciones del material hacen referencia a sus propiedades físicas, estructura interna y tratamiento térmico del material.

Las propiedades físicas que afectan en la maquinabilidad son: *dureza*, *resistencia a la tensión* y *resistencia a la compresión*. En el caso de los materiales blandos, que producen una considerable fricción o arrastre de la herramienta, hay generación de calor, reducción en la duración de la herramienta y alta la posibilidad de un mal acabado de superficie de la pieza. Situación contraria, en los materiales más duros, se reduce el calor, se tiene un mejor acabado de superficie y más duración de la herramienta. Cuando el material tiene un alto grado de dureza, se reduce la facilidad para trabajarlo, debido al desgaste abrasivo de la herramienta.

La estructura interna del material de trabajo, como la estructura del grano, inclusiones abrasivas y aleaciones, se reflejan en la facilidad de trabajarlo. Una microestructura uniforme, pequeñas cantidades de elementos de aleación, como azufre, manganeso y carbono, mejoran la facilidad de trabajo de ciertos aceros, pero cantidades pequeñas de abrasivos o inclusiones, estructura granulada gruesa y contenido muy alto de aleación,

dificultan el maquinado. Un contenido de carbono muy bajo (0.03%) o muy alto (7.70%) disminuye la facilidad de maquinado.

El diseño de las herramientas de corte y los materiales que son empleados para su construcción, influyen de forma directa en la maquinabilidad del trabajo. Durante el diseño de la herramienta, siempre debe prever cierta separación entre el trabajo y los bordes no cortantes de la herramienta. Además, con un adecuado diseño de la herramienta es posible controlar el tipo de virutas generadas y ayuda a su proceso de eliminación de la pieza de trabajo. Una herramienta inadecuada podría ocasionar generación de calor, acabado áspero de la superficie, menor duración de la herramienta y formación no controlada de las virutas.

Los materiales empleados para la fabricación de herramientas de corte deben ser poseer una buena dureza que les permita mantener un filo aceptable al trabajar sobre materiales duros. Otra característica del material de la herramienta es mantener su resistencia y el filo cuando se genera calor durante el proceso maquinado. La rigidez de la herramienta en la máquina también debe ser considerada al momento de seleccionar el material para ésta.

Otra característica importante es la velocidad de corte, es una variable importante que también depende del material e influye en la facilidad para el desarrollo del trabajo. Finalmente y no menos importante, está la facilidad de maquinado, que hace referencia esencialmente al tipo de lubricación, la cual ayuda a enfriar la pieza de trabajo y la herramienta de corte, a la vez que reduce la fricción durante el maquinado [20].

1.3.1.2 Relaciones de maquinabilidad.

La facilidad de maquinado de un material depende de muchas variables que pueden ser desarrolladas simultáneamente. Cuando se determina la maquinabilidad de un material

para un proceso específico, tal como taladrado, esa información quizá no sea aplicable para otros procesos, como torneado o fresado. Como herramientas de ayuda para la determinación de la velocidad de corte y el avance en el maquinado, existen varias relaciones de maquinabilidad para ciertos materiales.

Tal relación se basa en la maquinabilidad del acero al carbono AISI-B1112, al cual se le asigna un valor de 100.

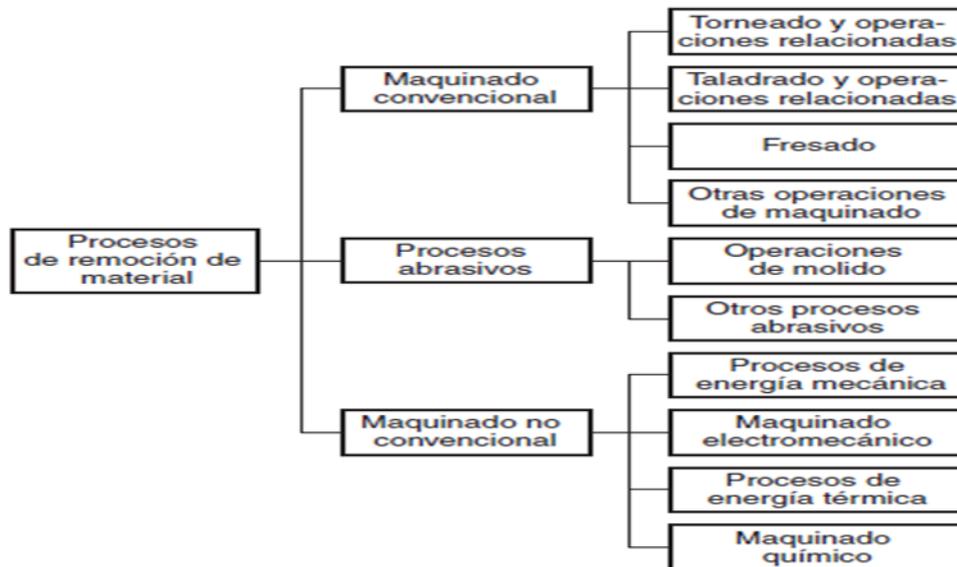
Si un material tiene una clasificación de maquinabilidad de 75, entonces la relación es de un 75% de la facilidad del acero B1112. Conforme se reduce la relación de maquinabilidad, aumenta la potencia necesaria para el trabajo y disminuyen la duración de la herramienta y la calidad del acabado de superficie.

1.3.1.3 Principios de corte de materiales.

Los **procesos de remoción de material** son un conjunto de operaciones de formado en las que el material sobrante es removido de una pieza de trabajo inicial, de tal manera que lo que queda es la forma final que se desea obtener. El “árbol familiar” se muestra en Figura 1-8.

La división más importante de este conjunto de operaciones, es el **maquinado convencional**, en el que una herramienta aguda de corte se utiliza para cortar mecánicamente el material y así alcanzar la forma deseada. Los tres procesos principales de maquinado son: el *torneado*, el *taladrado* y el *fresado*. Las “otras operaciones de maquinado” de la Figura 1-8 incluyen el perfilado, el cepillado, el escariado y el aserrado [20].

Figura 1-8. Clasificación de los procesos de remoción de material [20].



En la operación de **torneado** se emplea una herramienta de corte con un borde cortante simple la cual, fácilmente remueve material de una pieza de trabajo giratoria para dar forma a un cilindro (Figura 1-9a) El movimiento de velocidad del torneado, es proporcionado por la pieza de trabajo giratoria y el movimiento de avance es realizado por la herramienta de corte, que desarrolla un movimiento lento en una dirección paralela al eje de rotación de la pieza de trabajo.

El **taladrado** es una operación que es empleada para formar un agujero redondo. Es realizada generalmente con una herramienta giratoria que tiene dos filos cortantes. La herramienta avanza en una dirección paralela a su eje de rotación al interior de la pieza de trabajo para dar forma a un agujero redondo, como se ilustra en la figura 1-9b). En el **fresado**, una herramienta rotatoria con variados filos cortantes se desplaza lentamente sobre el material, para generar un plano o superficie recta. La dirección del movimiento de avance es perpendicular al eje de rotación. El movimiento de velocidad es proporcionado por la fresa rotatoria. Existen distintas formas de fresado; las dos básicas son el fresado periférico y el fresado de frente (Figura 1-9c y d).

Otras operaciones convencionales del maquinado son *perfilado*, *cepillado*, *escariado* y *aserrado*, asimismo, el esmerilado y operaciones abrasivas similares se incluyen con frecuencia en la categoría del maquinado. Estos procesos por lo común siguen las

operaciones de maquinado convencional y se utilizan para lograr acabados superficiales superiores de la pieza de trabajo [20].

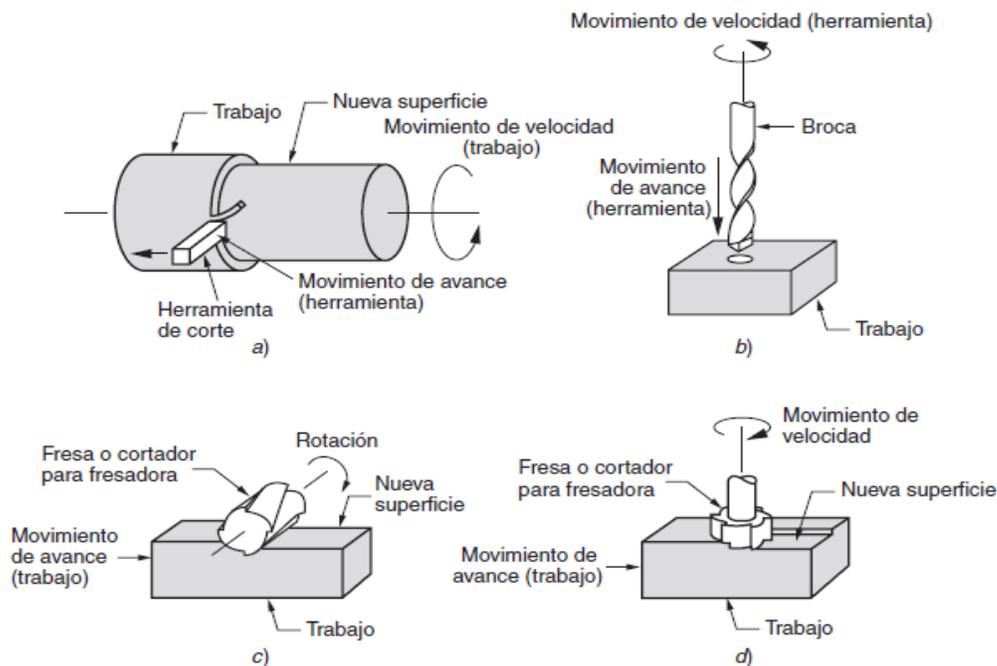
1.3.2 Maquinaria y herramientas de corte.

Las máquinas herramientas pueden clasificarse por:

1. Movimiento relativo de corte,
2. Movimiento relativo de avance.
3. Tipo de superficie producida.
4. Tipo de herramienta de corte necesaria.

Figura 1-9. Los tres procesos más comunes de maquinado.

a) Torneado, b) taladrado y dos formas de fresado: c) fresado periférico, d) fresado de frente [20].



Los tipos comunes de herramientas de corte son de una punta, de puntas múltiples, brocas y abrasivas. Las herramientas de corte de una punta se utilizan en cepilladoras de mesa, cepillos de codo o ariete y en los tornos. En las operaciones de taladro se emplea una

herramienta en rotación y avance en línea recta en una pieza de trabajo fija. Cada máquina herramienta tiene diversos movimientos para lograr los resultados deseados. Es evidente que hay muchas variantes en el movimiento cortante y en el movimiento de avance de las máquinas herramientas.

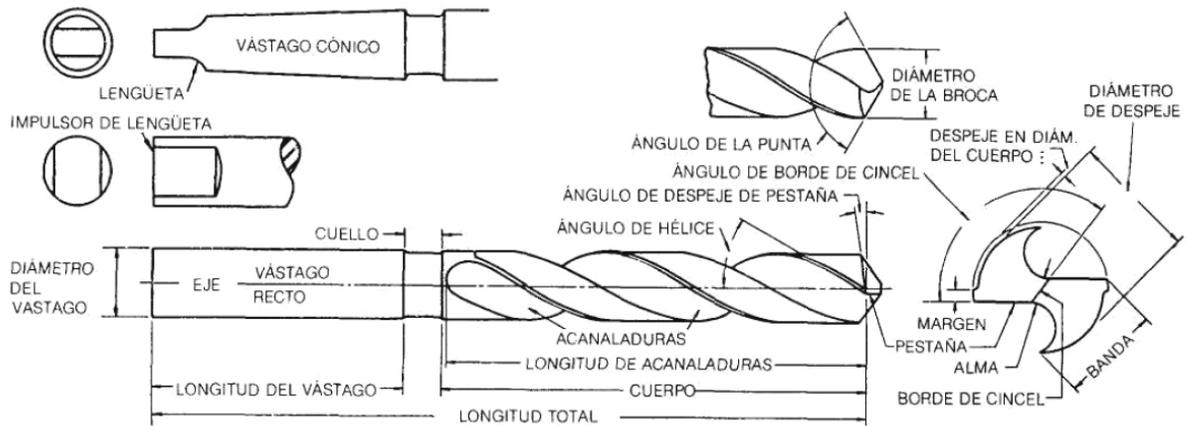
1.3.2.1 Brocas.

La broca es una herramienta de corte de puntas múltiples para taladrar agujeros internos y externos en la pieza de trabajo. Los escariadores (rimas), avellanadores, ensanchadores (abocardadores), fresas de puntos y otros, están muy relacionados con las brocas (mechas), ya que también utilizan el mismo tipo de avance y acción cortante que la broca. Durante la perforación, la pieza de trabajo se mantiene fija o se la hace girar; la acción cortante es desarrollada por la rotación en la broca. El avance de la broca es en línea recta (Fig. 1-10). La broca *en espiral* o salomónica es la más conocida.

La intersección de acanaladuras en el extremo de la broca (punta), forma el borde cortante. El material entre las acanaladuras se llama *banda*. En el borde de la banda hay una parte realzada llamada *margen*, el cual impide, al desarrollar una separación, que la broca se trabe en el agujero. El *alma* es el área en el centro del cuerpo, entre las acanaladuras, que da rigidez a la broca. Básicamente, la punta se forma por la intersección de las acanaladuras y es afila a diversos ángulos, según el destino de uso de la broca. Un borde afilado en el extremo de la punta se llama *ángulo de filo de cincel* [19].

Los filos de la broca están en el borde de ataque de las acanaladuras y se deben cortar y esmerilar al mismo ángulo con la broca para obtener el agujero de la forma y tamaño correctos. El *vástago* de la broca es la parte que se sujeta en las mordazas del portabrocas de la máquina taladradora. Los tres vástagos de forma estándar son recto, cuadrado y cónico. El vástago cuadrado se suele usar en berbiquies de mano; los vástagos rectos se utilizan en taladradoras de banco; el vástago cónico se sujeta por medio de un manguito adaptador en las taladradoras.

Fig. 1-10 Nomenclatura de las partes de broca. (Cortesía: Standard Tool Co.) [19].



Las máquinas y herramientas taladradoras, son empleadas para una de las operaciones más comunes, o sea, taladrar agujeros virtualmente en cualquier material y pieza de trabajo. Las operaciones como escariado de agujeros, machuelado, abocardado, avellanado y fresado de puntos, que se efectúan después de taladrar, también se hacen con taladradoras.

Aunque algunas de estas operaciones pueden efectuarse en otras máquinas, como fresas y tornos, la taladradora tiene un amplio uso tiene en diversas aplicaciones. Las taladradoras son sencillas en su construcción y manejo. Además de taladrar, pueden utilizarse para perforar a fin de tener agujeros de posición y tamaño exactos en la pieza de trabajo [19].

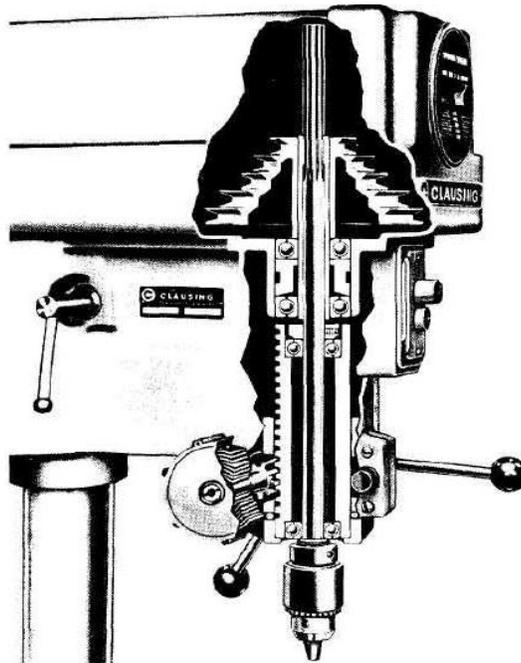
1.3.2.2 Tipos de máquinas taladradoras:

1. Taladros de mano: Se utilizan para trabajo ligero, cuando no se cuenta con taladros estacionarios. Los taladros de mano suelen tener motor eléctrico, aunque también los hay neumáticos.

2. Taladros verticales: Los taladros verticales constan de una base, columna, cabeza y mesa de trabajo. La mesa de trabajo está montada en una columna de soporte fija en la base del taladro. La mesa tiene ajuste para altura y una rotación limitada. Las piezas de trabajo están aseguradas en la mesa con múltiples tipos de sujetadores, como tornillos de banco, prensas y dispositivos especiales. La rotación de la herramienta es generada por un sistema de poleas en la cabeza del taladro. [19].

Un portabrocas está fijo en un husillo giratorio, que se encuentra dentro de un manguito fijo. El operador básicamente hace control del avance, en forma manual o automática. Los dos tipos de taladros verticales son los modelos de *banco* y de *piso*, en Figura 1-11 se observa el detalle seccional de una maquina taladradora vertical.

Figura. 1-11. Vista seccional de los detalles del husillo de una taladradora típica de 15 pulg. (Cortesía: Clausing División de Atlas Press Company.) [19].

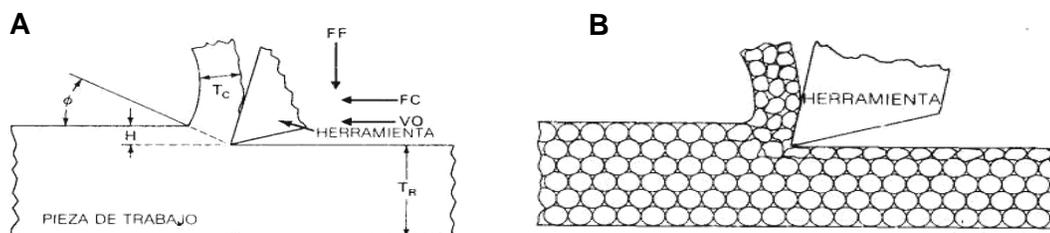


1.3.3 Formación de virutas.

Durante la remoción de material, siempre está inmersa la formación de una viruta. En todo el proceso de maquinado se producen virutas que se desechan, hasta que se logran la forma y tamaño deseados del producto. El efecto de formación de las virutas es tan importante en el maquinado, que merece una breve explicación. Las virutas, básicamente, son el resultado del movimiento de una herramienta de corte debajo o dentro y a lo largo del material de trabajo. Cuando la herramienta se mueve a lo largo de la pieza, se genera un mecanismo de falla del material y se produce la viruta.

En la figura 1-12, se ilustra el principio del corte ortogonal. La herramienta se mueve con una velocidad V_0 dentro del material de trabajo por la tuerza de la acción cortante FC y la fuerza del avance FF . Cuando la herramienta penetra en el material con una profundidad H de corte, las fuerzas FC y FF hacen que se comprima el material que está hacia delante de la herramienta. El área debajo de la zona de compresión se encuentra en estado de deformación plástica en una sección denominada *zona de cizallamiento* o de corte. La rotura o interrupción del material dentro de la zona de cizallamiento ocurre en el llamado *plano de cizallamiento* o de corte. Dicho plano ocurre en el *ángulo ϕ de cizallado*, el cual es de unos 45° aproximadamente. El material de trabajo se mueve hacia arriba y contra la cara de la herramienta de corte y se desprende de la matriz de material. La acción cortante hace que el material de trabajo que está en el plano de cizallamiento se comprima y se mueva hacia arriba y contra la cara de la herramienta. La deformación ocurre tanto en la viruta como en la pieza de trabajo, debajo de la herramienta de corte (Figura 1-12).

Fig. 1-12 A. Principios del corte ortogonal. B: Deformación de la viruta y la pieza de trabajo por el corte [19].



La deformación ocurre en diferentes etapas del maquinado, según el tipo de material. La ruptura o separación del material de la pieza de trabajo ocurre cuando se llega a un valor crítico para cualquier material. El hierro fundido, que es un material quebradizo, se fracturará con facilidad, porque tiene una elevada resistencia a la deformación plástica.

Los materiales dúctiles, blandos, tienen menor resistencia a la deformación y a la fractura. Los materiales con baja resistencia a la deformación plástica producen una viruta continua. Los materiales quebradizos tienen alta resistencia a la deformación y producen virutas pequeñas y segmentadas que se fracturan o seccionan con facilidad.

1.3.3.1 Tipos de virutas.

Durante el maquinado, se producen diversos tipos de virutas. El tipo de viruta depende de la velocidad de corte, tipo de la herramienta, propiedades del material, temperatura en la zona de corte y la profundidad y avance del corte. Las virutas se clasifican como discontinuas, continuas o continuas con borde acumulado (Fig. 1.13a, b y c).

Virutas discontinuas o segmentadas: Estas virutas se suelen producir cuando se maquinan materiales quebradizos, como el hierro gris. Este tipo de viruta es formada porque el material que está siendo trabajado posee una alta resistencia a la compresión y a la deformación plástica. Por ende, el material se fragmenta en virutas pequeñas, segmentadas. El terminado de la superficie por lo general es de alta calidad cuando se forman virutas discontinuas. Además, la potencia requerida para maquinar el material es más baja cuando se forman virutas discontinuas. En el caso del maquinado de materiales duros, el filo tiende a desgastarse y se redondea, Figura 1-13a.

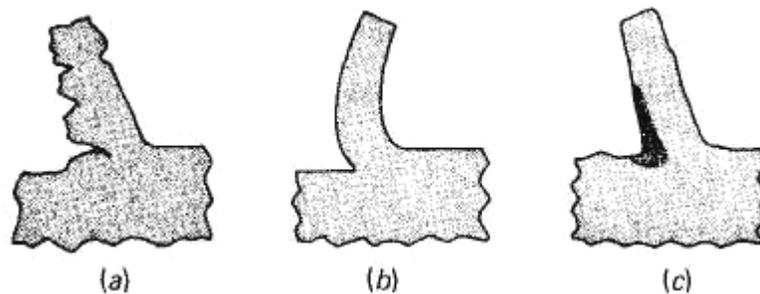
Cuando se desgasta la herramienta, se necesita presión adicional en la herramienta, la cual ocasiona mayor fricción entre la herramienta y el trabajo y se genera desprendimiento de energía en forma de calor adicional. Según sea el material de la herramienta, el aumento en el calentamiento puede reducir su duración. El acabado de la superficie del material se vuelve áspero conforme se gasta el filo de la herramienta [19].

También pueden formarse virutas discontinuas al cortar un material dúctil si se utilizan bajas velocidades de corte y avance fuerte. Las herramientas de corte pueden incluir rompe virutas (interrupciones en la cara de la herramienta), de esta forma se favorece la formación de viruta segmentada. Las virutas discontinuas tienen mayor ventaja frente a otros tipos, ya que eliminación es más fácil en comparación a otras.

Virutas continuas: Son las que se producen con la deformación continua del material directamente delante de la herramienta de corte, en Figura 13-1b, se observa la geometría característica que presenta este tipo de virutas.

Las virutas se extienden a lo largo de la herramienta de corte sin fractura. Por lo general, la viruta continua se forma al cortar un material dúctil con velocidad un tanto alta. Esta forma de viruta tiene una superficie posterior lisa (lado de la herramienta de corte) y un frente áspero y deformado. Cuando se producen virutas continuas, tienden a enmarañarse en la herramienta de corte, en vez de rizarse y romperse como las virutas discontinuas. Además de que se enmarañan, es más difícil eliminar las virutas continuas. [19].

Fig. 1-13. Vista seccional de (a) viruta discontinua; (b) viruta continua y (c) viruta continúa con borde acumulado.



Virutas continuas con borde acumulado: estas virutas son muy similares a las continuas, pero se forma un borde de masa acumulada de material junto al filo de la herramienta. Durante el maquinado, se fusionan o sueldan entre sí partículas del material.

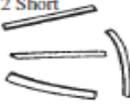
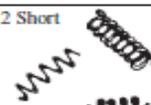
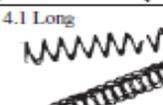
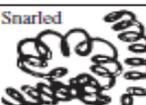
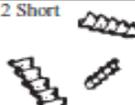
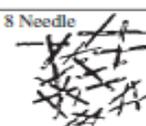
Mientras se hace el corte, estas partículas se quedan en la herramienta un corto tiempo y luego se resbalan y caen de la superficie maquinada. Se vuelven a acumular partículas y

se repite el proceso. Cuando se forman virutas continuas con borde acumulado, la acción de corte es fricción en vez de corte. La fricción aumenta el rozamiento entre la herramienta y el trabajo y se generan temperaturas más altas, las cuales aumentan la deformación de la pieza de trabajo y disminuyen la duración de la herramienta [19].

Además del borde acumulado que se forma al maquinar materiales dúctiles, hay otros factores que influyen en la formación del tipo de viruta. La fricción entre la herramienta y el borde de trabajo puede ocasionar la formación de un borde acumulado en la herramienta. La fricción puede reducirse aplicando un lubricante. La lubricación reduce la fricción.

La identificación de las virutas formadas en un proceso de corte; aporta gran información respecto al desempeño de una aleación frente a un proceso de pérdida de material. La presencia de ciertos elementos químicos en la matriz del material, puede favorecer o no la formación de cierto tipo de viruta; que en casos puntuales del maquinado por taladrado para algunas aleaciones no ferrosas, la presencia de cierto tipo de viruta o el porcentaje de formación de una viruta en particular; puede estar asociado a un buen comportamiento de maquinabilidad o viceversa, en función a la presencia de los elementos aleantes.

Fig. 1-14. Clasificación de las virutas según ISO 3865, anexo G [24].

Curling		Favorable	Unfavorable	
Straight	1 Ribbon Chips	1.2 Short 		1.1 Long/1.3 Snarled 
	2 Tubular Chips	2.2 Short 	2.1 Long 	2.3 Snarled 
Mainly Up- Curling	3 Spiral Chips		3.1 Flat/3.2 Conical 	
	4 Washer type Chips	4.2 Short 	4.1 Long 	4.3 Snarled 
Up- and Side- Curling	5 Conical Helical Chips	5.2 Short 	5.1 Long 	5.3 Snarled 
	6 Arc Chips	6.2 Loose/6.1 Con. 		
	7-8 Natural Broken Chips	7 Elemental 		8 Needle 

En Figura 1-14, se presenta la clasificación general de las virutas formadas en un proceso de corte según ISO 3865. Es posible observar que las diferentes geometrías, longitudes y formaciones ideales o no ideales de ciertos tipos de viruta en el proceso de maquinabilidad, permiten determinar en este tipo de procesos, cuál es de estas formaciones puede ser favorable en una aleación específica. Esta condición, está asociada al comportamiento de un material que puede tener un buen desempeño ante el corte, en función a su composición química.

1.4 Toxicidad y efectos del Plomo en la salud humana.

Cuando las tuberías en servicio de transporte de agua potable contienen Plomo, este elemento puede infiltrarse en el agua por el desarrollo de fenómenos corrosivos, especialmente en los casos donde el agua tiene altos niveles de acidez o por presencia de tipo mineral en el líquido, los procesos de corrosión son de fácil evolución en este tipo de situaciones. La problemática de más frecuencia se presenta con el latón o en los accesorios de grifería de latón cromado y los elementos fijos que han sido instalados con soldaduras a base de Plomo, de las cuales cantidades significativas de este elemento son desprendidas e infiltradas en el agua potable; que puede ser consumida por seres vivos.

Los hogares construidos antes de la década de los 80, tienen más alta probabilidad de tener dentro de su construcción, tuberías de transporte de agua, elementos fijos y soldaduras de Plomo. La Ley de Agua Potable Segura (SDWA), redujo drásticamente el contenido máximo permitido de este elemento (los contenidos que son considerados “*libres de Plomo*”) a un promedio ponderado del 0,25% calculado sobre superficies húmedas de las tuberías, los accesorios de tuberías y plomería. Para el caso de las soldaduras un 0,2% y fluxes. [33]

Es posible encontrar múltiples factores involucrados en la infiltración del plomo en el agua, entre los más relevantes:

- Propiedades químicas del agua (acidez y alcalinidad) y los tipos y cantidades de minerales en el agua.
- Concentración de plomo que entra en contacto con el agua.
- Temperatura del agua.
- Grado de deterioro de las tuberías;
- Tiempo de permanencia del líquido en las tuberías;
- Presencia de capas o revestimientos protectores en el interior de los materiales de plomería.

La problemática de los fenómenos de corrosión y los contenidos de Cobre en el agua potable, ha hecho que la EPA (*Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos*),

emita una normativa sobre el control de los contenidos de Plomo y Cobre en el agua, denominada "Lead and Copper Rule LCR". En la norma NFS ANSI 61 2013, de acuerdo a lo establecimientos de la autoridad SDWA, han sido establecidos criterios de tratamiento de control de corrosión de forma preventiva para evitar que estos dos elementos contaminen el agua y puedan generar efectos nocivos para la salud humana. [30]

Las normas hacen referencia a controles de corrosión, donde las instalaciones de transporte del líquido, garanticen que el agua sea lo menos corrosiva posible para los materiales con los que esta entra en contacto.

1.4.1 Efectos en la salud por exposición de Plomo.

La ley de agua potable segura, instaure que la EPA puntualmente determine el contenido de contaminantes en el agua potable, los cuales no causen efectos adversos en la salud con un margen aceptable de seguridad. Estos objetivos de salud no aplicables, en base en los factibles riesgos para la salud, son denominados *Objetivos de Nivel Máximo Contaminante (MCLG)*.

La EPA estableció que el objetivo a nivel máximo de contaminante para el Plomo en el agua potable debe ser cero, debido a que este elemento es un metal altamente tóxico, que puede generar daños en la salud humana, incluso en bajas exposiciones. Este elemento tiende a bioacumularse en el organismo a lo largo del tiempo.

Los niños, bebés y fetos son los más vulnerables al plomo dado que los efectos físicos y de comportamiento del plomo se producen en menores niveles de exposición en los niños que en los adultos. Una dosis de plomo que produciría poco efecto en un adulto puede producir un efecto significativo en un niño. En los niños, los bajos niveles de exposición se han relacionado con daños en el sistema nervioso central y periférico, problemas de aprendizaje, de crecimiento, discapacidad auditiva, y problemas de formación y función de los glóbulos.

Los Centros para el Control y Prevención de Enfermedades (CDC) recomiendan que se inicien acciones de salud pública cuando el nivel de plomo en la sangre del niño sea de 5 microgramos por decilitro ($\mu\text{g}/\text{dl}$) o más.

En la niñez, incluso bajos contenidos de Plomo en la sangre de los niños puede causar: *coeficiente intelectual (IQ) deficiente e hiperactividad, crecimiento tardío, problemas de audición, anemia y en algunos casos con ingestas de Plomo pueden causar convulsivos o estado de coma.*

De igual manera, las mujeres en estado de embarazo, al tener contacto con el Plomo puede producir múltiples efectos nocivos en la salud de la gestante. Debido a que el Plomo puede bioacumularse en los organismos con el paso del tiempo y almacenarse en el hueso junto con el Calcio. Las consecuencias en estos casos pueden ser muy graves, en la madre y en desarrollo del feto, tales como: *crecimiento limitado y nacimiento prematuro.*

2. Desarrollo Experimental.

En el presente capítulo se hace una descripción detallada de todos los pasos llevados a cabo para cumplir con los objetivos planteados en el estudio. Durante la construcción de la presente investigación, se llevaron a cabo una serie de pruebas y procedimientos a nivel de laboratorio en los Laboratorios de Materiales y Procesos de la Universidad Nacional de Colombia, dentro de las cuales están: Prueba piloto de taladrado, obtención de aleaciones metálicas por fundición (latones al Bismuto), análisis metalográfico, medición de durezas Brinell, microscopía electrónica SEM, análisis de composición química XRF y pruebas de taladrado mecánico.

Dentro del desarrollo experimental, fueron empleados una serie de equipos para cada procedimiento, de la misma manera se contó con la asesoría del director coordinador de los laboratorios y personal de apoyo para el efecto de cada uno de estos.

2.1 Pruebas piloto de taladrado.

Con el fin de evaluar la sensibilidad del ensayo y el comportamiento de maquinado, se desarrollaron una serie de pruebas piloto de taladrado a algunas aleaciones comerciales de cobre, tales como: Bronce SAE40, Cobre electrolítico 99.9 y Latón comercial 6040. Para efectos de las pruebas se empleó un taladro de prensa marca OTMT modelo OT 21632 de 60 Hz y 110 voltios, como herramienta de corte se empleó una broca de punta de tungsteno de diámetro de 1/8".

Se hicieron varias pruebas de cargas puntuales, para definir el peso ideal y la carga a aplicar en la prueba final de taladrado, condición que sería aplicada en la prueba de

maquinado a los latones al Bismuto, para ello se emplearon masas desde 500g hasta 3.000 gramos.

Estas masas fueron fijadas a un montaje hecho sobre una polea que reemplazó la manija, que se encuentra sujeta al cabezote del taladro y que permite desarrollar el movimiento vertical descendiente para que la broca penetre el material. Las masas fueron sujetadas a la polea a través de un gancho metálico asegurado a una guaya en acero que envuelve la polea. La carga total aplicada fue de 1,36 kN.

Después de hacer el montaje completo en el taladro, y variando las masas; se definió que la masa indicada es la de 9.300 gramos. Luego se dispuso el montaje de las tres muestras en la mesa de trabajo del equipo, una a una las muestras fueron perforadas aplicando el peso ya establecido y con ayuda de un cronometro se mide el tiempo de perforado, Figura 2-1.

Figura 2-1. Montaje muestras prueba piloto de taladrado



El parámetro de profundidad del ensayo fue establecido evaluando la relación de los tiempos entre las tres muestras y los milímetros penetrados en los materiales, se hicieron pruebas con profundidades de 2mm, 5mm y 10 mm.

Pudo observarse que para poder obtener datos del ensayo el valor mínimo de profundidad ideal es de 5 mm, debido a que en valores menores a este para muestras como el Bronce SAE 40, los tiempos son inferiores a un segundo, dificultando la toma del tiempo ensayo por la operación; situación contraria al latón y cobre que mostraron tiempos más altos. También se definió esta profundidad, teniendo en cuenta que después de un determinado tiempo en materiales como el cobre electrolítico, el incremento del tiempo fue notorio pero la profundidad no mostró avance. Por ende, estas condiciones permitieron definir que la profundidad del taladrado sería de 5mm para el ensayo.

Esta condición de profundidad, definió también un parámetro importante, porque en la etapa de moldeo y fabricación de las probetas de latones al Bismuto, el espesor de la barra permitirá el desarrollo de la prueba de taladrado en los latones al Bismuto.

2.2 Obtención de latones al Bismuto.

Para la fabricación de las aleaciones metálicas del estudio fueron desarrolladas varias etapas de proceso, fueron empleados múltiples equipos y accesorios del Laboratorio de fundición y tratamientos térmicos. Las materias primas para la fabricación de las aleaciones fueron suministradas por proveedores Nacionales, para el caso del Cobre Electrolítico 99.9, Zinc Metálico, Plomo Metálico, Aluminio, Estaño Metálico y demás consumibles; en el caso del Bismuto Metálico 99.9, fue suministrado por la empresa mexicana FQ CHEMICALS, debido a que en el mercado colombiano no se encuentra este metal. México es uno de los países líderes en la comercialización de este elemento por la gran cantidad de yacimientos minerales de Bismuto.

De igual forma, se efectuó una prueba piloto para evaluar las posibles pérdidas por proceso de fundición para el Bismuto, para este ensayo se empleó un horno eléctrico de joyería marca Romanoff de capacidad 850 C.C

2.2.1 Pruebas piloto Cu-Bi.

Con el fin de tener más información del comportamiento del Bismuto metálico durante el proceso de fusión, se efectuó una prueba piloto; esta consistió en efectuar un proceso de fusión controlado fabricando una aleación de Cobre con Bismuto, se estableció obtener

310 gramos de aleación, con una composición estimada de 95% Cu y 5 % Bismuto en peso. Para la fabricación de esta aleación se emplearon metales puros. La temperatura máxima del proceso fue de 1085 °C., Figura 2-2.

Figura 2-2. A) Horno eléctrico Romanoff. B) Carga material Cu-Bi



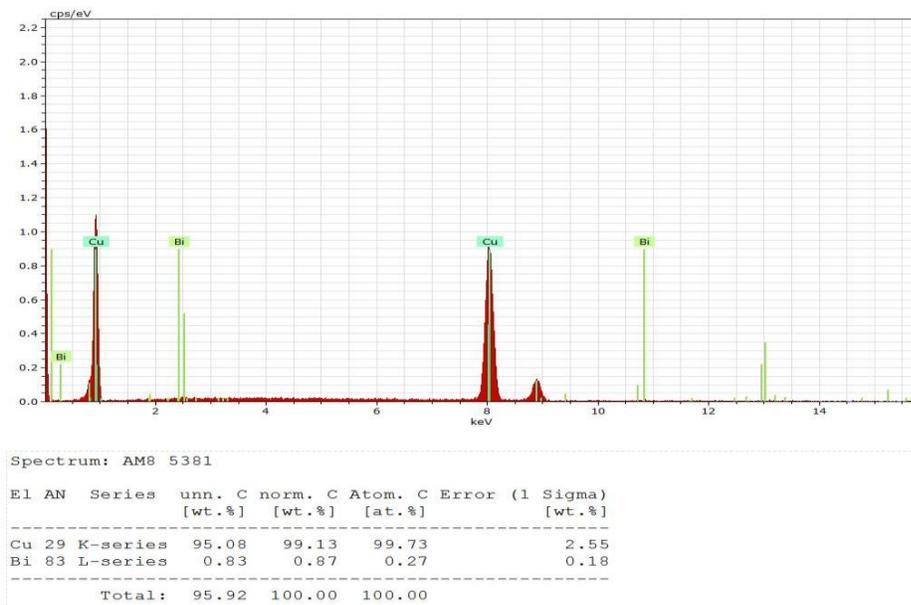
Una vez efectuada la fusión, se desarrolló una colada, donde el material solidificó en coquilla de hierro gris, ya solidificado y desmoldado fue tomado un botón de muestra para análisis químico. Las probetas obtenidas de esta colada, fueron dispuestas para análisis químico y observación por microscopia electrónica SEM; en análisis químico de las muestras piloto se hizo empleando un equipo marca TESCAN modelo VEGA3.

Para este análisis los parámetros del equipo fueron: Magnificación 1.00X, Modo de Detección SE, BSE y el uso de la Sonda EDS marca Bruker para análisis químico con HV. 30.0 kV, ver Anexo D.

El objetivo de esta prueba; fue evaluar las posibles pérdidas de Bismuto por evaporación del elemento durante la fusión, ya que al poseer un punto de fusión de 271.3 °C, menor al punto de fusión del Cobre de 1080°C, las pérdidas por formación de gases en el proceso, deben ser contempladas al momento de la fabricación de los latones al Bismuto, donde fueron proyectadas concentraciones teóricas de contenido de este elemento en las aleaciones

Fue posible establecer según los resultados SEM-EDS, que la aleación piloto de Cu-Bi presenta un porcentaje de pérdidas por evaporación de Bismuto de un 4,13 % en peso, Con relación a la concentración estimada a la aleación piloto, Figura 2-3.

Figura 2-3. Analisis Químico SEM EDS Aleación Cu-Bi.



Ya que la concentración de Bismuto proyectada en la aleación era de un 5% en peso y según los análisis se obtuvo 0.87% en peso , hubo pérdidas del elemento en el proceso de fusión; las fueron contempladas en los cálculos de carga y el factor de eficiencia del proceso, haciendo una relación de eficiencia del proceso frente a la perdida, ese valor permitió ajustar las cantidades del metal al ser agregado durante la fabricación de los latones al Bismuto y modificar la eficiencia del elemento de un 99% a 96%, tratando de calcular una relación de compensación.

Tabla 2-1. Cálculos y resultados en prueba piloto aleación Cobre-Bismuto.

Aleación Cu-Bi(Base Calculo 310 g)				
Elemento	Contenido Teórico (wt. %)	Peso Calculo Carga (g)	Contenido Real SEM EDS (wt. %)	% Perdida Elemento
Cobre 99.9 (95%)	95% (95)	294	99,13 %	0,1%
Bismuto Metálico	5% (0.05)	15,5	0,87 %	4,13%
Total	100%	300	100%	4.23

2.2.2 Selección de materiales y cálculos de carga.

Durante esta etapa del proceso de fabricación de los Latones al Bismuto, se estableció obtener mediante fundición tradicional una aleación “Madre” en base Cobre- Zinc. Los materiales seleccionados para la manufactura de esta aleación fueron principalmente: Cobre electrolítico con 99.9% de pureza y Zinc Metálico, reactivos químicos tales como fundentes para Bronces y desescoriantes. En figura 2-4, se observa las presentaciones de las materias primas para la fabricación del latón madre.

La selección de buenas materias primas aseguro que la calidad en cuanto a la composición química de la aleación fuera preservada. Esta condición garantizo que se obtuviera una matriz ideal los procesos de refusion y obtención de los latones bismutados y plomado.

Figura 2-4. Materias primas para fabricación de latón madre: Cobre electrolítico 99.9 -Zinc metálico.



Con el fin de corroborar la eficiencia en el proceso fusión del latón; a nivel de laboratorio fue desarrollada una colada de prueba de 2,8 kilogramos en el horno basculante. Se hicieron algunos cálculos generales para esta cantidad, donde se proyectaron eficiencias teóricas para el Cobre y el Zinc del 99% y 97% respectivamente, la información que fue recolectada de esta prueba contribuyó a establecer un dato más real de las posibles pérdidas durante la fusión.

El tipo de latón que fue proyectado obtener; fue una aleación de latón amarillo cercano en composición a un latón comercial 6040, donde los contenidos de Cobre están en rangos

de 55-60% en peso y Zinc de 36-40% en peso; esta aleación de prueba es libre de contenido de Plomo, en Capitulo 3 de este documento y Anexo B, son expuestos los valores de concentración de estos elementos obtenidos en la aleación fabricada.

Una vez obtenida la aleación de prueba, fue establecido un cálculo de carga donde se contempla la eficiencia y posibles pérdidas reales del proceso de fusión para la obtención del latón Madre, se definió una eficiencia para el Cobre de 97% y Zinc del 88%; en base a esto fueron prepararon las cantidades de material a pesar para la fabricación del latón; entre estas cantidades fue incluido el material obtenido en la fusión de prueba, el cual se denominado “retorno de latón” y se empleó para refusión, en Tabla 2-2, son descritos los cálculos de carga para la obtención de la aleación Madre.

Esto cálculos de carga, fueron elaborados en base a la capacidad del Horno basculante, el cual tiene un volumen de producción de 10 kg por colada. Para efectos de obtención de varias muestras para el estudio, fue necesario proyectar una cantidad de aleación madre suficiente que permita desarrollar refusiones posteriores para la obtención de los latones bismutados; la investigación proyectó obtener quince (15) aleaciones de estudio, por ende; se fabricaron en total veinte (20) kilogramos de aleación Madre.

Se estimó obtener mínimo un (1) kilogramo de aleación madre por aleación al Bismuto, y se definió que la geometría más adecuada de las barras de latones fuera de tipo rectangular, esta cantidad podrá asegurar tener suficiente cantidad de muestras para caracterización.

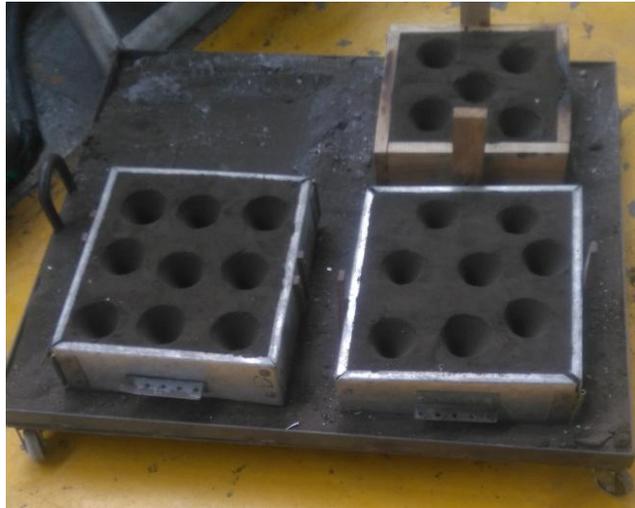
Tabla 2-2. Cálculos de Carga Horno Basculante-Capacidad 10 Kg. Fuente: Autor

Aleación Madre (Base Calculo 10000 g)	
Elemento	Peso (g)
Cu 99.9	4.350
Retorno latón	2.750
Zn Metálico	6.195
Total	10.545

2.2.3 Moldeo, fusión latón madre y limpieza.

Una vez definidas las materias primas, cantidades y equipos a emplear, se prepararon los moldes para la fabricación de la aleación madre. Para este procedimiento, fue usada arena de moldeo en verde con mezcla de Bentonita como aglomerante e hidratación con agua. En Figura 2-5, se observa el detalle de las cavidades en la arena y el tipo de caja empleadas; estas cajas se destinaron a patio de colada para el desarrollo del proceso de colada.

Figura 2-5. Moldes de arena en verde. Fuente: Autor.



Posterior al proceso de moldeo, se lleva a cabo la preparación del horno para la fusión de las materias primas. Previo se verifica el estado de funcionamiento del equipo, alimentación de Gas Natural, encendido y suministro eléctrico; se selecciona un crisol de Grafito con capacidad de 12 Kg, el cual fue precalentado en un ambiente controlado antes del uso en el interior del horno, según recomendaciones del fabricante.

Ya efectuado los procedimientos de verificación de funcionamiento del horno, se procede a hacer el pesaje de las materias primas para el cargue de la primer colada de la aleación Madre según los cálculos de carga establecidos en la Tabla 2-2, para ello se empleó una balanza OHAUS modelo R31P30 con capacidad máxima de treinta kilogramos. Se inicia el proceso de fusión estableciendo como temperatura de trabajo para esta aleación 1150

°C, el orden de carga dentro del crisol se definió: retorno de latón-cobre electrolítico-zinc, según indicaciones del técnico de operación del horno.

Periódicamente de forma manual se llevaba a cabo la agitación y movimiento de la masa fundida, de igual manera empleando un pirómetro óptico se efectuó control de temperatura durante todo el proceso de fusión y colada, Figura 2-6.

Figura 2-6. De izquierda a derecha: Horno Basculante a Gas. / Fusión Aleaciones



Simultaneo a la fusión, se dispuso las cajas moldeadas en posición de cierre para la recepción del metal fundido. Ya alcanzada la temperatura de fusión del latón, se agrega 100 g de Fundente para Bronces FUNDEX, con el fin de disminuir el punto de fusión de la masa fundida, formar escorias, desoxidare el baño y efectuar el vaciado del material.

Figura 2-7. Horno detenido para vaciado del material / piezas obtenidas colada 1.



Como se observa en la Figura 2-7, una vez alcanzada la temperatura de colada; se efectúa el vaciado del material en cada una de las cajas de moldeo. Durante esta etapa se llevaron a cabo dos coladas (C1 y C2) debido a la capacidad de producción del horno y las cantidades establecidas para la investigación.

Los contenidos máximos de trazas de Si y P, que se originaran por el fundente desoxidante, durante la fusión de los latones, no deben superar contenidos en peso del 4% y 0.020 % respectivamente, esta condición evitará formación de poros internos en las piezas.

Para cada una de las coladas, se efectuó el mismo procedimiento de moldeo, cargue, fusión, vaciado y desmoldeo. En total se obtuvo 19.5 Kg de aleación madre distribuidos en dos coladas. Posterior a la solidificación del material y enfriamiento del mismo, se procede a hacer el desmoldeo, desbarbado y limpieza de cada de los conos de Latón Madre obtenidos en la fusión empleando herramientas de corte, Figura 2-8.

Figura 2-8. Muestras de Latón Madre obtenidas.



Ya obtenidas las muestras de Latón Madre, se toma una muestra representativa de cada colada con destino a análisis de Espectrometría de Emisión Óptica OES, empleando el equipo Minilab 150 de la marca GNR INSTRUMENTS corroborando la composición química de las aleaciones metálicas obtenidas, como se describe en el capítulo 3 del presente libro.

Las muestras obtenidas de Latón, fueron el material base para el desarrollo de la siguiente etapa del proceso previa a la obtención de las aleaciones en estudio.

2.3 Análisis químico por espectrometría de emisión óptica OES del latón madre.

Una vez fundido todo el material base para la fabricación del Latón madre, después de la solidificación, enfriamiento y desmoldeo es tomada una muestra representativa de las coladas 1 y 2 para ser llevadas análisis químico por Espectrometría de Emisión Óptica., ver Tabla 2-3. Para este análisis se empleó el equipo MINILAB 150 marca GNR ANALYTICAL INSTRUMENTS de la empresa S&S INGENIERIA. El parámetro de identificación de la aleación fue empleando la curva de calibración “Brass”, Figura 2-9.

Figura 2-9. Espectrómetro de emisión óptica MINILAB 150.



Durante la “corrida” de muestras, por cada una de estas se hicieron tres quemas para la obtención de datos de contenido químico por elementos presentes, Tablas 2-3 y 2-4.

Tabla 2-3. Composición química Latón Madre colada 1- C1.

Ítem	Elemento químico (wt. %)											
	Zn	Pb	Sn	P	Mn	Fe	Ni	Al	S	Si	Cr	Cu
1	39,01	0,015	<0,010	<0,005	0,010	0,021	<0,010	0,006	<0,005	<0,0010	<0,005	60,91
2	38,98	0,012	<0,010	<0,005	0,009	0,021	<0,010	0,008	<0,005	<0,0010	<0,005	60,95
3	39,25	0,019	0,012	<0,005	0,010	0,020	<0,010	0,007	<0,005	<0,0010	<0,005	60,67
Avg.	39,08	0,015	0,010	<0,005	0,010	0,020	<0,010	0,007	<0,005	<0,0010	<0,005	60,84

Tabla 2-4. Composición química Latón Madre colada 2 -C2.

Ítem	Elemento químico (wt. %)											
	Zn	Pb	Sn	P	Mn	Fe	Ni	Al	S	Si	Cr	Cu
1	38,52	0,019	<0,010	<0,005	0,010	0,021	<0,010	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	61,40
2	38,47	0,016	0,012	<0,005	0,010	0,021	<0,010	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	61,46
3	38,54	0,034	0,015	<0,005	0,010	0,021	<0,010	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	61,37
Avg.	38,51	0,023	0,012	<0,005	0,010	0,021	<0,010	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	61,41

Las muestras de latón Madre, obtenidas según el procedimiento descrito anteriormente; mostraron algunas pequeñas diferencias en cuanto a la composición química teórica a obtener en los elementos de interés, como se mencionó al inicio de este capítulo; la aleación proyectada a obtener fue un latón amarillo similar al 6040 libre de Plomo; sin embargo se obtuvieron contenidos de Cobre de 61,41 y Zinc 38,51 en la colada 1; mientras que en la colada 2 los contenidos de estos elementos fueron 60,84 y 39,08 respectivamente, Tablas 2-3 y 2-4.

A pesar que ambas coladas fueron efectuadas con el mismo procedimiento, posiblemente por temas de manufactura (orden de carga) y control en variables como la temperatura; la

formación de gases favoreció el “arrastre” del Zinc; efecto que podría generar disminución en el contenido de este elemento en peso; respecto al contenido teórico calculado.

Por ser el Zinc un elemento con un punto de fusión bajo (415,9°C) frente a un metal como el Cobre, existe una mayor probabilidad de gasificación del elemento en forma de óxidos, las altas temperaturas aumentaron la evaporación del Zinc.

2.4 Fundición latones al Bismuto.

Una vez obtenidas las aleaciones madre con sus correspondientes análisis de composición química, se procede a la elaboración de los latones al Bismuto centro de esta investigación. Para cumplir con este objetivo, se llevaron a cabo una serie de procedimientos similares a los desarrollados durante la fundición del Latón Base.

Antes de iniciar el proceso de obtención de los latones bismutados, se definieron los rangos de concentración de Bismuto en las aleaciones a fabricar, se tomaron de referencias algunos valores de concentración como presenta la ASTM B584, sin ser necesariamente los mismos (ver tabla 2-5).

Al evaluar otras concentraciones del elemento en las aleaciones que la norma expone, el objetivo fue evaluar si estas concentraciones pueden generar un efecto similar o diferente al Plomo, el cual está presente en los latones de grifería común; cuyo contenido está en rangos desde 2-5% en concentración. Por tal razón, fue incluido dentro de la investigación una aleación de latón plomado, fabricada con los mismos parámetros de las aleaciones bismutadas; esta aleación de Plomo ha sido tomada como muestra de referencia para desarrollar la evaluación de maquinabilidad.

Una vez definidas estas condiciones, se procede a efectuar los respectivos cálculos de carga para la fusión de los latones. Se estableció fabricar quince (15) aleaciones con distintas concentraciones de Bismuto, a partir del Latón madre obtenido en la primera fase.

Estas aleaciones de latones Bismutados, son fabricadas con el latón Madre de las coladas C1 y C2; sin embargo, como estas dos aleaciones difieren en contenidos de Zinc y Cobre frente a los contenidos teóricos; fue necesario desarrollar cálculos de carga para las refusiones proyectando obtener nuevamente estos contenidos de estos dos elementos lo

más cercano posible al latón 6040, estos cálculos contemplaron agregar las cantidades necesarios de Zinc para acercarse a este parámetro.

En Tabla 2-5, es posible observar los contenidos teóricos proyectados a obtener en las aleaciones de latones Bismutados, teniendo en cuenta las condiciones descritas anteriormente, estas aleaciones de latones también tienen incluidas algunas trazas de otros elementos químicos como el Aluminio (%), Estaño (%) y Plomo (%); los dos primeros elementos para efectos de colabilidad y contribuir a minimizar las pérdidas de Zinc durante las fusiones, el Estaño también contribuye a disminuir el efecto de dezincificación de estas aleaciones.

Tabla 2-5. *Contenidos de Teóricos de Bismuto y otros aleantes de los latones bismutados.*

Muestra	% Contenido Bi	% Contenido Cu	% Contenido Zn	% Contenido Sn	% Contenido Al	% Contenido Pb
LBi1	0	60,84	40,61	0,2	0,3	0
LBi2	1,15	60,84	40,61	0,2	0,3	0
LBi3	1,25	60,84	40,61	0,2	0,3	0
LBi4	1,45	60,84	40,61	0,2	0,3	0
LBi5	1,6	60,84	40,61	0,2	0,3	0
LBi6	2,1	60,84	40,61	0,2	0,3	0
LBi7	2,5	60,84	40,61	0,2	0,3	0
LBi8	2,8	60,84	40,61	0,2	0,3	0
LBi9	3	60,84	40,61	0,2	0,3	0
LBi10	3,4	60,84	40,61	0,2	0,3	0
LBi11 (Pb)	0	60,84	40,61	0,2	0,3	3,0
LBi12	1,9	60,84	40,61	0,2	0,3	0
LBi13	2,6	60,84	40,61	0,2	0,3	0
LBi14	2,9	60,84	40,61	0,2	0,3	0
LBi15	3,4	60,84	40,61	0,2	0,3	0

Ya definidas las concentraciones a obtener en las muestras de latones bismutados, se procede a efectuar los cálculos de carga para las refusiones; se tomó como base de cálculo un kilogramo de capacidad y fue empleado un horno mufla LINDBERG con un crisol de grafito, la temperatura de operación es de 1100 °C, se observan los cálculos de carga elaborados para cada una de las aleaciones obtenidas, Tabla 2-3.

Dentro de los cálculos desarrollados en el balance de carga, previo a la fabricación de los latones bismutados, fue tomada en cuenta la información recolectada y observada durante las pruebas piloto y la fusión de prueba del latón Madre incluyendo la composición química de ambas coladas, como fue explicado en 2.1.4; estas pruebas permitieron conocer más respecto a las eficiencias en el proceso y las posibles pérdidas que se puedan presentar durante la obtención de los latones al Bismuto.

Los cálculos de carga para los latones se efectuaron con las siguientes formulas:

Latón Madre:

Retorno latón: 2,75Kg

Carga a compensar (Cu + Zn) = 10Kg(capacidad) – retorno = 7,25Kg

Carga Cu = (carga compensada)(composición a obtener 60%) (2.1)

Carga Zn = (carga compensada)(composición a obtener 40%) (2.2)

Fue necesario calcular los ajustes de Zinc, en cuanto a los contenidos que fueron ingresados en la colada desde el retorno y también fue calculado el contenido teórico proyectado en las aleaciones *Madre* (C1 y C2) a obtener como se expone en 2.3, 2.4 y 2.5:

$$\mathbf{Pérdida\ Zinc} = \frac{\mathit{carga\ de\ Zn}}{\mathit{88\% \ eficiencia}} = \frac{2,9\ kg}{88\ \%} = 0,329\ Kg\ (32,95\ g) \quad (2.3)$$

$$\mathbf{Zinc\ Total} = \mathit{carga\ Zn} + \mathit{pérdida\ Zn} = 2,9\ kg + 0,3295 = 2,932\ kg \quad (2.4)$$

$$\mathbf{Zinc\ en\ retorno} = \frac{(\mathit{Contenido\ Zn\ teorico} - \mathit{Contenido\ Zn\ de\ ingreso}) * \mathit{Total\ Carga}}{88\ \% \mathit{Eficiencia}}$$

$$\text{Zinc en retorno en C1} = \frac{(40,61 - 38,51) * 10kg}{88 \%} = 0,23 kg (230 g) \quad (2.5)$$

$$\text{Zinc en retorno en C2} = \frac{(40,61 - 39,08) * 10kg}{88 \%} = 0,18 kg (180 g)$$

De igual manera, se calculó los ajustes necesarios de Cobre y Zinc también, en función a los contenidos de estos dos elementos que ingresaron en el retorno de latón:

Ajuste Zn en retorno

$$= \frac{(\text{Contenido Zn teorico} - \text{Contenido Zn de ingreso}) * \text{Total Carga}}{88 \% \text{Eficiencia}} \quad (2.6)$$

$$\text{Ajuste Cu en retorno} = \frac{(60,61 - 58,06) * 10kg}{99 \%} = 0,25 kg (257 g) \quad (2.7)$$

$$\boxed{\text{Total Cu} = 4,35 kg + 0,257 kg = 4,6 kg} \quad (2.8)$$

$$\boxed{\text{Total Zn} = 2,93 kg + 0,35 kg = 3,28 kg}$$

Debido a que las composiciones químicas del retorno de latón fueron diferentes en las dos coladas; los anteriores cálculos se hicieron con el fin de compensar las diferencias y acercarse a la composición teórica proyectada en los latones bismutados, como se observa en estos cálculos las eficiencias por elemento para el caso del Zn fueron modificadas, contemplando la vaporización del elemento.

Los balances de carga para los latones al Bismuto, fueron desarrollados con una base de cálculo de un (1) kilogramo, incluyendo los contenidos de las trazas de elementos como el Estaño, Aluminio y Plomo como se definió en Tabla 2-5.

A continuación se relaciona los cálculos efectuados para la aleación LBi1 como ejemplo ilustrativo; fue aplicada la misma formulación de los cálculos para el resto de las aleaciones de la investigación; teniendo en cuenta los contenidos proyectados en cada una de estas y los valores teóricos de Bismuto deseadas.

$$\% Zn = \frac{(40,5 - 39,08) * 1 kg}{88 \%Eficiencia} = 0,016 kg (16,1 g de Zn) \quad (2.9)$$

$$\% Sn = \frac{(0,2) * 1 kg}{99 \%Eficiencia} = 0,002 kg (2,0 g de Sn) \quad (3.0)$$

$$\% Al = \frac{(0,3) * 1 kg}{99 \%Eficiencia} = 0,003 kg (3,0 g de Al) \quad (3.1)$$

$$\% Bi = 0,0 g$$

$Total Aleantes = 16,1 g Zn + 2,0 g Sn + 3,0 g Al = 21,1 g$	(3.2)
---	-------

Para definir el peso de laton *Madre* a agregar en cada uno de los latones al Bismuto, se estableció la siguiente ecuación en la cual se refleja la diferencia del peso total de los aleantes menos el peso total de la carga:

$$Peso Restante de la Carga = 1000 g - Total Aleantes = 978,9 g \quad (3.3)$$

Para calcular los valores teóricos del Bismuto que fueron agregados desde las aleación *LBi2* hasta la *LBi15*, exceptuando la aleación *LBi11* que fue la seleccionada para adicionar 3% de Plomo en vez de Bismuto (3.4); los cálculos de contenido del elementos en estas

aleaciones fueron desarrollados de la siguiente forma, en función a los teóricos definidos en Tabla 2-5:

$$\% Bi = \frac{(\text{Contenido teorico Bi}) * 1 \text{ kg}}{96 \% \text{Eficiencia}} = \text{Valor Bi agregar en kg (g de Bi)} \quad (3.4)$$

Tablas 2-6. Cálculos de Carga Latones al Bi.

Elemento (g)	LBi1	LBi2	LBi3	LBi4	LBi5	LBi6	LBi7
Retorno	978,90	966,83	965,79	963,71	962,14	956,94	952,77
Zn	16,14	16,14	16,14	16,14	16,14	16,14	16,14
Al	3,03	3,03	3,03	3,03	3,03	3,03	3,03
Bi	0,00	11,98	13,02	15,10	16,67	21,88	26,04
Pb	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sn	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02
Total	1000,09	1000,00	1000,00	1000,00	1000,00	1000,00	1000,00

Elemento (g)	LBi8	LBi9	LBi10	LBi11	LBi12	LBi13	LBi14	LBi15
Retorno	949,64	947,56	943,39	927,50	931,56	918,83	913,38	904,29
Zn	16,14	16,14	16,14	16,14	28,49	28,49	28,49	28,49
Al	3,03	3,03	3,03	3,03	3,50	3,50	3,50	3,50
Bi	29,17	31,25	35,42	0,00	34,54	47,27	52,72	61,81
Pb	0,00	0,00	0,00	30,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sn	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02
Total	1000,00	1000,00	1000,00	998,69	1.000,11	1.000,11	1.000,11	1.000,11

2.4.1 Preparación de materias primas y pesaje.

Una vez definidos los valores calculados en los balances, se procede a efectuar el corte y pesaje de las materias primas para la obtención de las muestras de latones bismutados, Figura 2-10.

Se emplearon herramientas de corte tales como pulidoras manuales, cortadoras eléctricas de disco, prensas y demás accesorios necesarios para alcanzar los tamaños ideales de los materiales, en función al área y diámetro del crisol usado para la fusión.

Figura 2-10. De Izq. a Derec: A) Balanza analítica Sartorius QUINTIX-224-1S. B) Bismuto Metálico-Latón Madre-Zinc Metálico-Cu Electrolytico.



Para el pesaje de las materias primas empleadas en la fabricación de los latones al Bismuto, se empleó una balanza analítica marca Sartorius Modelo QUINTIX-224-1S. Una vez pesados y clasificados todos los materiales necesarios para la fabricación de las aleaciones, se avanzó a la siguiente etapa del proceso.

2.4.2 Moldeo, fusión y limpieza de latones al Bi.

Ya organizadas y pesadas para cada una de las aleaciones a obtener las cantidades de materias primas: Bismuto Metálico, Latón Madre, Aluminio, Estaño Metálico, Plomo Metálico y Zinc, se procedió a efectuar el proceso de moldeo para la obtención de las barras rectangulares de Latón al Bismuto.

Para esta etapa, se definió emplear arena de moldeo gasificada con CO_2 , aglomerada con Silicato de Sodio, con el fin de obtener moldes de buenas características, buena permeabilidad, resistencia y menor porosidad en las piezas. El objetivo principal por el cual fue usada este tipo de arena, a parte de las características anteriormente descritas, fue minimizar la formación de porosidades en las barras de latón bismutado, defectos que

podrían interferir durante la medición de los tiempos de la prueba de maquinabilidad por taladrado.

Los modelos que se utilizaron para esta etapa fueron barras rectangulares con medidas 2cm x 30 cm x 2cm. se estableció que esta geometría de pieza permitiría un proceso de solidificación del material de forma controlada y a su vez que permitiría extraer partes suficientes de muestras para los análisis de caracterización de XRF, microscopia SEM, dureza y metalografía.

Figura 2-11. Moldes en arena al CO₂ .



En Figura 2-11 se detalla los moldes fabricados con arena gasificada para la obtención de las barras de latones al Bismuto, se emplearon cajas de moldeo en madera, espátulas, cinceles y demás accesorios de operación manual para el moldeo de las piezas.

Una vez obtenidos todos los moldes para las piezas a fundir, se dispuso en el patio de fundición todas las cajas de moldeo en el orden definido según los parámetros de las composiciones de las aleaciones a obtener. Se procede a disponer el horno eléctrico para la fusión de las aleaciones.

2.4.3 Fusión.

Se emplea para el proceso dos hornos eléctricos; el primer horno que se empleo fue un horno tipo mufla de con capacidad de 15 L y rango de temperatura máxima hasta 1200°C.

También fue empleado un horno eléctrico tipo mufla marca LINDBERG modelo 51662 con capacidad de calentamiento de 1200°C, un crisol de carburo de Silicio, y un controlador de temperatura óptico. Se emplearon dos hornos debido a que inicialmente se había planteado el uso de la mufla de 15 L, en la cual se alcanzaron a obtener las cuatro primeras aleaciones de latones bismutados; pero debido a una falla en este equipo, las otras muestras fueron obtenidas en el horno Lindenberg, controlando las mismas condiciones del proceso, Figura 2-12.

La temperatura de control del proceso es de 1110°C, una a una las cantidades pesadas y calculadas para el proceso de fundición son cargadas en el crisol, el cual ha sido precalentado hasta 600°C en el interior del horno, antes de cargar cada uno de los materiales para la fabricación de la aleación; esto con el fin de ayudar a la cinética del proceso.

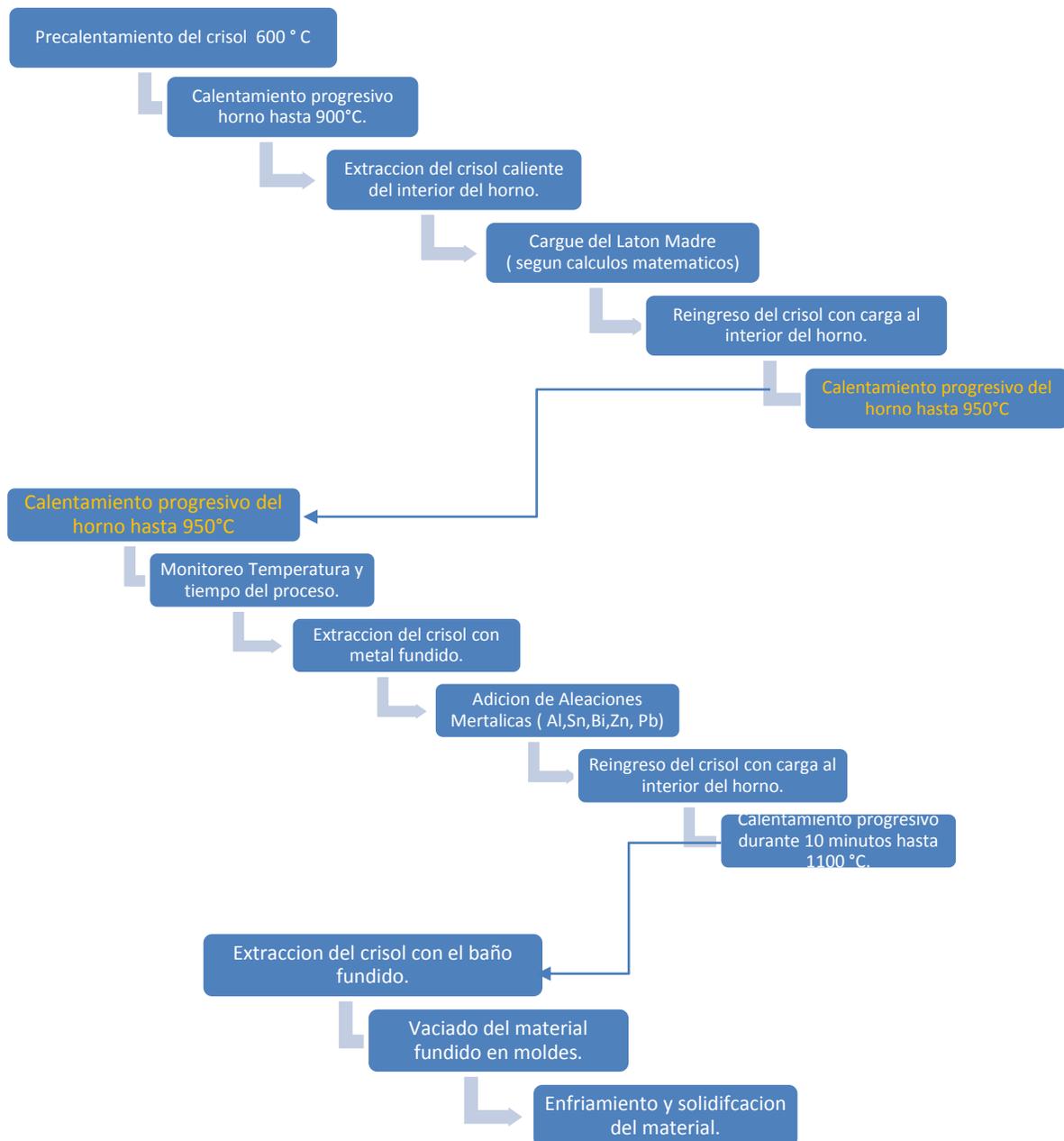
Figura 2-12. Horno Mufla Lindenberg.



Una vez encendido el horno y precalentado se eleva la temperatura hasta 900°C aproximadamente en 45 minutos, con crisol en el interior; posterior se procedió a cargar el cobre y retorno de latón, se ingresó de nuevo el crisol al horno hasta llevar la temperatura a 950°C en 20 minutos; una vez alcanzada esta temperatura, se retira el crisol con el metal fundido y se agregaron los aleantes y el Zinc, nuevamente fue llevado el crisol al horno hasta 1100°C en aproximadamente 10 minutos; al alcanzar la temperatura final se retira el crisol y se efectuó el vaciado del metal en los moldes, ver Figura 2-13.

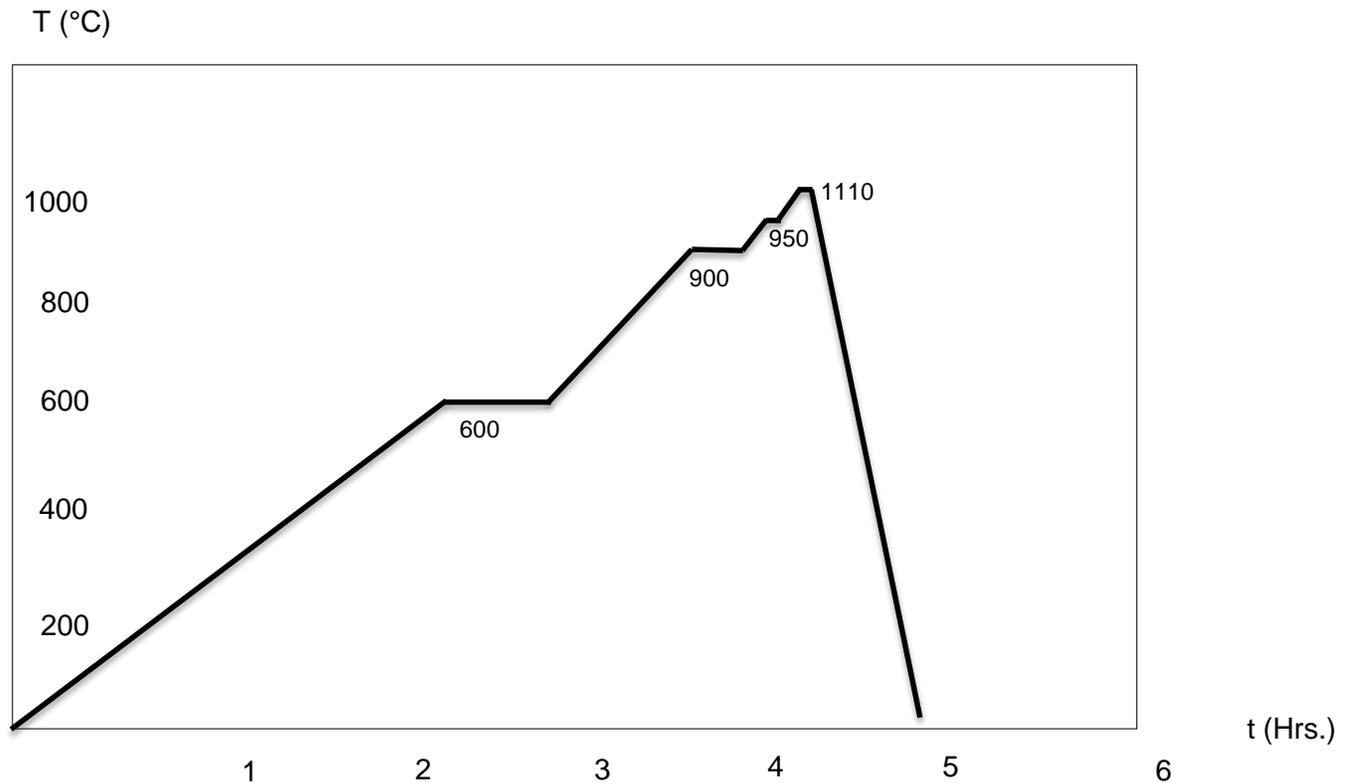
El procedimiento anteriormente descrito fue efectuado para cada una de las aleaciones, monitoreando lo mejor posible las condiciones de temperatura, tiempo y orden de las cargas; estas fueron las principales razones por la cuales fueron elegidos este tipo de hornos que permiten un control de este tipo de condiciones por su diseño y sistemas de monitoreo.

Figura 2-13. Diagrama de flujo proceso de fusión latones al Bismuto.



Este perfil térmico fue construido en base a las temperaturas de los materiales empleados durante la fabricación de los latones al Bismuto y la temperatura de precalentamiento para el crisol según recomendación del fabricante. La temperatura de fusión del latón, fue un dato de gran importancia para definir el punto de partida de fabricación de las aleaciones; una vez alcanzados los 900°C y teniendo la aleación Madre en estado semi líquido; se inicia el control de los tiempos, a partir de ese momento; se definen los esquemas de calentamiento (Figura 2-14) y la adición de aleaciones desde los 950°C, en las cantidades descritas en los cálculos de carga. Debido a las compensaciones de Cobre y Zinc que fueron necesarias adicionar al retorno de latón, el control de tiempo fue estricto para buscar minimizar las pérdidas por gasificación en el proceso.

Figura 2-14. Perfil térmico proceso de fusión latones al Bismuto.



2.5 Solidificación, enfriamiento y desmoldeo.

Una vez fundidas todas las piezas de latón al Bismuto, los moldes permanecen durante un tiempo de 24 horas en enfriamiento y solidificación al ambiente; para un posterior proceso de desmoldeo y limpieza manual.

Para esta actividad se emplearon herramientas de limpieza tales como cepillos metálicos y equipos de corte como pulidoras manuales de disco.

Figura 2-15. Barra Latón al Bismuto.



El aspecto de las piezas fundidas en forma de barra rectangular obtenidas al final del proceso de fusión (Figura 2.13). En total se obtuvieron quince (13) barras de latón al Bismuto, una barra de latón sin Bismuto y una barra de latón plomado, de la cuales se extrajeron muestras para un posterior análisis y caracterización en laboratorio.

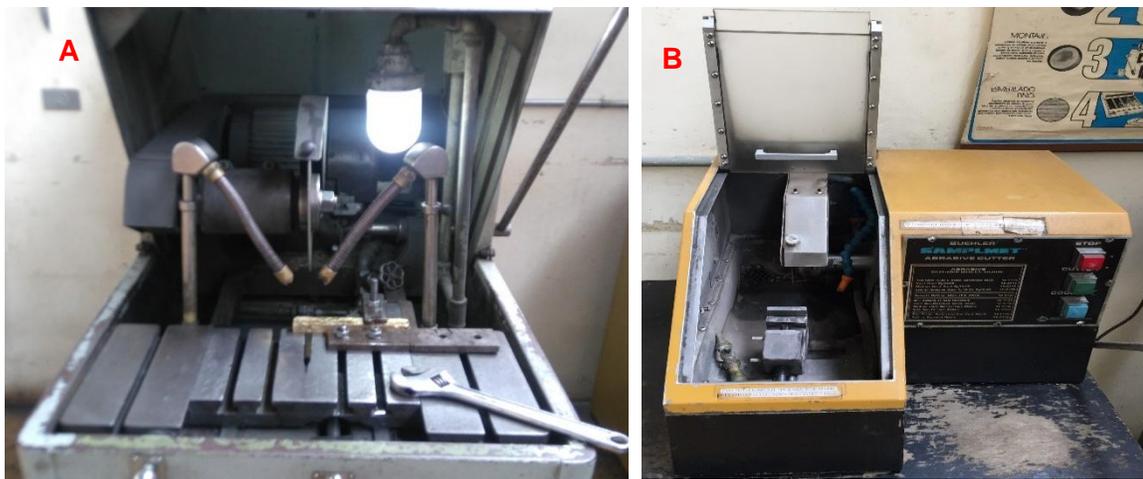
2.6 Toma y preparación de muestras.

Una vez desmoldadas y revisadas cada una de las piezas obtenidas en el proceso de fusión, se procede hacer la toma de muestras para cada uno de los análisis contemplados durante la investigación. Para ello, las piezas fueron llevadas al laboratorio de metalografía; donde se empleó una cortadora refrigerada marca Buehler modelo 10-1000AB con un montaje de disco de corte marca Buehler referencia 10-4445-010 de diámetro de 12" para

corte de materiales no ferrosos, fabricado en material compuesto de alúmina y caucho, típico para corte de materiales blandos como los latones.

Debido a que la geometría de las piezas obtenidas fue de tipo rectangular, se definió tomar 5 muestras por cada una de las probetas, de la siguiente manera: tres (3) muestras de 5 mm de espesor para ensayos de taladrado mecánico; este espesor aseguró que las profundidades de taladrado puedan ser desarrolladas exitosamente y obtener suficientes datos para el análisis, adicional se extrajeron también dos (2) muestras de 1 mm de espesor para análisis químico, microscopia electrónica, dureza y metalografía, este espesor garantizó que los análisis fueran efectuados sin problemas al hacer observaciones microscópicas en distintos aumentos, indentaciones según la normatividad y ataque superficiales en el análisis químico.

Figura 2-16. A). Montaje de piezas en cortadora metalográfica Buehler 10-1000AB. B). Cortadora metalográfica SAMPLEMET para muestras pequeñas.



Se puede observar el montaje efectuado para el corte de las barras de latón (Figura 2-16), en total fueron obtenidas setenta y cinco (75) muestras. Las muestras de menor espesor (1mm), fueron llevadas a un segundo proceso en una cortadora metalográfica Bühler modelo SAMPLEMET, se empleó un disco de 9" de diámetro con las mismas características al anterior. Para el segundo corte, se tomó una muestra por cada aleación,

las muestras obtenidas en este equipo fueron con destino a montaje en resina para análisis metalográfico, Figura 2-17.

Figura 2-17. Muestras Obtenidas por Corte. Fuente: Autor.



2.7 Medición de Durezas Brinell.

Una vez cortadas las muestras, se llevó a cabo la medición de durezas. Para esto se empleó un Durómetro de banco Gnehm Horgen. Se definió emplear durezas en escalas Brinell con condiciones de ensayo de carga de 62,5 Kgf y un indentador tipo Bola de diámetro 2,5 mm, con un tiempo de permanencia de indentación de ocho (8) segundos.

Durante el desarrollo del ensayo se definió hacer cinco (5) mediciones de dureza en la superficie de las muestras, la ubicación de los puntos de la indentación aplicada con el equipo fue cuatro (4) indentaciones en cada lateral de la muestra y una (1) indentación en el centro de la misma. El equipo empleado para el desarrollo del ensayo y la ubicación de la muestras en estudio se muestra en la Figura 2-18.

En total fueron medidas quince muestras de latones para el análisis de dureza, una vez efectuadas las indentaciones, todas las muestras fueron llevadas a un Microscopio Metalográfico Invertido marca LECO 500s con software de analizador de imágenes LECO IA32, donde se midieron los diámetros y se verificó que cada una de la huellas quedara efectivamente aplicada y no sobre algún tipo de defecto que presentara la superficie de la aleación.

Figura 2-18. A. Durómetro de banco. B. Montaje muestra de Latón.



2.8 Análisis químico por XRF.

Con el fin de hacer una evaluación de la composición química de los Latones, se estableció que las muestras obtenidas fueran llevadas a análisis químico por WDXRF. Para esto se empleó un espectrómetro de Fluorescencia de Rayos X del laboratorio de Geociencias de Universidad Nacional Sede Bogotá, modelo MagixPro PW-2440 marca Philips, equipado con tubo de Rodio, sensibilidad de 100 ppm (0.01 %). Las condiciones de este análisis se efectuaron con ayuda del software SemiQ 5 aplicando 11 barridos en las muestras para detectar todos los posibles elementos presentes.

En total fueron analizadas quince muestras por esta técnica. En el capítulo 3 de este libro se exponen los valores obtenidos para cada una de las muestras de latón.

2.9 Ensayos metalográficos.

Una vez obtenidas todas las muestras de Latones, se procede a hacer el respectivo montaje y preparación de muestras para análisis metalográfico. Para esta etapa; se

emplearon varios: equipos de desbastado, pulidores de doble disco y pulidores de acabado de un solo disco. De igual manera se usaron suspensiones para pulido, resinas para empastillado y soluciones químicas para acabado final de las muestras.

2.9.1 Montaje de muestras.

Una vez ya identificadas cada una de las muestras de las aleaciones, se procede a hacer el montaje con resina Epóxica en frío, se hace el pesaje y mezcla de resina con catalizador; se prepara en proporción 100 partes de resina por 23 de endurecedor en peso. Una vez lista la solución de resina, se organizan los moldes plásticos para el montaje, se disponen las muestras distribuidas en el interior del molde y se añade la resina, se deja en proceso de curado por 12 horas a temperatura ambiente.

Figura 2-19. Montaje de muestras de latón para metalografía.



En la figura 2.19, se observa la distribución final de las muestra de Latón en los moldes con resina, una vez pasado el periodo de curado de los montajes se hace el desmonte de las mismas y se llevan a proceso de desbastado.

2.9.2 Desbastado de las muestras.

Una vez obtenidos los montajes en resina con las muestras, se procede a efectuar un proceso de desbastado con papel abrasivo. Para esto son empleados equipos de desbastado manual marca Bühler, se emplean papeles abrasivos No. 100, 120, 240, 400, 600, 1000 y 1500; el proceso se hace totalmente manual y con agua como medio refrigerante.

2.9.3 Pulido metalográfico.

Se desarrolló el pulido metalográfico empleando varios equipos de laboratorio, diferentes tipos de paños y distintas soluciones de pulido para dar acabado a las muestras según la clasificación de la aleación. Se empleó una pulidora metalográfica marca Buehler modelo Metaserv 3000 de dos discos, durante la etapa de pulido en este equipo se usaron dos tipos de paños, empleados para materiales a base de cobre u aleaciones de cobre, paños sugeridos por los fabricantes en las guías de pulido para este tipo de materiales.

Figura 2-20. Pulido Metalográfico muestras de latón.



Las condiciones de preparación fueron: 150 RPM para el paño TexMet C, con solución de Alúmina de $0.05 \mu\text{m}$ y agua limpia para remoción en la superficie de la probeta. Se efectuó todo el proceso de pulido con este paño, aplicando con frecuencia algunas gotas de la suspensión y evitando que el paño quedara seco o deshidratado, con posterior lavado en agua limpia., Figura 2-20.

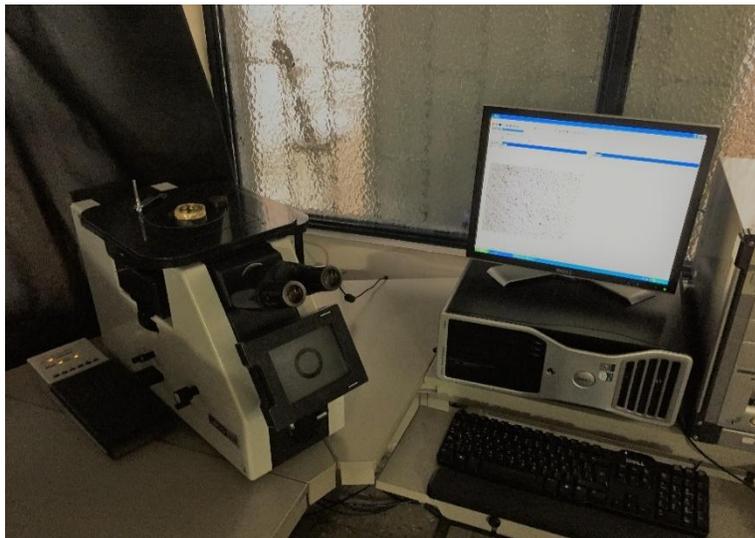
A medida que se continuó avanzando con la preparación, se estuvo haciendo constante observación microscópica a 100 y 400 aumentos mediante un microscopio marca UNITRON modelo 33717, para ir evaluando el aspecto del pulido de los latones.

Después de un tiempo con este paño, se pasó al segundo disco de pulido montando el paño MicroCloth, con condiciones de pulido de velocidad de 125 RPM y con suspensiones de diamante de $1 \mu\text{m}$ y Silicio Coloidal amorfo en suspensión de $0.06 \mu\text{m}$, para dar acabado final a las probetas y pasar a la siguiente etapa del proceso metalográfico.

2.9.4 Ataque químico y revelado metalográfico.

Una vez terminado todo el proceso de pulido metalográfico, se llevan todas las probetas a observación microscópica, para ello se estableció hacer observación de dos maneras: *observación de las muestras sin ataque químico y observación después del ataque químico*. Se empleó un microscopio metalográfico invertido marca LECO 500, las condiciones de observación de las muestras fueron en Campo Claro, en aumentos de 50X, 100X, 200X y 800X, de igual manera para cada de una las muestras se hizo uso del software para análisis de imágenes LECO IA 32 para evaluar por conteos de área las zonas observadas en las microscopias para posterior interpretación, Figura 2-21.

Figura 2-21. Microscopio metalográfico LECO 500.



El ataque químico empleó la solución Grand's No. 1, a base de Cloruro Férrico (FeCl_3 -20 g), Ácido Clorhídrico (HCl-5 ml), Oxido de Cromo (CrO_3 -1 G) y Agua (H_2O -100 ml) destilada. Cada una de las muestras fue sometida a inmersión en esta solución durante dos minutos, luego del ataque químico fueron lavadas con abundante agua limpia, secadas y llevadas a observación en microscopio metalográfico invertido en cada uno de los aumentos anteriormente señalados.

2.10 Pruebas de taladrado.

Una vez concluido el análisis microscópico de las muestras, se desarrollaron las pruebas de mecanizado a los Latones. Se efectuó un montaje para pruebas de perforado, empleando un taladro tipo “árbol” o Taladro de Prensa, marca OTMT modelo OT21632 de 60Hz y 110 Voltios. Los parámetros de la prueba se definieron de la siguiente manera con base en la prueba piloto de taladrado:

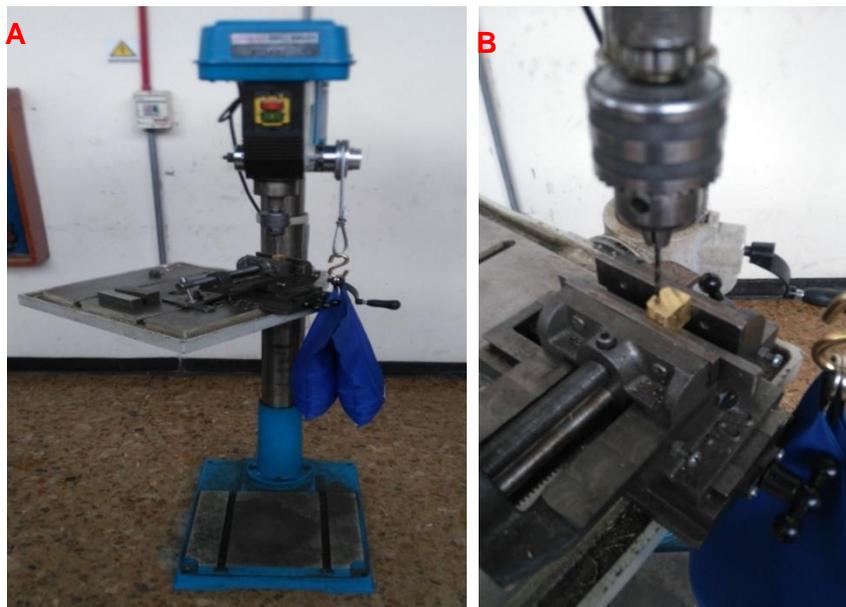
- Profundidad de penetración: 5 mm
- Diámetro de la Herramienta de corte (Broca): 1/8”.
- Velocidad de taladrado: 560 RPM.
- Carga aplicada: 1,36 kN.
- Cantidad de perforaciones: 10 por cada muestra.

Los parámetros anteriormente descritos, fueron definidos en base a las pruebas piloto de taladrado desarrolladas al principio de la parte experimental; en las cuales fue posible concluir que estas condiciones favorecerían el desarrollo de la prueba.

Durante el montaje de las muestras; se empleó una broca nueva para cada una de las muestras a perforar, la distancia entre perforación y perforación fue dos veces el diámetro de la broca de corte (Figura 2-22). La prueba consistió en acoplar las muestras en la prensa del equipo, una vez definidos los puntos a perforar, con la adaptación hecha en la manija del taladro donde una polea acondicionada al cabezote y tensada por una guaya metálica, aplica una peso constante de 9,3 Kg; donde al encender el equipo y por acción de la fuerza de gravedad la carga aplicada hace penetrar la broca en la muestra ya puesta en posición. Una vez se alcanza la profundidad de penetración definida para la ensayo, se apaga el taladro, y se ubica otro punto a perforar en la muestra así sucesivamente.

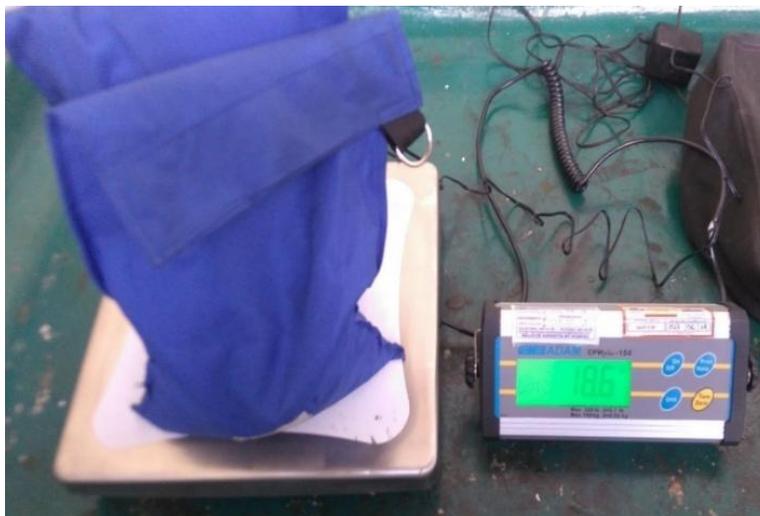
Durante el desarrollo de la prueba con la ayuda de un cronometro se registra el tiempo de penetración para cada perforación en cada una de las muestras de Latón, teniendo presente los parámetros del ensayo. Una vez se concluía el ensayo para cada muestra, es retirada la broca, se cambia por una nueva, la carga aplicada se retira mientras se hacen los ajustes de posición de la muestra en la prensa del equipo y se repite el procedimiento de forma manual para cada una de las aleaciones del estudio.

Figura 2-22. A Taladro de prensa. B montaje de muestras al taladro.



Con el fin de verificar que la carga aplicada sea la definida para el ensayo y sea efectiva durante el desarrollo de la prueba, se hace frecuente verificación del peso de la misma, empleando una balanza calibrada marca ADAM modelo CPD-150., Figura 2-23.

Figura 2-23. Proceso de Verificación de peso aplicado para la prueba de taladrado.



En cada una de las pruebas de taladrado efectuadas a las muestras, la viruta generada durante el corte fue recolectada en su totalidad, la cual fue llevada a posterior pesaje y observación en SEM para su caracterización.

2.11 Análisis gravimétrico de las virutas.

Una vez efectuadas las pruebas de taladrado a cada una de las aleaciones, las muestras de viruta recolectadas, se dispusieron para análisis gravimétrico. Para esto, se empleó una balanza analítica marca COLE PALMER modelo PA 220 Symmetry.

En la figura 2-24 se observa el equipo empleado y las muestras recolectadas para el análisis, en el desarrollo del análisis se definió como parámetro clasificatorio de las muestras dividirlos en dos tamaños: partículas de viruta en polvo (finas o viruta discontinua) y partículas de viruta largas o “grandes” (gruesas o viruta continua).

Figura 2-24. Balanza Analítica PA 220 Symmetry y muestras de viruta.



En el siguiente capítulo se recopila información recolectada durante el análisis gravimétrico por muestra, esto con el fin de hacer una relación del efecto de la presencia del elemento Bismuto en la formación y cuantificación del subproducto del maquinado para cada una de la muestras.

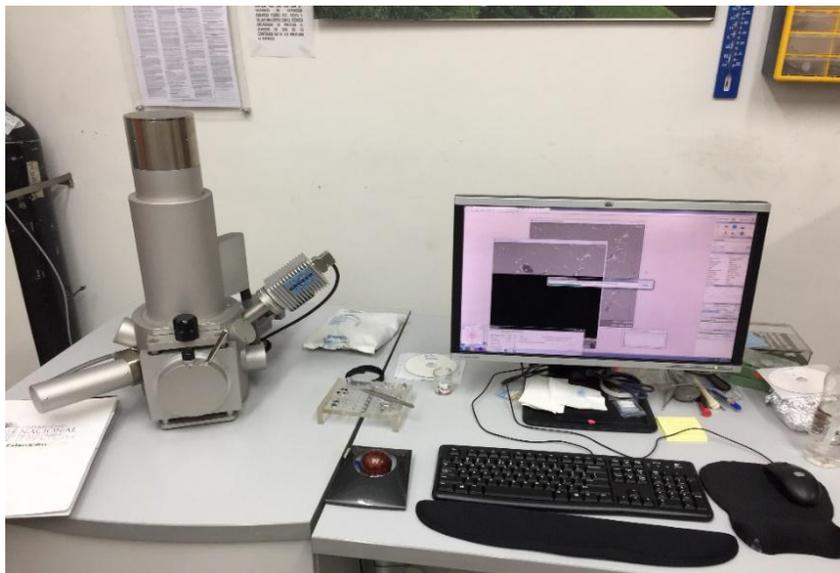
2.12 Análisis por microscopía electrónica SEM.

Se efectuó durante la investigación análisis por microscopía SEM, empleando un equipo marca TESCAN modelo VEGA3. Los análisis se desarrollaron en dos etapas: una para análisis de pureza química del Bismuto metálico y la aleación obtenida en la prueba piloto como materias primas y una segunda etapa para evaluación de morfología de las virutas metálicas, subproductos del taladrado de los latones.

Para el primer análisis de pureza del Bismuto metálico, se definió como parámetros del equipo los siguientes: Magnificación 200X, Modo de Detección SE y el uso de la Sonda EDS marca Bruker para análisis químico, Figura 2-25.

En la segunda etapa de los análisis, las muestras de viruta obtenidas en el ensayo de taladrado fueron evaluadas en el microscopio, los parámetros del equipo para el ensayo fueron: Magnificaciones de Observación 800 X y 1600 x aumentos, Modo de Observación o detección: BSE (Electrones Retrodispersados), con el fin de determinar la distribución del Bismuto o del Plomo en las virutas.

Figura 2-25. Microscopio electrónico SEM TESCAN. Universidad Nacional-Física.



Durante la observación en el análisis de las virutas; se hizo mayor precisión y enfoque en las zonas donde se observó presencia de precipitados de Bismuto o Plomo y formación de grietas producto del mecanizado.

3. Resultados.

En el presente capítulo se hace una descripción detallada de los resultados obtenidos durante el desarrollo de la investigación, en orden de ejecución.

3.1 Composición Química Latón Madre por espectrometría de Emisión Óptica OES.

La aleación madre de Latón obtenida como material base para la fabricación de las aleaciones de interés de la investigación, fue evaluada por análisis químico por Espectrometría de Emisión Óptica OES, en la Tabla 3.1 se relacionan los valores de composición química obtenidas de las muestras de las coladas 1 y 2.

Tabla 3-1. Composiciones químicas latones Madre, coladas C1 y C2 respectivamente.

Ítem	Elemento químico (wt. %)											
	Zn	Pb	Sn	P	Mn	Fe	Ni	Al	S	Si	Cr	Cu
1	38,52	0,019	<0,010	<0,005	0,010	0,021	<0,010	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	61,40
2	38,47	0,016	0,012	<0,005	0,010	0,021	<0,010	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	61,46
3	38,54	0,034	0,015	<0,005	0,010	0,021	<0,010	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	61,37
Avg.	38,51	0,023	0,012	<0,005	0,010	0,021	<0,010	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	61,41

* Esta calibración analítica no permite límites de detección menores a 100 ppm (0.01 %.)

Tabla 3-1. Composiciones químicas latones Madre, coladas C1 y C2 respectivamente. (continuación)

Ítem	Elemento químico (wt. %)											
	No. Análisis	Zn	Pb	Sn	P	Mn	Fe	Ni	Al	S	Si	Cr
1	39,018	0,015	<0,010	<0,005	0,01	0,021	<0,010	0,006	<0,005	<0,010	<0,005	60,918
2	38,98	0,012	<0,010	<0,005	0,009	0,021	<0,010	0,008	<0,005	<0,010	<0,005	60,950
3	39,08	0,019	0,012	<0,005	0,01	0,020	<0,010	0,007	<0,005	<0,010	<0,005	60,671
Avg.	39,088	0,015	0,01	<0,005	0,01	0,020	<0,010	0,007	<0,005	<0,010	<0,005	60,846
R.S.D	0,4	22,8	-	-	6,0	-	-	13,5	-	-	-	0,3

* Esta calibración analítica no permite límites de detección menores a 100 ppm (0.01 %.)

3.2 Composiciones químicas Latones por XRF.

Las muestras obtenidas por proceso de fusión a nivel de laboratorio, fueron analizadas químicamente empleando un equipo de Fluorescencia de Rayos X, como fue descrito en el anterior capítulo, Tabla 3-2.

Tabla 3-2. Composiciones químicas porcentuales latones al Bismuto.

Muestra	Cu (%)	Pb (%)	Zn (%)	Al (%)	Bi (%)	Si (%)	Cl (%)	P (%)	Sn (%)
LBi1	66,42	0	32,97	0,09	0	0,23	0,02	0,04	0,23
LBi2	65,45	0	32,93	0,26	0,80	0,19	0,03	0,03	0,31
LBi3	65,69	0	32,89	0,19	0,73	0,09	0,12	0,04	0,24
LBi4	66,03	0	32,27	0,06	0,65	0,09	0,07	0,04	0,79
LBi5	64,96	0	32,57	0,17	1,14	0,51	-	0,04	0,61
LBi6	66,04	0	31,47	0,03	1,37	0,67	-	0,04	0,38
LBi7	69,15	0	28,48	0,19	1,35	0,17	-	0,04	0,62
LBi8	70,95	0	27,36	0,04	1,20	0,06	-	0,04	0,35
LBi9	69,49	0	28,52	0,02	1,50	0,22	-	0,03	0,21
LBi10	61,43	0	35,98	-	2,31	0,33	-	0,04	0,24
LBi11	64,37	2,71	32,34	0,03	0	0	0,02	0,03	0,18
LBi12	59,32	0	37,57	1,01	1,07	0,10	0	0,02	0,48
LBi13	57,98	0	39,11	0,34	2,01	0,05	0	0,01	0,44
LBi14	59,38	0	37,26	0,27	2,48	0,02	0	0,01	0,52
LBi15	58,1	0	38,83	0,28	2,44	0,02	0	0,01	0,2

En los resultados de composición química de las muestras de Latón, se confirmó la presencia del elemento químico de interés: *Bismuto*, con contenidos desde 0.65 % a un máximo de 2.48 %; valores que permiten un rango de interés al momento de hacer la evaluación del efecto de la presencia de este elemento químico en la aleación.

De igual manera los análisis de XRF confirman la presencia de Cobre en promedio de contenido superior al 60 % y de 33 % para el Zinc, valores que son muy cercanos a los obtenidos en los análisis de Espectrometría OES, Tabla 3-2. En el conjunto de aleaciones obtenidas durante la investigación, la aleación LBi11 libre de Bismuto, con contenido de Plomo fue empleada como muestra de referencia o control, para la comparación con las demás aleaciones fabricadas.

Es posible observar en los resultados de composición, que los contenidos de los elementos base de la matriz (*Cu y Zn*); tienden a ser muy cercanos, en los valores obtenidos en ambos análisis (*OES y XRF*), situación que hace suponer que el proceso de obtención fue adecuado a pesar de la condiciones operativas y factores de pérdida presentes. .

3.3 Durezas Brinell.

Como fue descrito en el Capítulo 2; se efectuaron múltiples mediciones de dureza en escala Brinell a todas las muestras de latón. Los parámetros del ensayo fueron: carga de 62,5 Kgf, indentación con bola de diámetro 2,5 mm y tiempo de permanencia de indentación de ocho (8) segundos.

En tabla 3-3, se relacionan los valores obtenidos para cada una de las aleaciones.

Tabla 3-3. Diámetros de indentación-latones obtenidos (187.5X).

MUESTRA	Huella (mm)						PROMEDIO H (d)
	H1	H2	H3	H4	H5	Desviación Estándar	
LBi1	0,731	0,741	0,708	0,707	0,759	0,022	0,729
LBi2	0,684	0,702	0,690	0,688	0,700	0,008	0,693
LBi3	0,692	0,722	0,708	0,71	0,691	0,013	0,704

Tabla 3-3. Diámetros de indentación-latones obtenidos (187.5X). Continuación.

MUESTRA	Huella (mm)						PROMEDIO
	H1	H2	H3	H4	H5	Desviación Estándar	H (d)
LBi4	0,692	0,707	0,704	0,699	0,704	0,006	0,701
LBi5	0,689	0,692	0,679	0,681	0,713	0,014	0,691
LBi6	0,744	0,750	0,718	0,787	0,714	0,030	0,742
LBi7	0,827	0,812	0,825	0,818	0,744	0,035	0,805
LBi8	0,810	0,791	0,772	0,831	0,967	0,077	0,834
LBi9	0,787	0,822	0,802	0,838	0,835	0,022	0,817
LBi10	0,743	0,764	0,721	0,728	0,744	0,017	0,740
LBi11	0,633	0,632	0,635	0,633	0,635	0,001	0,634
LBi12	0,819	0,770	0,762	0,737	0,700	0,044	0,757
LBi13	0,765	0,784	0,757	0,778	0,741	0,017	0,765
LBi14	0,859	0,844	0,836	0,844	0,827	0,012	0,842
LBi15	0,785	0,791	0,782	0,787	0,778	0,005	0,784

Durante la toma de durezas de las muestras, para obtener datos numéricos reales; se tuvo en cuenta que en las zonas o puntos demarcados en la indentación no se observaran algún tipo de defecto (porosidad o rechupe) que pudiera afectar la sensibilidad de la prueba. Se hicieron observaciones microscópicas de cada una de las huellas con el fin de verificar y medir los diámetros de la indentación en cada una de las muestras evaluadas. Las observaciones se efectuaron a 100, 160 y 187,5 aumentos.

Para cada una de las observaciones efectuadas en el microscopio metalográfico, con ayuda del software para análisis de imágenes, se hicieron múltiples mediciones de diámetro de la huella, Tabla 3-3, valores que permitieron el cálculo por fórmula de la dureza Brinell del material. Se toma como muestra “Goldstandard” o de referencia la muestra Lbi11, muestra que presenta contenido de Plomo y aleantes a excepción del Bismuto; para efectos de comparación de durezas.

Tabla 3-4. Durezas Brinell de los latones al Bismuto.

Muestra	Dureza HB	Desviación Estándar	Contenido Real Bi (%)
LBi1	146,60	8,97	0,00
LBi2	162,45	3,70	0,80
LBi3	157,08	5,83	0,73
LBi4	158,58	2,77	0,65
LBi5	163,52	6,48	1,14
LBi6	141,51	11,23	1,37
LBi7	120,03	11,57	1,35
LBi8	113,16	18,83	1,20
LBi9	116,09	6,45	1,50
LBi10	142,08	6,53	2,31
LBi11 (Pb)	194,74	0,88	0,00
LBi12	136,50	16,15	1,07
LBi13	132,88	6,15	2,01
LBi14	109,02	3,14	2,48
LBi15	126,01	1,63	2,44

Los valores consignados en la Tabla 3-4., fueron calculados empleando las fórmulas 1.1, 3.1 según ASTM E 10:

$$HBW = \frac{2 F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (3.1)$$

Donde:

F = Valor numérico de la fuerza de la carga aplicada en *kgf*, D = diámetro del indentador de la bola en mm, d= diámetro de la indentación en la superficie del material y HBW = Dureza Brinell

3.4 Pruebas de Taladrado.

Como fue descrito en el capítulo anterior, se efectuaron una serie de pruebas mecánicas de tiempo de maquinado para cada una de las aleaciones en estudio. En Tabla 3-5. Se relacionan los tiempos de maquinado para cada una de las muestras en las condiciones del ensayo fueron: *velocidad de taladrado 560 rpm, diámetro de la broca de 1/8", profundidad de taladrado 5mm y carga aplicada de 9,3 kgf*, estos ensayos fueron efectuados en ausencia de lubricante. Las pruebas se desarrollaron en la planta física de los laboratorios de Máquinas y Herramientas de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, con los parámetros y equipos anteriormente descritos

Tabla 3-5. *Tiempos promedio de maquinados latones al Bismuto y muestra de referencia.*

Muestra	Tiempo Promedio (seg)	Contenido Bi (%)	Desviación Estándar
LBi1	62,35	0	2,77
LBi11	6,64	0 (2,71 de Pb)	0,96
LBi4	28,24	0,65	3,72
LBi3	7,15	0,73	1,09
LBi2	10,66	0,80	0,70
LBi12	13,35	1,07	0,48
LBi5	10,15	1,14	2,13
LBi8	6,86	1,20	0,91
LBi7	7,95	1,35	1,36
LBi6	9,85	1,37	3,78
LBi9	6,85	1,50	0,91
LBi13	9,64	2,01	0,70
LBi10	4,76	2,31	0,67
LBi15	17,54	2,44	1,41
LBi14	11,35	2,48	1,99

3.5 Metalografía.

Como fue descrito en el capítulo anterior, se efectuaron pruebas de análisis metalográfico a cada una de la muestra de Latón obtenidas. En las muestra evaluadas se le tomaron micrografías a 50X, 100X, 200X y 800X aumentos antes y después de ataque químico, con el fin de evaluar las fases presentes en la aleación, los posibles precipitados que se formen en la aleación, defectos o inclusiones que se puedan formar y en general hacer una evaluación microscópica de la distribución del bismuto y el plomo en las aleaciones.

En Tabla 3-6, se hace descripción de los hallazgos evidenciados en las micrografías de los latones bismutados; en esta se relacionan el tipo de fases o fase predominante en la microestructura, el porcentaje de porosidad cuantificado, tipo de grano formado, ubicación y distribución de las partículas insolubles de Bismuto o Plomo en la matriz. Ver anexo B.

Tabla 3-6. Analisis Metalográfico latones al Bismuto.

Muestra	% Porosidad	Tipo de Grano	Partícula Presente/Fase
LBi1	1,84	Granos dendríticos arborizados de gran tamaño.	No se observan partículas en los límites de grano. Alfágeno.
LBi2	1,98	Granos equiaxiales, con distribución multidireccional.	Partículas atrapadas intergranular en la fase α . Alfágeno
LBi3	4,09	Granos equiaxiales.	Predominio fase α , algunas partículas intergranulares. Alfágeno
LBi4	4,32	Granos equiaxiales.	Predominio fase α , algunos defectos en los intergranos. Alfágeno.
LBi5	5,63	Granos equiaxiales, con distribución multidireccional.	Presencia de algunos precipitados de Bi en los límites de grano, Alfágeno
LBi6	4,07	Granos dendríticos.	Presencia de algunos precipitados de Bi en los límites de grano.. Alfágeno

Tabla 3-6. Analisis Metalográfico latones al Bismuto. (Continuación)

Muestra	% Porosidad	Tipo de Grano	Partícula Presente
LBi7	6,61	Granos equiaxiales.	Algunos precipitados de Bi en los límites de grano, presencias de poros y defectos. . Alfágeno
LBi8	8,58	Granos equiaxiales independientes, de gran tamaño	Precipitaciones de Bi en los límites de grano, presencia de defectos en la fase α . Alfágeno
LBi9	2,41	Granos equiaxiales independientes, de gran tamaño	Precipitaciones de Bi en los límites de grano. Predominio fase α . Alfágeno
LBi10	3,76	Granos equiaxiales.	Precipitaciones de Bi en los límites de granos, algunas partículas absorbidas en las Fase α , la formación β se evidencia en algunas zonas. El crecimiento de grano es regular en todas las direcciones. Micro. Bifásica.
LBi11 (Pb)	7,23	Granos columnares alargados, rodeados de granos equiaxiales.	Precipitaciones de Pb en los límites de grano, hay crecimiento en ciertos planos activos de la fase β , formando una estructura tipo Widmanstätten, en la que los cristales de α adoptan formas de agujas.

Tabla 3-6. *Análisis Metalográfico latones al Bismuto. (Continuación)*

Muestra	% Porosidad	Tipo de Grano	Partícula Presente
LBi12	3,01	Granos equiaxiales, con orientación poliédrica.	Precipitaciones de Bi en los límites de granos; presencia de fases α y β , hay partículas atrapadas en la fase β . Microestructura Bifásica
LBi13	2,25	Granos equiaxiales de gran tamaño.	Precipitaciones de Bi en los límites de grano, se observan partículas atrapadas en la fase α y algunos defectos como poros. Microestructura Bifásica
LBi 14	1,96	Granos equiaxiales de gran tamaño.	Alta densidad de precipitaciones de Bi en los límites de grano de las fases. Microestructura Bifásica
LBi 15	1,72	Granos equiaxiales, con orientación poliédrica.	Presencia de fases α y β , las precipitaciones de Bi se van a los límites de grano. Mayor formación y difusión de fase α . Microestructura Bifásica

En estas micrografías, fue posible observar algunas de las microestructuras y fases que se forman en las aleaciones, al ser atacadas químicamente con Cloruro Férrico.

Algunas de estas las zonas negras son atrapadas en regiones blancas (zona Alfa) de gran tamaño, están corresponden a la fase Beta. En la mayoría de las aleaciones hay predominio de formación Alfégena; solo las últimas muestras de latones desde la LBi12 a la LBI 15 evidenciaron formaciones bifásicas.

A continuación se relacionan algunas, micrografías observadas durante el análisis metalográfico por aleación a 100X y que revelan las descripciones de Tabla 3-6:

Figura 3-1. Micrografia Latón LBi1 100X-formaciones dendríticas.

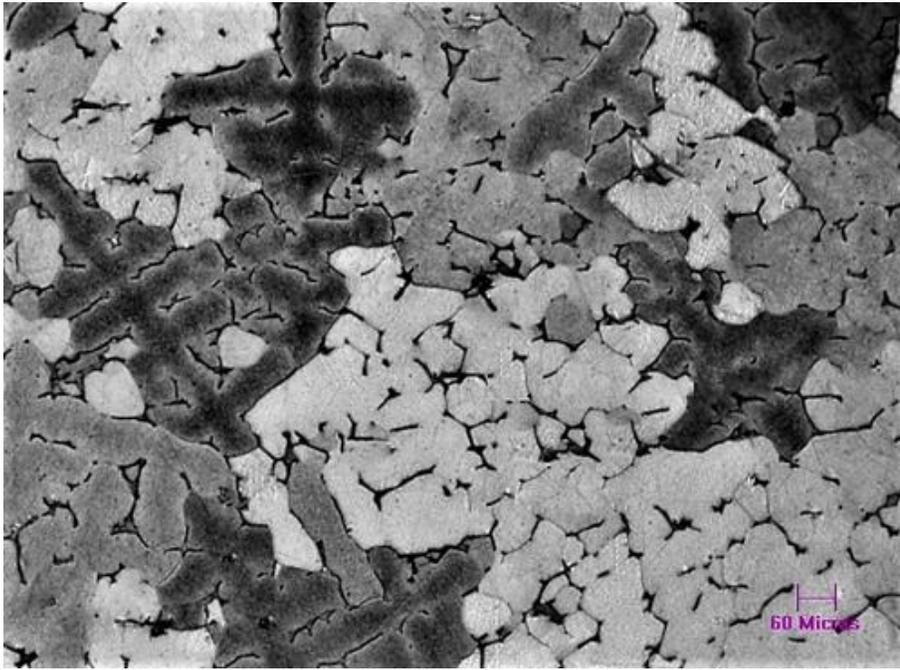


Figura 3-2 Micrografia Latón LBi12 100X- granos equiaxiales, poliédricos.

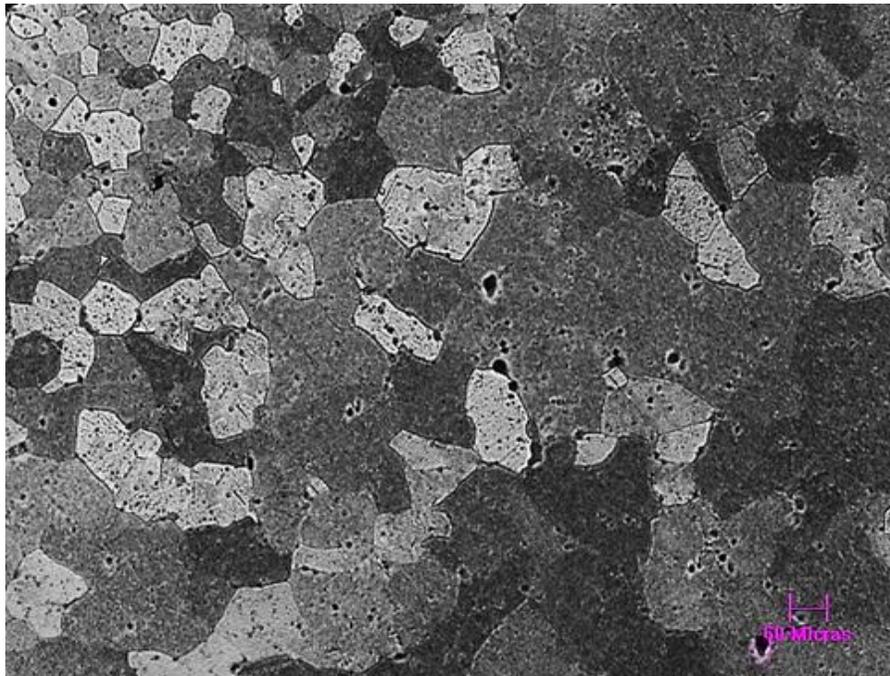
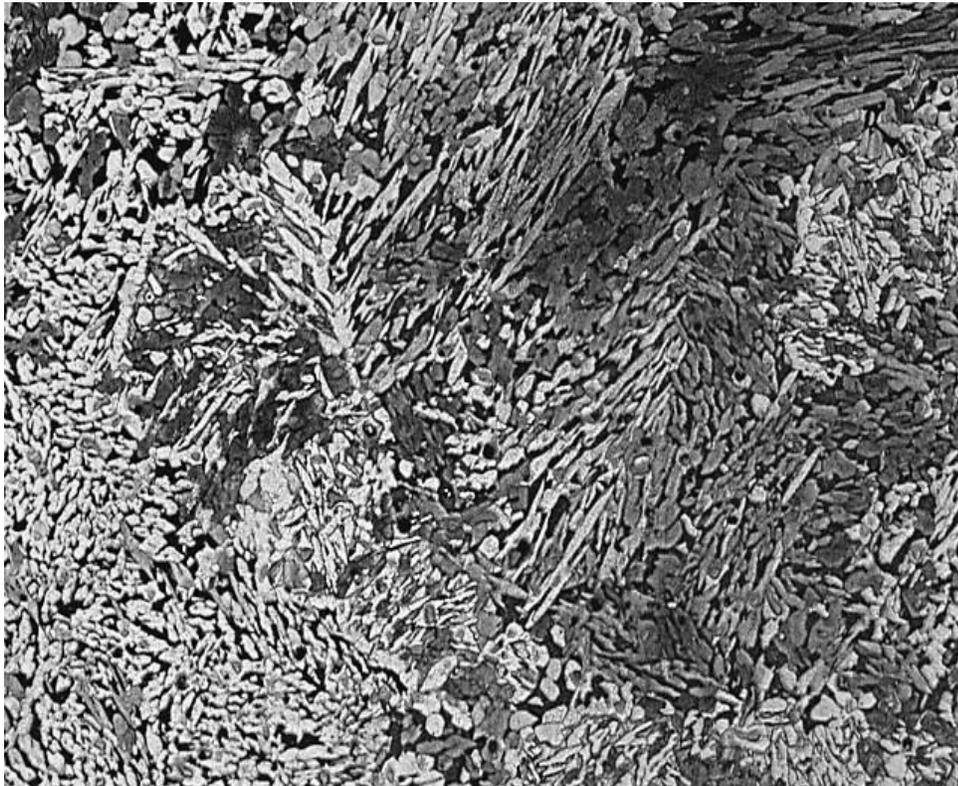


Figura 3-3. Micrografía LBi11 100X- granos columnares, formación Widmanstätten.



3.6 Microscopía SEM.

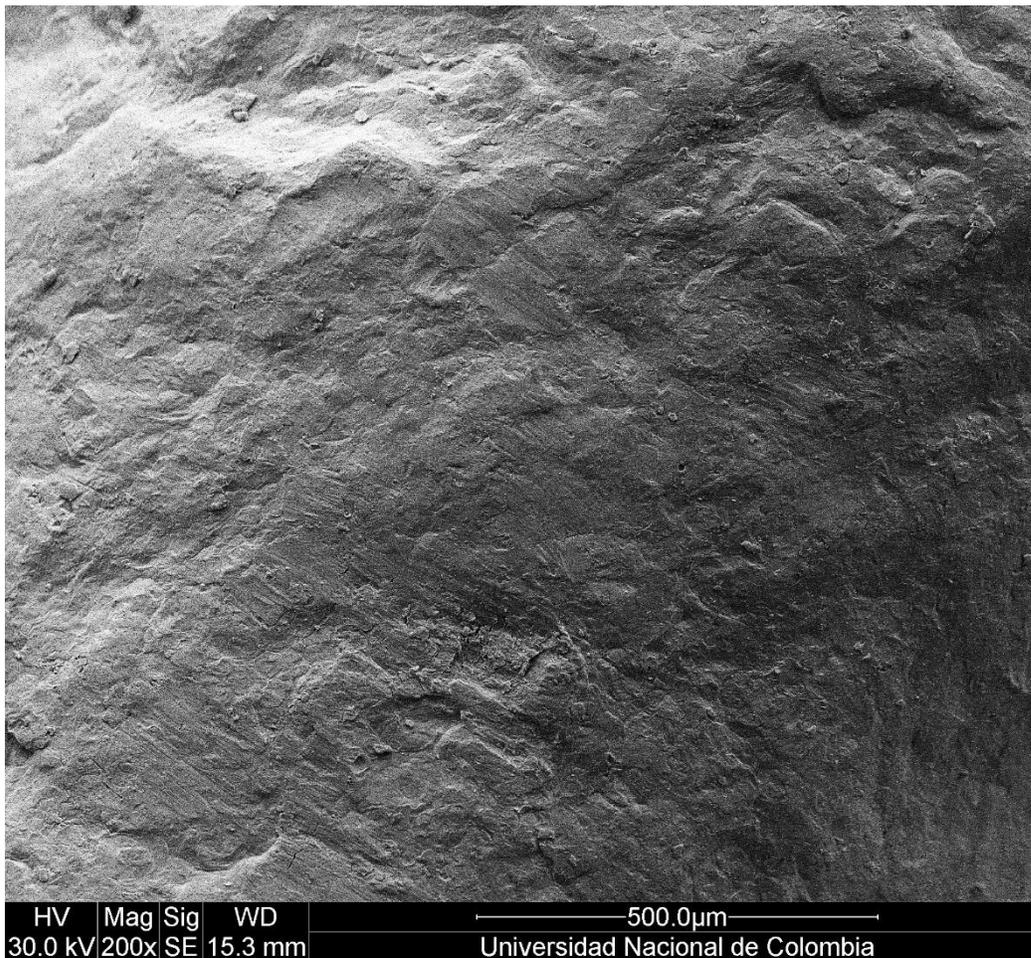
A continuación se presentan las micrografías e información obtenida durante los análisis microscópicos con el equipo SEM. Como se describió el capítulo anterior, este análisis fue proyectado en dos partes: para evaluar la composición del Bismuto metálico empleado en las fundiciones y para evaluar la morfología de las virutas obtenidas en las pruebas de taladrado. Ver Anexo C.

3.6.1 Análisis químico Bismuto metálico.

El Bismuto metálico empleado para la fabricación de las aleaciones de interés de la investigación, fue evaluado a través de este análisis; donde se estableció hacer un mapeo con el equipo en las zonas identificadas. Como parámetros del ensayo se definieron: Magnificación 200X, Modo de Detección BSE y el uso de la Sonda EDS marca Bruker

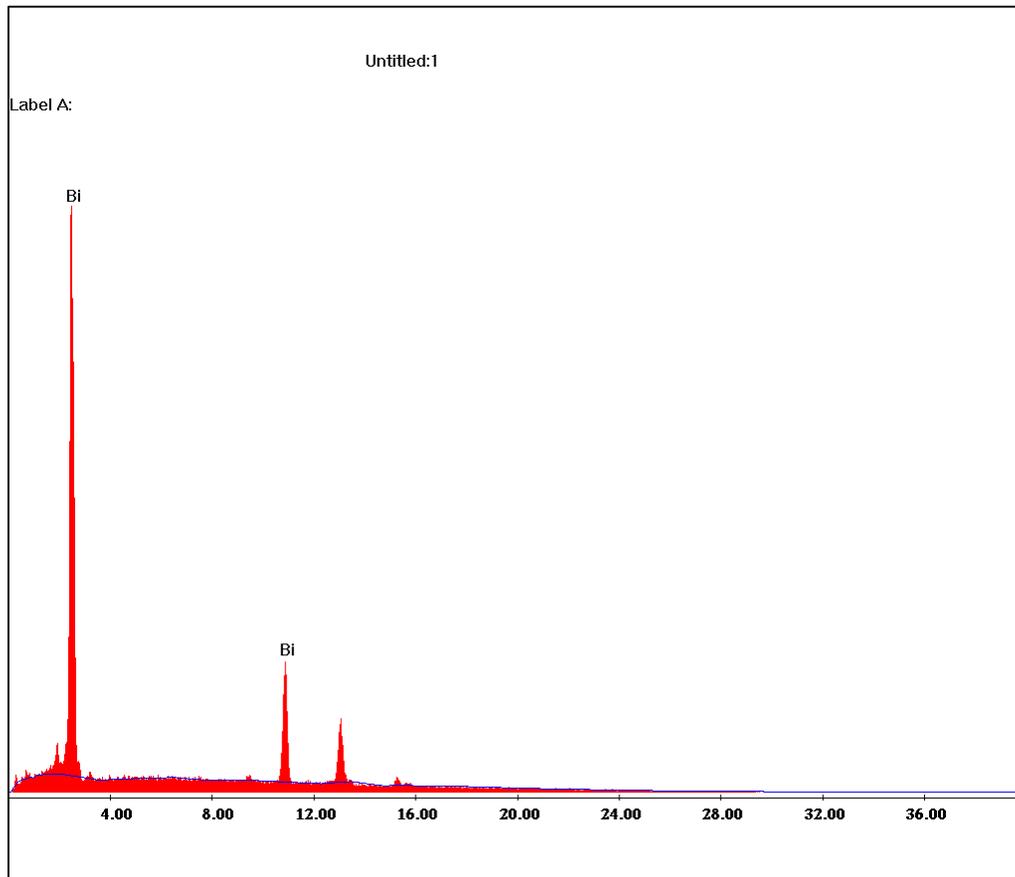
para análisis químico. En figura 3-4 se muestra la morfología general de aspecto del Bismuto empleado como materia prima para alear los latones.

Figura 3-4. Microscopia SEM a 200X-Bismuto.



De igual manera se efectuó análisis químico de una de las virutas de bismuto, con el fin de corroborar su composición química. En Figura 3-5 se observa los picos de intensidad característicos del elemento Bismuto, no registrándose presencia de algún otro tipo de elemento en la muestra, dentro de los límites de sensibilidad de la sonda EDS del microscopio electrónico.

Figura 3-5. Identificación del Bismuto visto en SEM.



De igual manera empleando la sonda EDS del equipo, se obtuvieron datos cuantificados de la concentración del elemento Bismuto en una muestra de aleación (*Cu-Bi*) obtenida en la prueba piloto, descrita en el capítulo 2 . En la figura 3-18 se observa la distribución y presencia del Bismuto en la matriz base de Cobre, la observación se efectuó a 1.00 kx de magnificación y modo de detección SE y BSE.

De igual manera en las micrografías SEM, el Bismuto está presente en forma de partículas de gran tamaño, con formas irregulares, dispersas en el matriz; con aspecto blanco brillante.

Figura 3-6. Micrografía SEM a 1.00 kx. Muestra de Cu-Bi hecha en la prueba piloto.

A) observación SE (*electrones secundarios*). B) observación BSE (*electrones retrodispersados*).

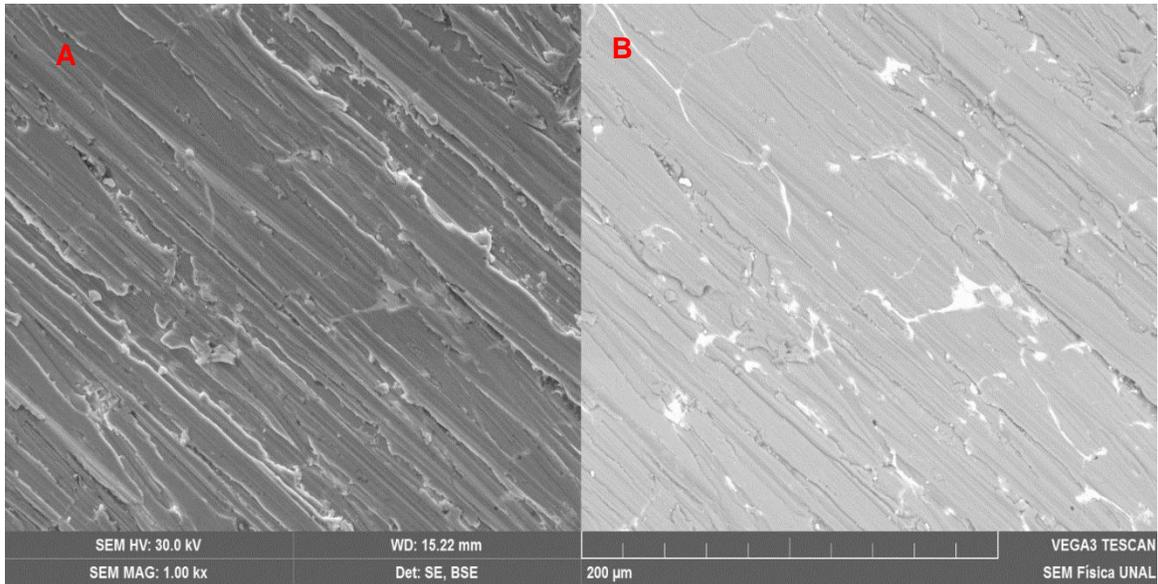
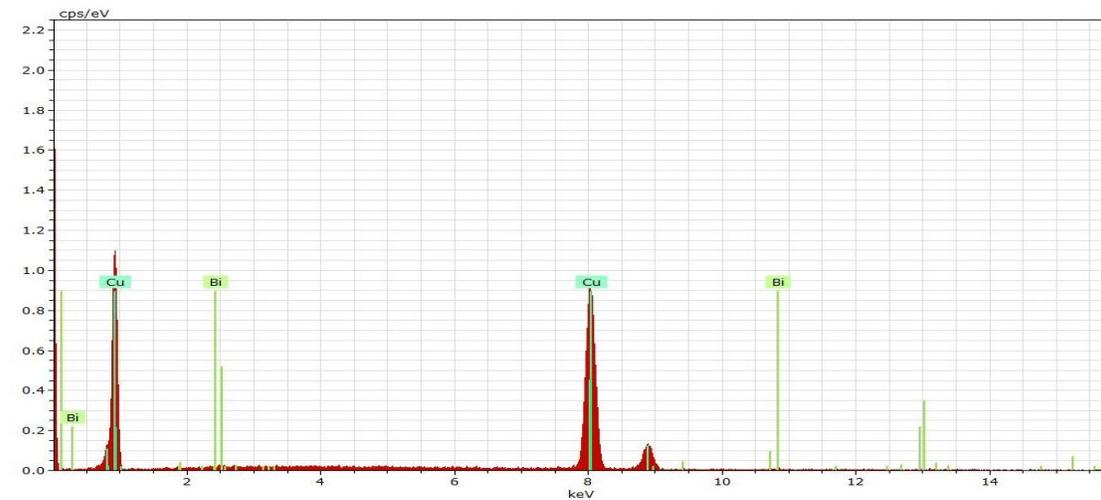


Figura 3-7. Diagrama de Intensidades EDS_SEM Muestra Cu-Bi.



Spectrum: AM8 5381

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Cu	29	K-series	95.08	99.13	99.73	2.55
Bi	83	L-series	0.83	0.87	0.27	0.18
Total:			95.92	100.00	100.00	

3.6.2 Análisis morfológico virutas de latones.

Las muestras de viruta fueron identificadas y analizadas en el microscopio electrónico SEM, marca *TESCAN* modelo VEGA 3, esto con el fin de hacer una -clasificación del tipo de viruta obtenida, los mecanismos de deformación y fractura, y el efecto que tuvo la presencia del Bismuto en ellos. Los parámetros para el desarrollo del análisis fueron:

- Método de Detección: BSE (*Detección por electrones Retrodispersados*).
- Magnificaciones SEM: 1.6 kx y 2.0 kx.
- Voltaje: 25.0 kV.

A continuación se relaciona las observaciones efectuadas en microscopia SEM A 1.6 kx para cada una de las muestras, Tabla 3-7. En esta se hace una descripción detallada de cada una de las virutas obtenidas por muestra.

Tabla 3.7. Analisis de las virutas de mecanizado de los latones con y sin Bismuto.

Muestra	Tipo de Viruta	Mecanismos de Deformación Fractura	Influencia del Bismuto
LBi1	Cónico helicoidales cortas.	Dúctil.	No hay presencia del elemento.
LBi2	Arco alargadas y cónica helicoidal corta.	Dúctil	El elemento actúa como concentrador de esfuerzos en la grietas. Se agrupa en estas.
LBi3	Arco cortas.	Dúctil	Concentrador de esfuerzos en las grietas.
LBi4	Cónicas alargadas.	Dúctil y frágil.	El elemento actúa como concentrador de esfuerzos en la grietas. Se observa como partículas de color blanco y brillante en la matriz metálica.
LBi5	Cónicas helicoidales cortas.	Dúctil.	El elemento está disperso en toda la matriz, se concentra en las grietas.

Tabla 3.7. Analisis de las virutas de mecanizado de los latones con y sin Bismuto.
(Continuación).

Muestra	Tipo de Viruta	Mecanismos de Deformación Fractura	Influencia del Bismuto
LBi6	Arco cortas.	Dúctil	El elemento actúa como concentrador de esfuerzos en la grietas. Se agrupa en estas.
LBi7	Cónicas alargadas.	Dúctil	Concentrador de esfuerzos en las grietas.
LBi8	Cónicas cortas.	Dúctil	El elemento actúa como concentrador de esfuerzos en la grietas. Actúa como "lubricante" durante el proceso de corte, se observa en disperso en toda la matriz.
LBi9	Cónicas helicoidales cortas.	Dúctil.	El elemento está disperso en toda la matriz, se concentra en las grietas.
LBi10	Arco cortas	Dúctil.	El elemento está presente en toda la matriz, sin embargo actúa como concentrador de esfuerzo y está presente en las grietas.
LB11	Cónica helicoidal alargada.	Dúctil	No hay presencia de Bi, se observan partículas brillantes blancas, correspondientes al Plomo, este se concentra en las grietas y genera un efecto lubricante frente a la herramienta de corte.
LB12	Cónicas helicoidales cortas.	Dúctil	Hay gran presencia del elemento en las grietas, causa efecto de concentración de esfuerzos en estas zonas

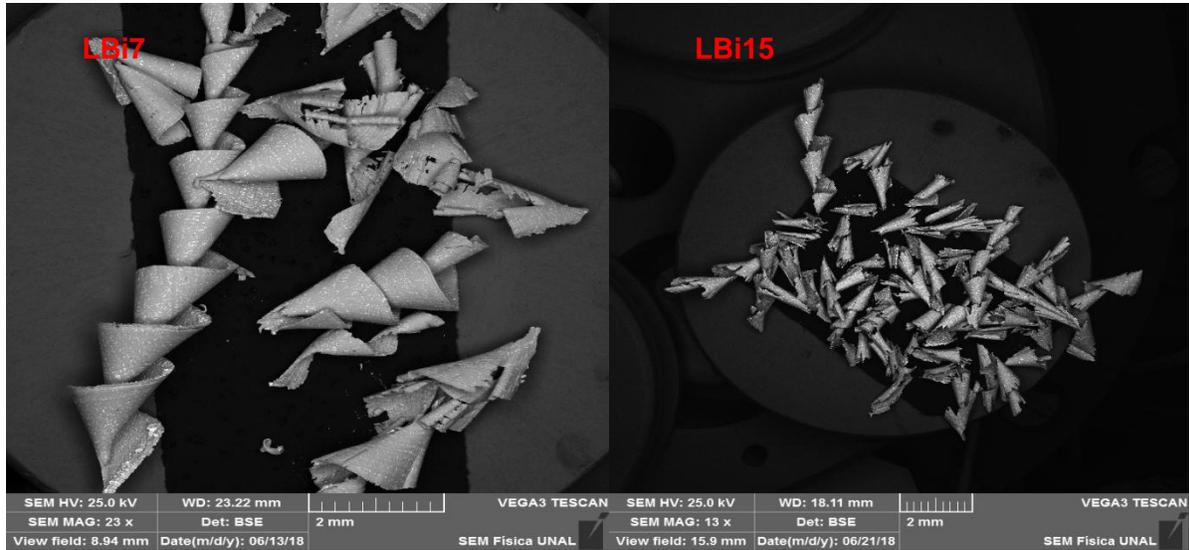
Tabla 3.7. Analisis de las virutas de mecanizado de los latones con y sin Bismuto. (continuación).

Muestra	Tipo de Viruta	Mecanismos de Deformación Fractura	Influencia del Bismuto
LBi13	Cónico helicoidales cortas.	Dúctil y frágil.	El elemento actúa como concentrador de esfuerzos en las zonas donde hay formación de grietas. Se observa como partículas blancas y brillantes.
LBi14	Cónico helicoidales cortas.	Dúctil y frágil.	El elemento actúa como concentrador de esfuerzos en las zonas donde hay formación de grietas.
LBi15	Arco alargadas y cónica helicoidal corta.	Frágil	El elemento actúa como concentrador de esfuerzos en la grietas. Se agrupa en estas zonas.

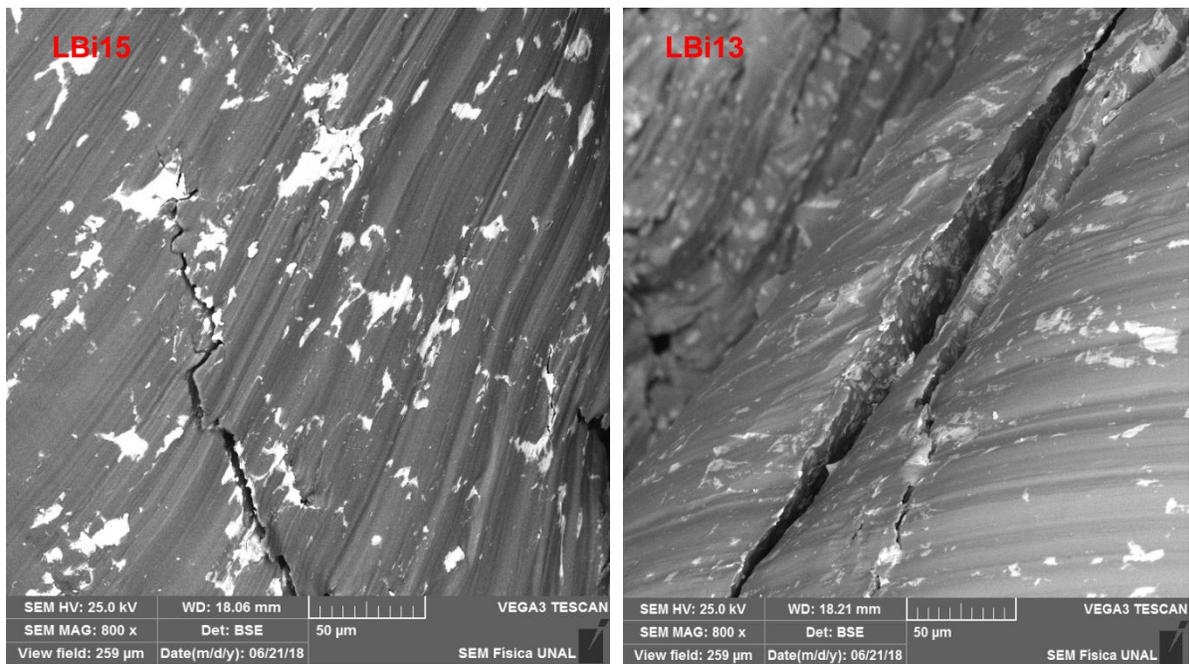
De igual manera, las muestras de viruta de los latones analizados, fueron observadas en otras magnificaciones y métodos de detección, como se puede observar en el Anexo C.

Las microscopias SEM, fueron efectuadas con el fin de evaluar la geometría y morfología de las virutas; Figura 3-8. De igual manera, durante las observaciones desarrolladas en esta técnica, fue posible identificar el elemento Bismuto en las aleaciones que lo contienen, este se muestra como partículas blancas, brillantes con formas irregulares, las cuales actúan como concentradores de esfuerzo en las grietas que se forman en el material por el efecto del taladrado, mediante la acción de la herramienta de corte, Figura 3-9.

Figura 3-8. Microscopia SEM Virutas, muestras *LBi 7* y *LBi 15*, Magnificaciones 23X y 13X.



Figuras 3-9. Microscopia SEM Virutas, identificación del Bismuto (partículas blancas) en las grietas y la matriz del latón, muestras *LBi15* y *LBi 13*.



3.7 Gravimetría virutas latones al Bismuto.

Como fue descrito en el anterior capítulo, las virutas obtenidas después del mecanizado de las muestras, fueron evaluadas gravimétricamente a nivel de laboratorio, en Tabla 3-6 se relacionan los valores obtenidos según los parámetros definidos para el análisis.

Tabla 3-6. Datos gravimétricos virutas latones.

Muestra	Viruta Cónica H. Corta (g) (fina Vf)	Viruta Arco Alargada (g) (gruesa Vg)	Peso Total (g)	% Concentración Bi
LBi1	0,614 (34,60%)	1,1472 (64,65 %)	1,7744	0
LBi11	0,7794 (54,55%)	0,6461 (45,22 %)	1,4288	0*
LBi4	0,7703 (40,70%)	1,1053 (58,40%)	1,8926	0,65
LBi3	0,8497 (39,99%)	1,2746 (59,99%)	2,1246	0,73
LBi2	0,5658 (26,41%)	1,5715 (73,35%)	2,1425	0,80
LBi12	1,2435 (84,56%)	0,2241 (15,24%)	1,4705	1,07
LBi5	0,2607 (19,98%)	1,0366 (79,45%)	1,3047	1,14
LBi8	1,3572 (84,86 %)	0,2404 (15,03%)	1,5994	1,20
LBi7	0,4602 (40,22 %)	0,6738 (58,88%)	1,1443	1,35
LBi6	0,9556 (82,37%)	0,2025 (17,45%)	1,1602	1,37
LBi9	0,9784 (63,53%)	0,5629 (36,55%)	1,5401	1,50
LBi13	1,0705 (100%)	0	1,0705	2,01
LBi10	1,9668 (100%)	0	1,9668	2,31
LBi15	2,0123 (98,72%)	0,0261 (1,28%)	2,0384	2,44
LBi14	1,9040 (95,95%)	0,0545 (2,75%)	1,9843	2,48

*Aleación de referencia LBi11, con contenido de Pb= 2.71 %. Tabla 3.2.

El análisis gravimétrico se efectuó con el fin de respaldar el análisis morfológico aplicado a las virutas mediante microscopía SEM; se desarrollaron estos dos análisis con el fin de hallar una correlación entre el maquinado, la presencia del elemento sustituto, cantidad de la viruta obtenida y la geometría de la viruta formada.

4. Analisis de Resultados.

Como se observó en capítulo anterior, en el desarrollo de la investigación se obtuvieron múltiples resultados en cada una de las pruebas efectuadas para la caracterización de la aleaciones de Latones al Bismuto.

En el presente capítulo se lleva a cabo los análisis de datos, orientando la información y su interpretación.

4.1 Durezas Brinell.

La evaluación de los resultados de las durezas Brinell obtenidas durante el desarrollo de esta prueba, se describe el test de normalidad y su análisis descriptivo, Tabla 4-1. En este cuadro se relaciona el análisis comparativo de la posible igualdad entre los promedios de las durezas de cada una de las muestras. Para ello, fueron tomadas todas las probetas de latón refusionadas, en estas están incluidas las aleaciones que contienen Bismuto y aquellas que no tienen presencia del elemento; fue tomado como muestra de referencia la probeta LBi11; que corresponde al latón plomado fabricado en laboratorio. Ver Anexo D.

Con el fin de definir la normalidad de los datos de la prueba de dureza en función de los contenidos de Bismuto, todos los valores son ingresados al software estadístico **SPSS**, donde se calcularon los valores de mediana, media, desviación estándar y rango de confiabilidad de todos los datos, para ello se manejó un nivel de significancia del 5%, para la evaluación de los datos fueron aplicados dos modelos para el test de normalidad: *Kolmogorov* y *Chapiro*, ambos permitieron evaluar si estos presentaban un comportamiento paramétrico o no paramétrico, Tabla 4-2.

Tabla 4-1. Test de Normalidad- análisis comparativo durezas latones al Bismuto

Variable	Media	Mediana	Desviación Estándar	Intervalo de Confianza	P-Valor (Prueba de Normalidad)
Dureza	141,34	140,5	24,06	[135,81 ; 146,64]	0,200
Bi%	1,27	1,2	0,78	[0,83 ; 1,70]	0,438

Una vez verificado el comportamiento normal de los datos, se definen dos tipos de hipótesis:

Hipótesis Nula (H_0) e **Hipótesis Alternativa** (H_1).

En (4.1) y (4.2) se describe las hipótesis aplicadas para el análisis estadístico de Durezas, donde μ es el valor de la media y j el número de muestras, dentro de estas hipótesis fue excluida la muestra de referencia LBi11:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_{14} \quad (4.1)$$

$$H_1: \mu_i \neq \mu_j; i \neq j; i, j = 1, 2, \dots, 14 \quad (4.2)$$

Tabla 4-2. Parámetro selección prueba estadístico.

Test	P-valor	Decisión
ANOVA	0,000	Rechazar Hipótesis Nula

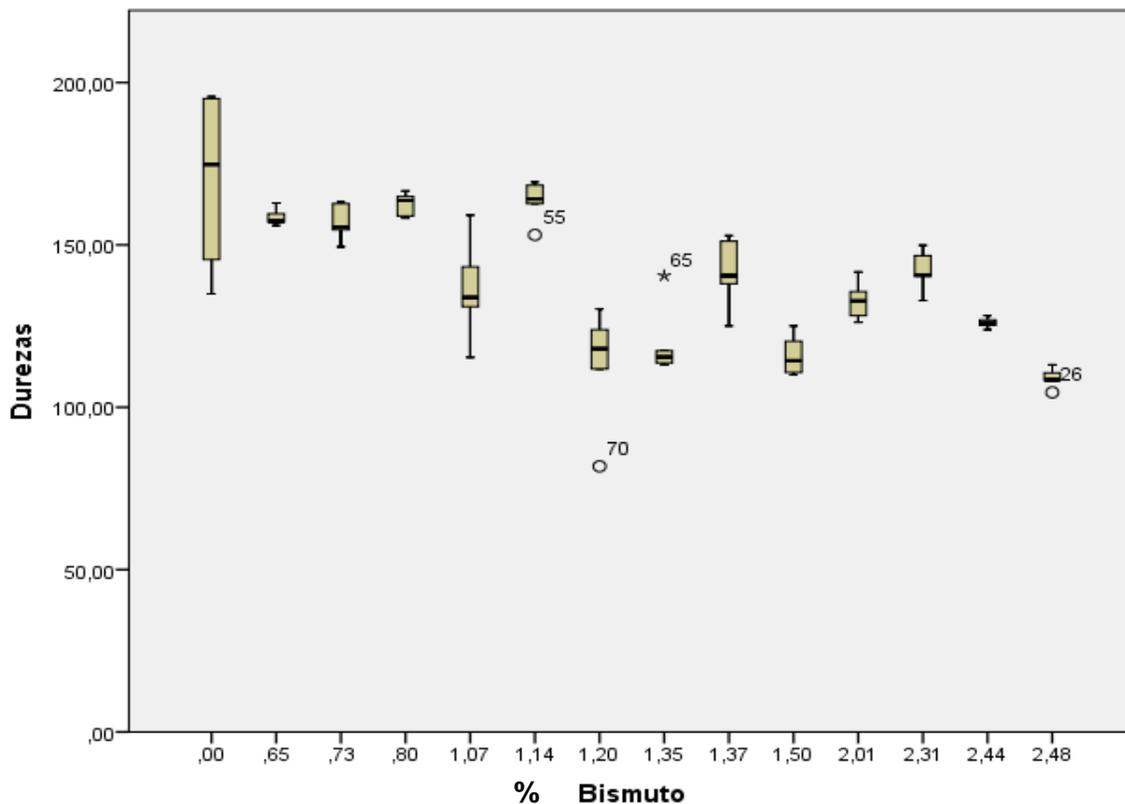
Definida la hipótesis en el análisis estadístico, se aplica la prueba T-Student, método matemático estadístico clásico, donde se toma la Media aritmética como parámetro para la interpretación de los datos, ya que la Anova es Simétrica y la distribución de sus datos es de tipo Gaussiano, la hipótesis Alternativa (H_1) es aceptada, durante la evaluación esta prueba se aplicó un nivel de significancia de 5 %

Para efectos de la prueba T Student de las Durezas, se tomó como muestra Goldstandard o de referencia la muestra de latón plomado LBi11 con su respectivo valor de dureza, (Tabla 3-4).

Una vez obtenido los datos en Tabla 4-2, se construyó una gráfica de correlaciones, en la cual se observa el efecto que genera la presencia del elemento Bismuto en la dureza de las aleaciones, para tal análisis se aplicó el método de correlaciones de Pearson en base al P-Valor obtenido en dicha tabla, Figura 4-2.

De igual manera se construyó la gráfica Box Plot, con el fin de comparar las medias múltiples de los valores de dureza en frente a los contenidos de Bismuto, Figura 4-1.

Figura 4-1. Grafica Box -Plot durezas (HB) Vs. % Bismuto



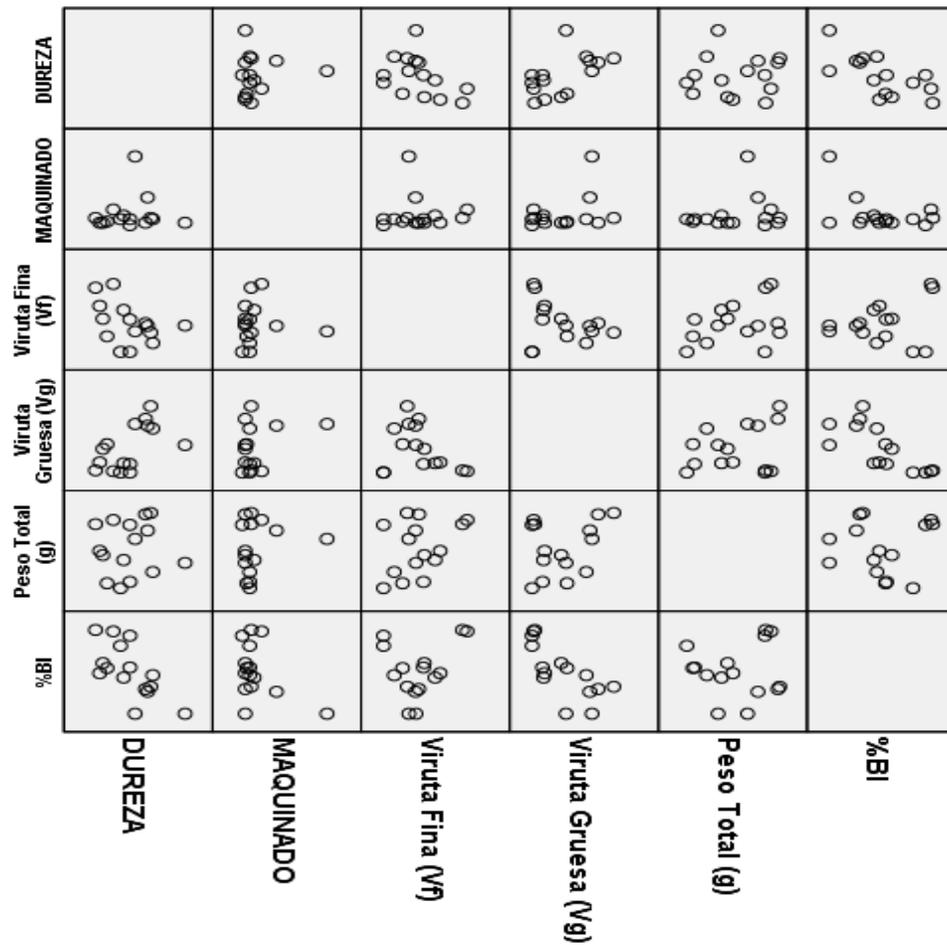
En la gráfica Box Plot de las durezas de las aleaciones, es posible observar el comportamiento de las muestras en función al contenido de Bismuto, es notoria la distribución de los datos, los valores de las medias de cada muestra indican que hay una clara dependencia de estas dos variables, en las cuales en contenidos altos de concentración de Bismuto (por encima al 2%) la Media de las durezas de estas aleaciones están en un rango de durezas entre 110 HB a 140 HB.

Para contenidos intermedios de Bismuto (1-2% Bi), la Media de las durezas de estas aleaciones están en un rango entre 110 HB- 160 HB, Figura 4-1.

Finalmente en rangos de concentración de Bismuto inferiores a 1%, la Medias de las Durezas están en un rango de 130 HB- 190 HB.

La dependencia de estas dos variables, permite concluir que entre los valores más altos de dureza se obtienen si y solo los contenidos de Bismuto son bajos y viceversa. Todos valores fueron comparados con el valor de la Media de la dureza de la aleación LBi11.

Figura 4-2. Datos de correlación latones al bismuto (HB). Fuente: Autor.



Se puede observar en los gráficos de correlación, en la sección de Dureza Vs. Contenido de Bismuto, que hay una relación inversamente proporcional entre estas dos variables, Figura 4-2.

De igual manera, se evidenció en la gráfica de correlaciones que el aumento de contenido de Bismuto en las aleaciones, produce una disminución proporcional de la dureza en los latones, condición que microestructuralmente está relacionada con la presencia de precipitaciones del elemento en los límites de grano. Su gran concentración debido a su insolubilidad en las fases, hace que estas partículas actúen como concentradores de esfuerzos, fragilizando el material y por ende disminuyendo su dureza.

Frente a la dureza de latón plomado, es posible inferir que este valor es el más alto de todo el conjunto de muestras y que ninguna de las muestras de latón supera la dureza de la aleación de referencia. En un porcentaje de 1,14% en contenido de Bismuto, se obtuvo el valor más alto de dureza de los latones bismutados, valor relativamente cercano al latón con Plomo, pero no siendo superior al comparativo.

4.2 Taladrado.

La evaluación estadística de los tiempos de maquinado por taladrado efectuado a las muestras de Latón, definió información de gran importancia en la investigación. Por tal razón se evaluaron todos los datos de tiempos de maquinado obtenidos en la prueba, esto con la finalidad de definir el tipo de modelo estadístico indicado para su análisis, ver Anexo D.

En primera instancia, se define el análisis descriptivo para evaluar la posible normalidad de los datos de la prueba de Taladrado en función de los contenidos de Bismuto, todos los valores son ingresados al software estadístico **SPSS**, donde se calcularon los valores de mediana, media, desviación estándar y rango de confiabilidad de todos los datos, esto con el fin de evaluar si los datos presentan un comportamiento paramétrico o no paramétrico basados en una prueba de normalidad Kolmogorov con un nivel de significancia del 5%, Tabla 4-3.

Tabla 4-3. Test de normalidad: análisis comparativo –tiempos taladrado latones con y sin contenido Bismuto

Variable	Media	Mediana	Desviación Estándar	Intervalo de Confianza	P-Valor (Prueba de Normalidad)
Maquinado (Seg.)	14,22	9,08	14,17	[11,93 ; 16,50]	0,000
BI%	1,27	1,2	0,78	[0,83 ; 1,70]	0,438

Debido a que los parámetros observados en Tabla 4-3, indican que no hay grado de normalidad (P-Valor) en los datos de taladrado, se debe contemplar un análisis estadístico no paramétrico para el tipo de prueba estadística a efectuar, siendo esta, la prueba Kruskall Wallis. Ver Anexo D.

A continuación en 4.4 y 4.5 se relación las hipótesis aplicadas, donde fue excluida la muestra de referencia LBi11

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_{14} \quad (4.4)$$

$$H_1: \mu_i \neq \mu_j; i \neq j; i, j = 1, 2, \dots, 14 \quad (4.5)$$

Donde μ es el valor de la media y j el número de muestras. Una vez evaluados los datos numéricos, se comprobó que la distribución de los mismos no es normal, Tabla 4-3.

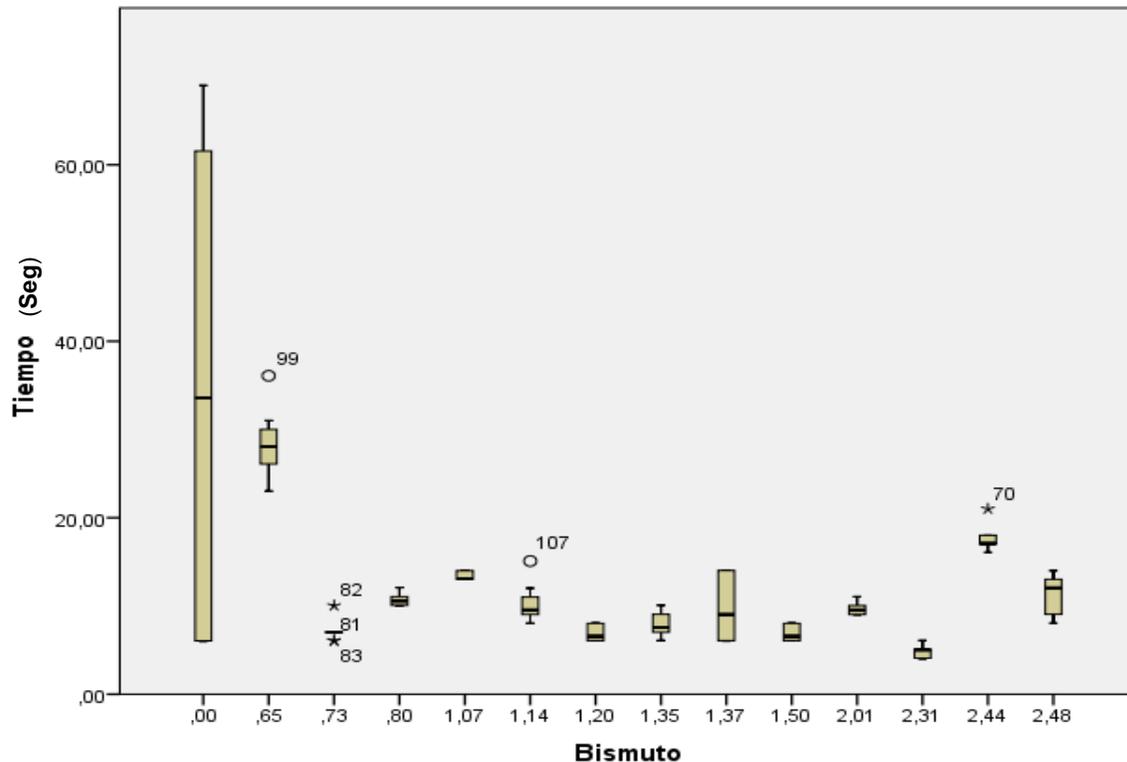
Tabla 4-4. Parámetro selección prueba análisis estadístico del taladrado.

Test	P-valor	Decisión
Kruskall Wallis	0,000	Rechazar Hipótesis Nula

Una vez comparados los datos no normalizados en el software mediante el Test Kruskall Wallis, Tabla 4-4; estos datos son analizados mediante la prueba estadística **Wilcoxon**,

en la cual se hace una comparación de la Media independiente de los tiempos de taladrado del latón LBi 11 contra la Media de los tiempos de taladrado de la muestras de Latones al Bismuto, esta prueba se efectuó dos a dos. Mencionar que esto significa que si hay influencia del contenido de bismuto en los tiempos de maquinado.

Figura 4-3. Grafica Box -Plot tiempos de taladrado Vs. % Bismuto



Se puede observar en la gráfica Box Plot para el Taladrado, que las medias de los tiempos de taladrado de las muestras de Latón bismutado, son menores frente a la media de tiempo de mecanizado de la muestra de referencia LBi11, Figura 4-3.

La presencia del Bismuto en las aleaciones, genera un efecto importante respecto en relación al proceso de corte aplicado, ya que la aleación es dúctil y permite disminuir el tiempo de mecanizado en el proceso, en los rangos de concentración aplicados en la investigación fue posible ver este efecto, la presencia de partículas de Bismuto en la matriz de Cobre, y su distribución en los límites de grano; genera un efecto de desprendimiento de material y formación de virutas cónicas helicoidales cortas, en una mayor proporción en

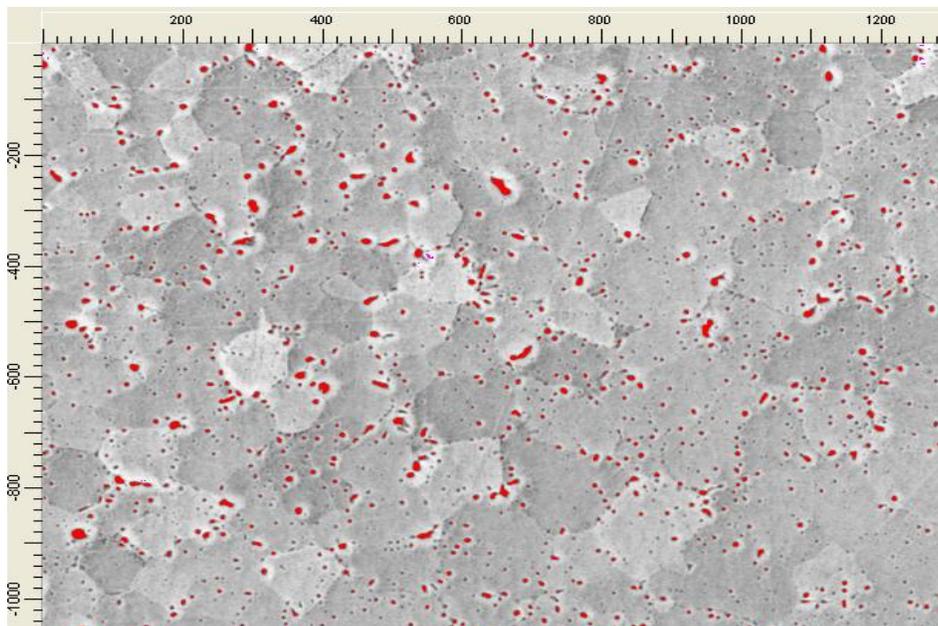
las concentraciones del Bismuto superiores al 2%; esta condición llevo a comprender que la formación de granos de tipo dendrítico o equiaxial, su crecimiento a partir de las partículas insolubles de Bismuto; favorece un mayor desprendimiento o arranque de material al efecto de la herramienta cortante.

4.3 Análisis metalográfico.

Como fue descrito en el capítulo anterior, todas las muestras fueron preparadas y observadas por microscopia óptica. Las observaciones efectuadas a 100X, han arrojado información relevante respecto al comportamiento del Bismuto en la microestructura de los latones. Ver Anexo B.

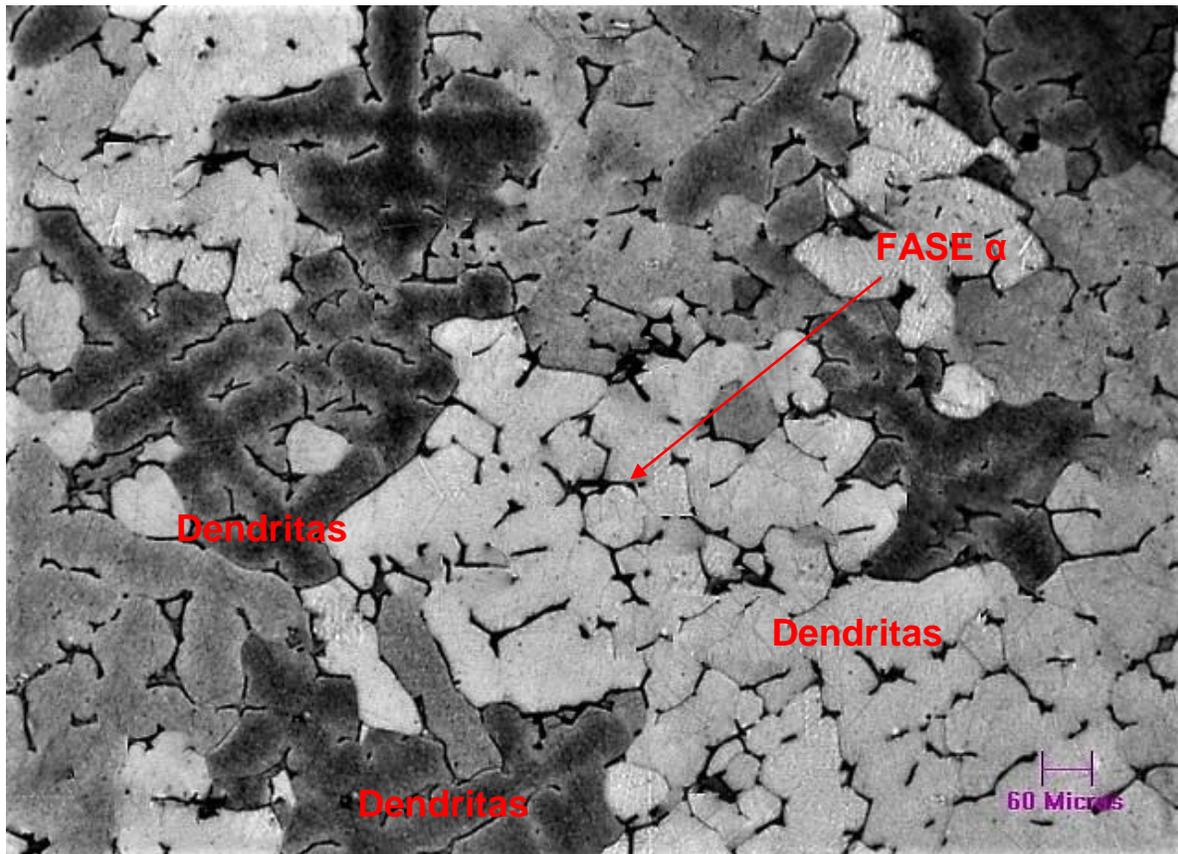
Hay una notoria presencia de Bismuto en la mayoría de las aleaciones, la formación de los precipitados es identificable, debido a su geometría y forma de organización entre los límites de grano de cada una de las fases. Durante la observación microscópica de las aleaciones, fue posible evidenciar la formación de defectos tales como poros y microrechupes en la matriz, posiblemente generados por el encapsulamiento de gases durante el proceso de solidificación, Figura 4-4.

Figura 4-4. Metalografía muestra LBi15 a 100X, conteo de poros.



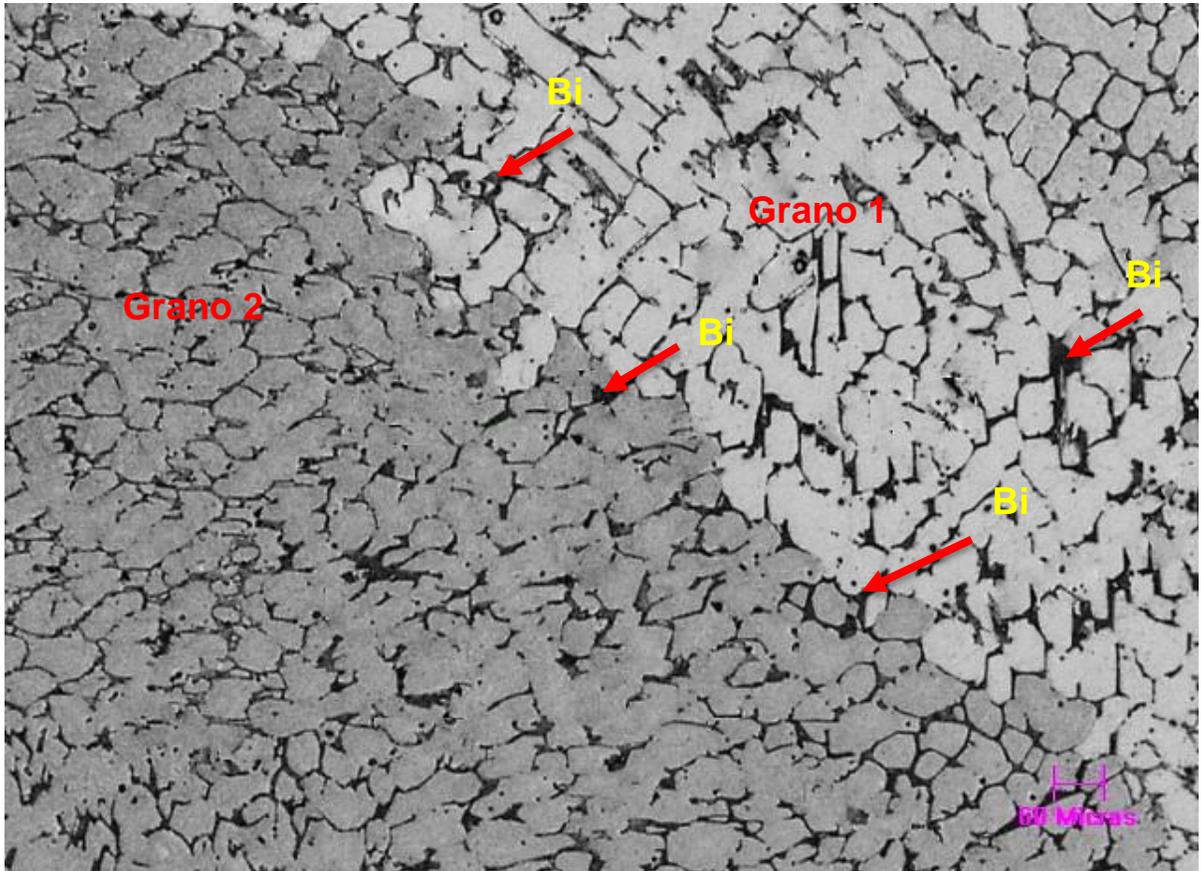
En algunos casos como la micrografía de la aleación LBi1, se identifica la clara formación de la fase Alfa (α) en este tipo de aleación. Para esta micrografía es evidente la formación dendrítica arborescente multidireccional, donde el crecimiento de la dendrita obedece a un rompimiento de la interfase, no se observa algún tipo de partícula insoluble en los límites de grano, sin embargo otros tipo de partículas de menor tamaño son atrapadas por el frente de solidificación.

Figura 4-5. Metalografía muestra LBi1 a 100X, formación granos dendríticos y fase α .



En algunos casos, en micrografías como se muestran en las Figuras 4-5 y 4-6, se evidencia la formación de granos equiaxiales; se identifican la Fase Alfa en la microestructura de las aleaciones; sin embargo para niveles de micro volúmenes en la interfase Grano-Líquido, la consideración de que esta pueda ser de tipo planar, podría explicar cómo son atrapadas en la interfase ciertas partículas de Bismuto en formación de menor tamaño y otros elementos presentes en las aleaciones.

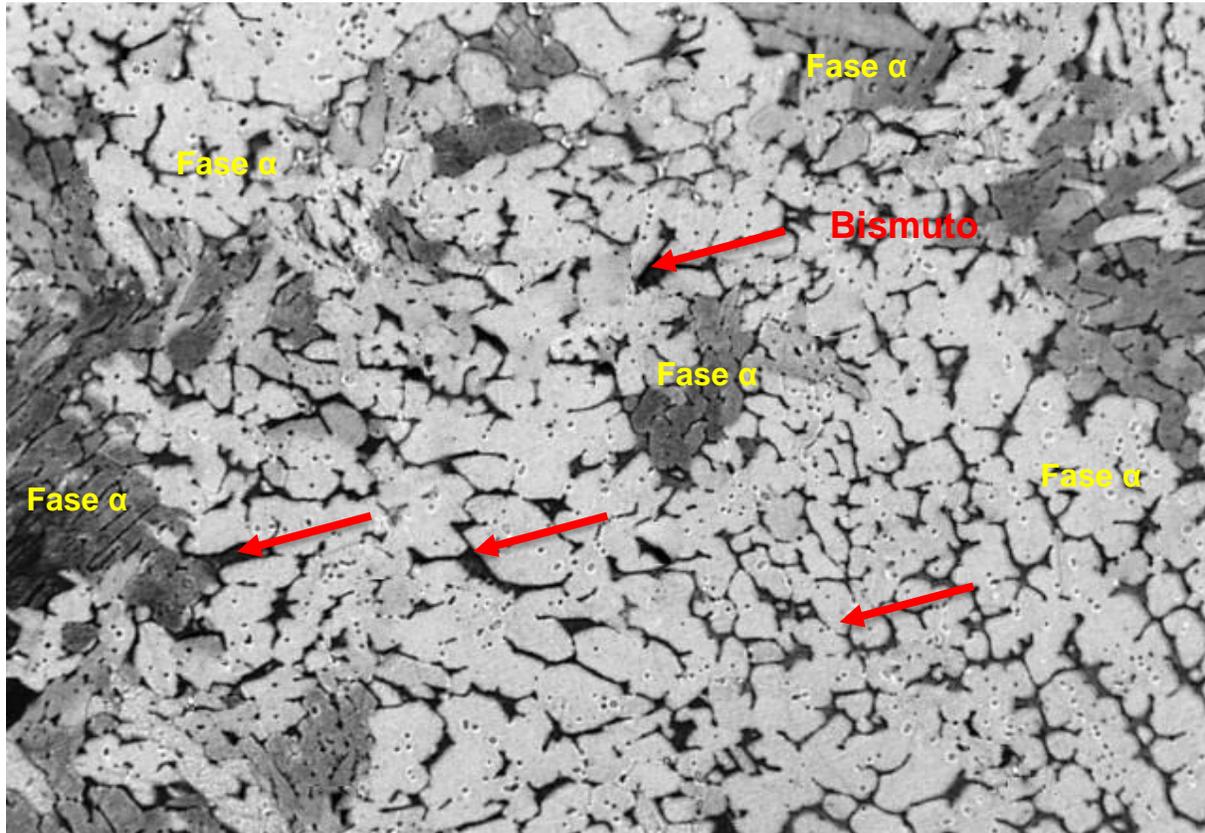
Figura 4-6. Metalografía muestra LBi3 a 100X, formación granos equiaxial y fase α .



Debido a la naturaleza de las partículas insolubles de Bismuto formadas en las fases, el frente de solidificación desarrollado por los granos equiaxiales ejerce sobre estas partículas de mayor tamaño un efecto de “presión”, generando un movimiento de estas hacia los límites de grano en la Fase, como se observan en la anterior micrografía, Figura 4-6.

A partir de la solución de Bismuto, el crecimiento de los granos es igual en todas las direcciones; posiblemente el comportamiento de estos Bismutos obedezca a una alta convección entre las interfases grano-liquido. Esta característica; favorece la aglomeración de las partículas insolubles y su posicionamiento en los límites de grano, Anexo B.

Figura 4-7. Metalografía muestra LBi2 a 100X, formación granos equiaxial y fase α .



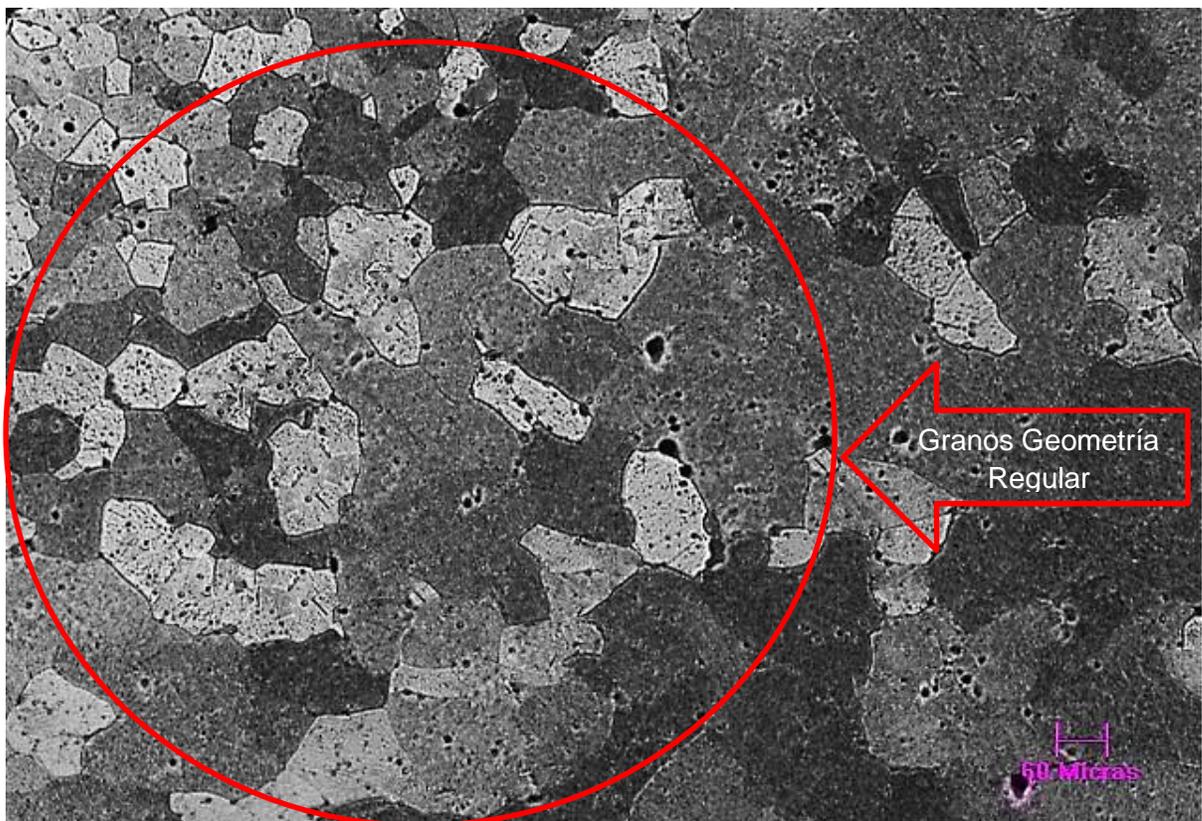
De igual manera, se observa la presencia de partículas de menor tamaño atrapadas en la fase Alfa (α), micrografía *Figura 4-7*. La organización de las partículas absorbidas en ésta Fase está distribuida de forma aleatoria, en función a la convección formada entre la interfase grano-liquido.

Otra característica que se evidencia en la microestructuras de las aleaciones, es el *tamaño de grano*; es posible observar diferentes tamaños, geometrías y defectos en la microestructura, posiblemente no solo relacionado a la presencia del Bismuto en la matriz sino a otras condiciones del proceso de fabricación, tales como molde empleado, ya que para procedimientos con moldes en arena gasificada la finura de grano puede obedecer a un proceso transferencia de calor convectivo del metal fundido y la arena y del molde al ambiente, dando como resultado este efecto.

En la mayoría de microscopías, se observa que hay una predominio de la Fase Alfa (α), que obedece según el diagrama de fase Cu-Zn al contenido de Zn presente en este tipo de aleaciones.

La formación de esta fase en la aleación puede tener correlación con el tipo de molde empleado, debido a que los moldes en arena como es el caso; pueden favorecer la cinética de los procesos solidificación, favoreciendo la evolución de enfriamientos más lentos que propician un crecimiento de grano y densificación de la fase.

Figura 4-8. Metalografía muestra LBi12 a 100X, crecimiento de granos en fase α .

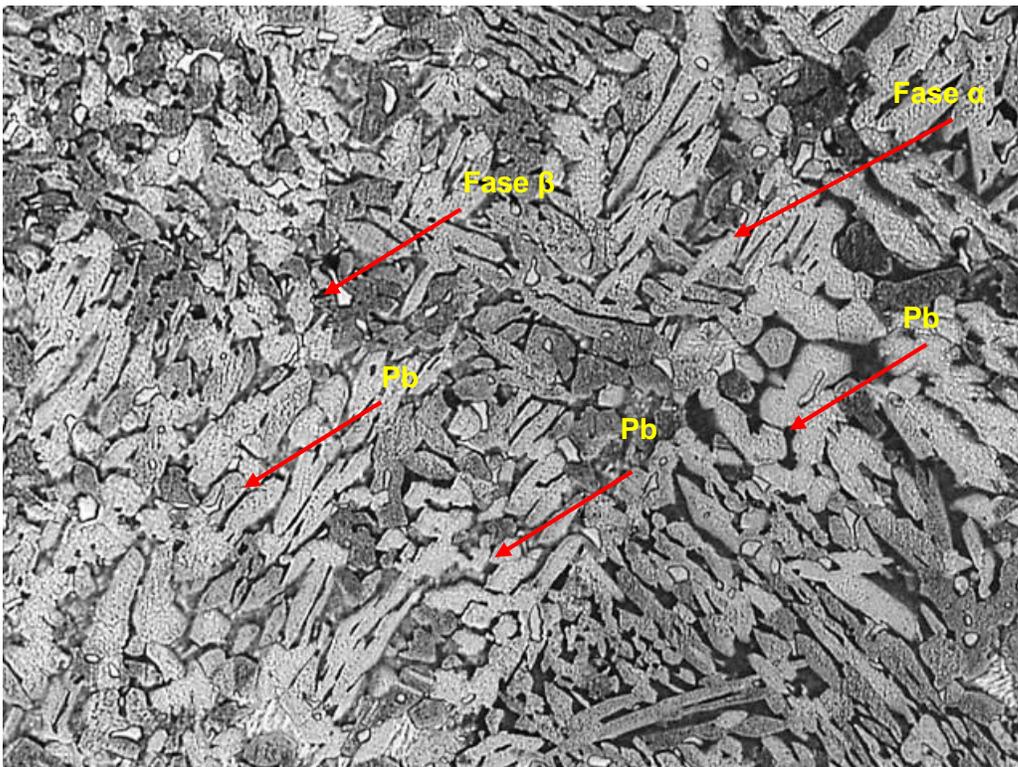


En micrografías como la Figura 4-8, se observa el crecimiento de los granos, con geometría regular y presencia de precipitados de Bismuto en los límites de grano. Para este caso; el crecimiento y aumento de tamaño de los granos es progresivo desde el borde hacia el núcleo de la microestructura, como respuesta al proceso convectivo.

Estas estructuras son similares a las que presentan un Latón Tipo Beta, que ha sido deformado en caliente, donde se evidencian granos regulares, pero en este caso, las aleaciones de Bismuto; a pesar de tener cierta similitud a los latones Beta por su geometría de grano en su microestructura, por su contenido de Zinc no clasifica en este tipo de latones, por lo tanto esta formación de granos para los latones bifásicos está más asociado a su composición química, control de temperatura, solidificación y formación de la solución sólida a partir de su eutéctico..

Otra microestructura importante observada en el análisis; es la aleación de latón plomado, Figura 4-9, una aleación de latón bifásico sin presencia de Bismuto; en donde se observa la formación de estructuras con precipitados de Pb en los límites de grano, hay crecimiento en ciertos planos activos de la fase β , formando una estructura tipo Widmanstätten, en la que los cristales de α adoptan formas de agujas.

Figura 4-9. Metalografía muestra LBi11 a 200X, crecimiento de granos en fase α y β .



Se identifica la presencia de las zonas Alfa y Beta típica de este tipo de Latones, con la presencia de Plomo en los límites de grano; para esta aleación el Plomo forma una Fase

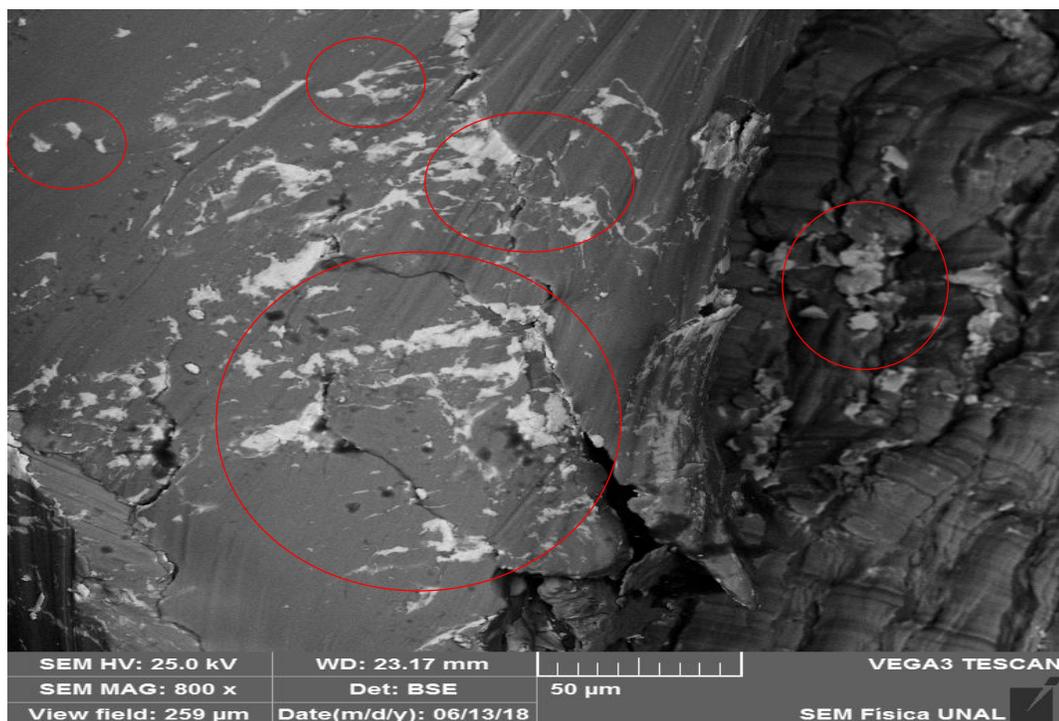
Globular dispersa en la matriz bifásica similar a la formada por el Bismuto en las demás aleaciones; debido a su baja solubilidad en la matriz, este elemento se dispersa como se observa en la micrografía anterior.

4.4 Microscopia SEM para las Virutas.

Durante esta etapa de análisis de las micrografías obtenidas por microscopia electrónica, fue recolectada información de gran interés respecto a la geometría, morfología y presencia del elemento Bismuto en la matriz Cu-Zn.

En Figura 4-10, fue posible observar distintas zonas de interés en la matriz. Las áreas señaladas en color rojo indican la presencia del Bismuto, las zonas más oscuras representan la matriz del Latón, es evidente su segregación en todas las regiones, sin embargo en algunas de estas hay mayor concentración del elemento. Ver anexo C.

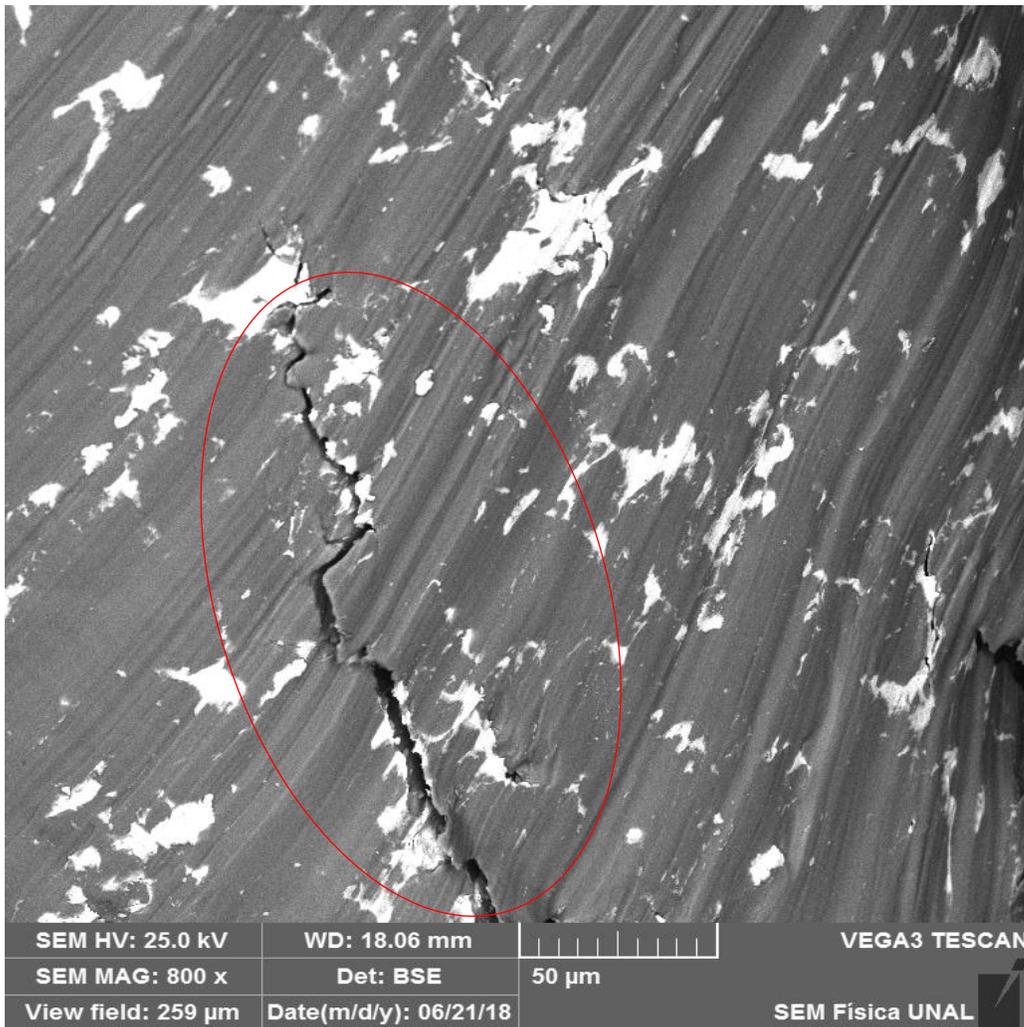
Figura 4-10. Microscopia SEM muestra LBi7 a 800X, identificación del Bi.



Las micrografías revelan la presencia del Bismuto, como partícula de aspecto brillante, coloración blanca y distintas geometrías, la cual está distribuida heterogéneamente en la

matriz metálica, sin embargo en algunas zonas se observa una mayor densificación de este elemento y aglomeración, como se puede verse en la Figura 4-11, las grietas en la matriz, tienden a seguir los precipitados de Bismuto.

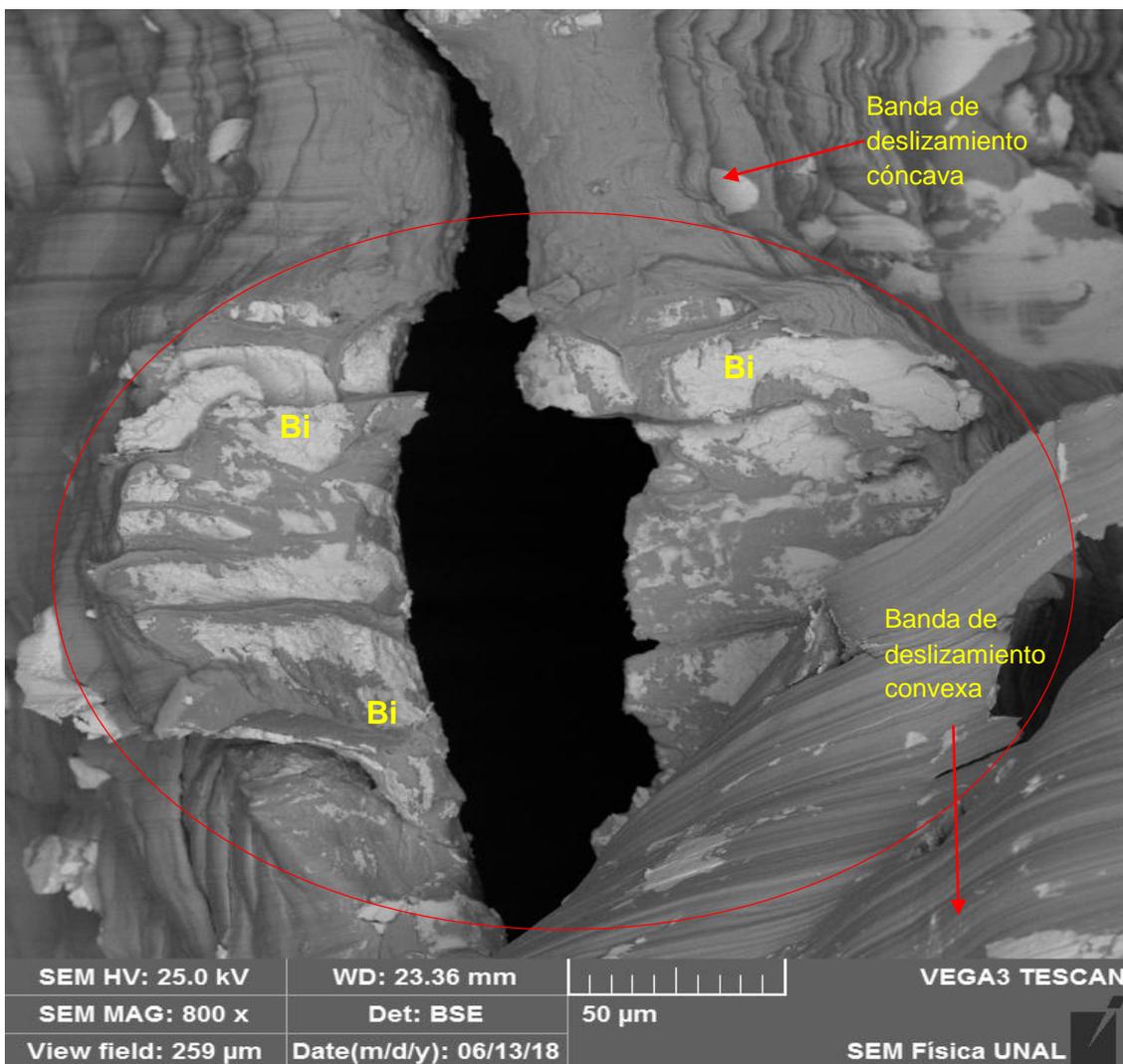
Figura 4-11. Microscopia SEM muestra LBi7 a 800X, identificación del Bi



Esta conducta desarrollada por el elemento, puede corroborar como una partícula insoluble en un medio como una fase, tiene una tendencia a ser “presionada” por un frente de solidificación, en donde por efectos del mismo proceso de solidificación se pueden presentar formación de tensiones o esfuerzos que favorecen la formación de una microgrieta, y la aglomeración de partículas de Bismuto en estas áreas, favorecerán la propagación de la fisura, actuando como concentradores de esfuerzos, en efecto una mayor facilidad de desprendimiento de material.

La formación de bandas de deslizamiento generadas por el proceso de mecanizado, permite observar cómo la presencia del elemento desarrolla un efecto “plástico” en el material, ya que la resistencia mecánica es baja para este elemento, frente a otros elementos químicos similares, la formación de mecanismos de deformación es evidente, los cuales en procesos como el corte o mecanizado, favorecen un fácil desprendimiento de material.

Figura 4-12. Microscopia SEM muestra LBi8 a 800X, precipitados de Bi en grieta.



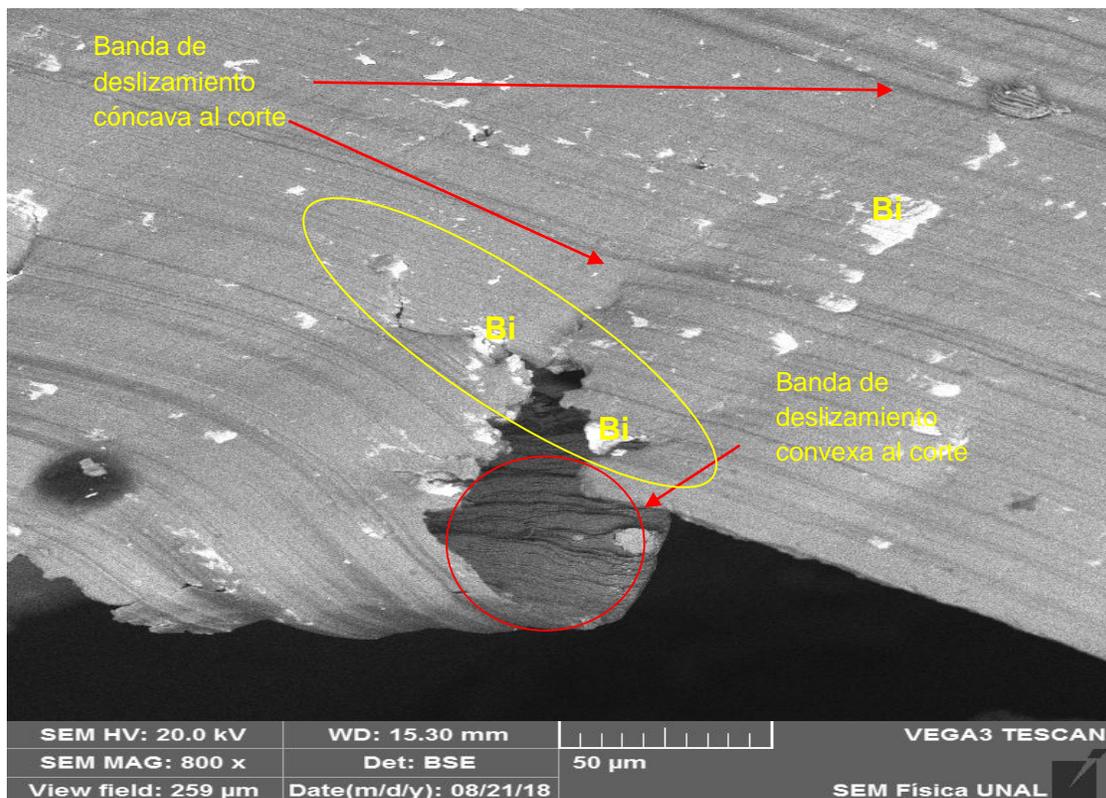
En las fotografías se pueden distinguir fácilmente las bandas de deslizamiento generadas por el efecto cortante durante el mecanizado de las aleaciones, para esta situación se

observan dos tipos de caras: una zona de deslizamiento contra la herramienta de corte y una zona opuesta a la herramienta donde afloran los escalones de deformación, ambas producidas por el efecto mecánico de la herramienta sobre el material.

La presencia de las partículas de Bismuto en las caras, indica que su efecto “lubricante” en el proceso de corte es efectivo, y que microestructuralmente las partículas de este elemento químico, están favoreciendo el deslizamiento entre granos y en el interior de los granos, debido al efecto concentrador de esfuerzos en las zonas donde está presente, como resultado de su insolubilidad en solución sólida., en anexo D se relaciona detalles.

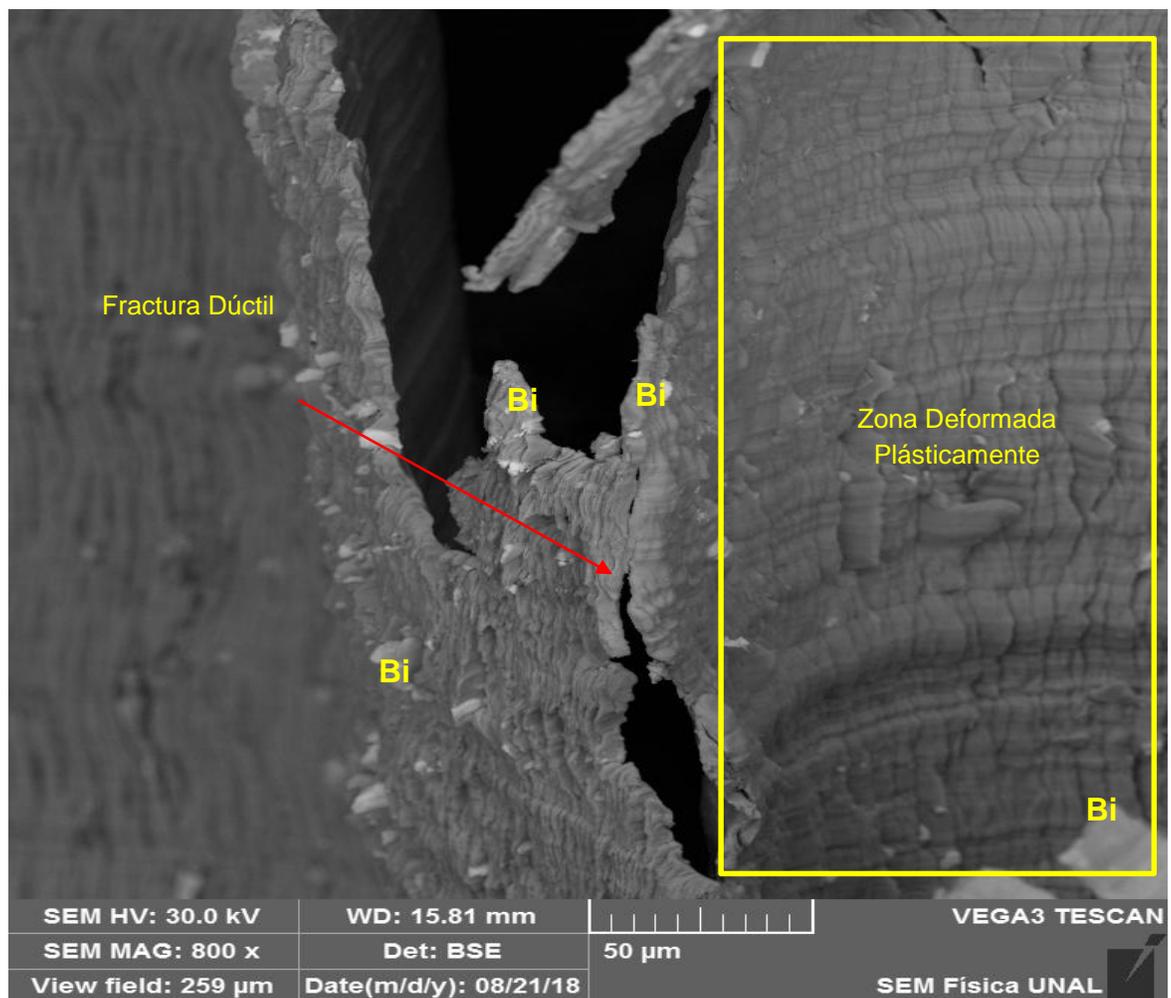
En algunas micrografías como la *Figura 4-12*, es posible observar con facilidad la orientación de la superficie de corte en las caras cóncavas y convexas de la viruta, de igual manera es posible ver la formación de fisuras que generan desprendimiento de material por la presencia del Bismuto en esas regiones.

Figura 4-13. Microscopia SEM muestra LBi3 800X, superficies de deslizamiento al corte.



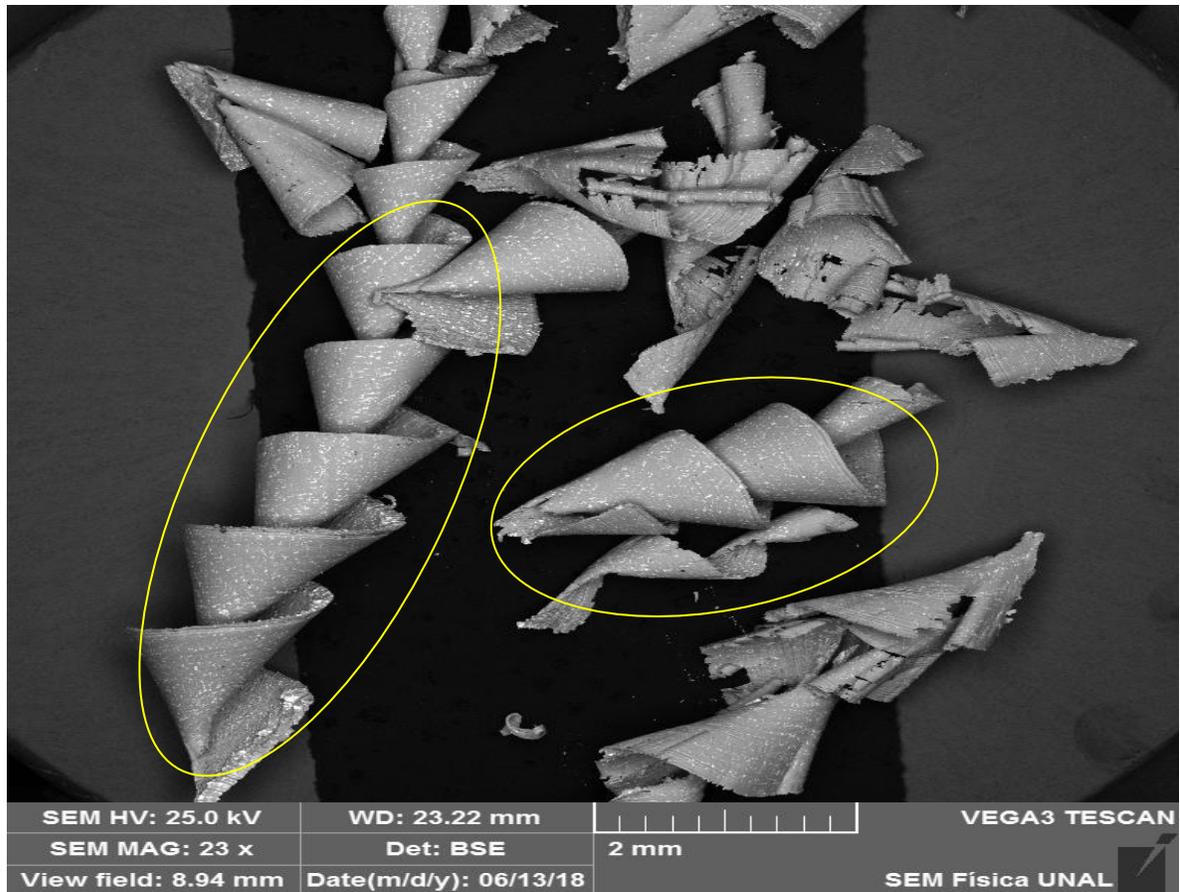
Evaluando el tipo de fractura presente en las micrografías de estas aleaciones, es posible concluir que el mecanismo de fractura que se desarrolló durante el proceso de corte mecánico por taladrado, obedece a una fractura de tipo *Dúctil* en la mayoría de las muestras, situación que es fácilmente evidenciable en algunas de la micrografías como es el caso particular de la *Figura 4-13*, donde se nota la zona de deformación plástica previa a la formación y propagación de la generación de la grieta. Ver Anexo C.

Figura 4-14. Microscopia SEM muestra LBi4 800X, fractura dúctil.



Finalmente, las micrografías SEM también arrojan información del tipo de viruta obtenida en estas aleaciones, como se observa en las *Figuras 4-14*, las geometrías de las virutas generadas durante el proceso de taladrado tienen una formación de tipo cónico- helicoidal continua.

Figura 4-15. Microscopia SEM muestra LBi4 800X, fractura dúctil.



Según la clasificación de la ISO 3685:1993, las virutas obtenidas durante el mecanizado son de dos tipos: *Virutas Cónico Helicoidales* y *Virutas Tipo Arco.*”, ver Tabla 3-7.

5. Conclusiones y Recomendaciones.

Toda la información recolectada durante el desarrollo de la presente investigación permitió llegar a conclusiones relevantes:

- Fue posible obtener en la presente investigación, a través de procesos de fundición tradicional quince (15) aleaciones de latón amarillo; de las cuales trece (13) de estas fueron aleaciones de latón al Bismuto con concentraciones del elemento desde 0,65 % hasta 2,48% en peso, una (1) aleación del latón plomado con contenido de Plomo de 2,71% en peso y una (1) aleación de latón amarillo sin contenido de Bismuto.
- La maquinabilidad de los latones bismutados en función al tiempo de corte, es directamente dependiente al contenido del elemento en la matriz. Frente a la muestra de referencia fue posible identificar que con un contenido de 2,31% de Bi en la aleación LBi11, el tiempo de taladrado es significativamente menor en comparación a la muestra plomada, con una formación del 100% de virutas cónico helicoidales cortas. La muestra LBi9 con contenido de 1,5% de Bi, arrojó valores de taladrado muy cercanos a la muestra de referencia, con 63,53% de formación de virutas cónico helicoidales cortas, situación que confirma el efecto del elemento sustituto del Plomo frente al proceso de corte, evidenciado en la formación de virutas.
- En la parte microestructural, se confirmó el predominio de la fase Alfégena en las mayoría de las aleaciones de latón al Bismuto; esta característica se confirmó con la composición química de las aleaciones en los resultados obtenidos en los análisis de espectrometría de emisión óptica y análisis químico por XRF, condición corroborada por diagrama de fases Cu-Zn. Sin embargo las aleaciones *LBi11*, *LBi12*, *LBi13*, *LBi14* y *LBi15* mostraron formaciones de fases de tipo bifásico (Alfa y Beta), donde el

Bismuto fue observado como partícula de coloración oscura, insoluble entre las fases y con formación de precipitados en los límites de grano; las geometrías de estas partículas son globulares dispersas en la matriz y en los bordes de grano; muy similares a las observadas en la microestructura Widmanstätten de la aleación con Plomo LBi11.

- En las observaciones microscópicas SEM efectuadas a las virutas, fue posible evidenciar el efecto y comportamiento del Bismuto en los límites de grano de las fases. Este elemento actuó como concentrador de esfuerzos, favoreciendo el deslizamiento de las bandas y el desprendimiento de material en forma de virutas helicoidales cortas; como respuesta al efecto de la herramienta de corte. Igualmente su presencia en la matriz, propició un efecto plástico en el material, favoreciendo en su mayoría propagación de grietas con un mecanismo de fractura dúctil en las zonas donde se concentraron los precipitados del elemento.
- En cuanto a la dureza de las aleaciones de Latones al Bismuto, fue posible evidenciar la relación inversamente proporcional entre la propiedad y la concentración del elemento químico, a mayores concentraciones de Bismuto en las aleaciones hay un notorio decaimiento del valor de dureza Brinell comparado con la dureza de la aleación LBi11. En las aleaciones con contenidos superiores al 2% de Bi, los valores promedios de dureza llegan a 120 HB, menores en comparación la dureza de referencia. Este efecto generado en las aleaciones, fue corroborado en los cuadros de correlación construidos en los análisis estadísticos de los valores de las medias aritméticas de las durezas de cada una de las aleaciones.

Recomendaciones.

- Es importante, en el proceso de manufactura tener un estricto control de la variable Temperatura, debido a que los puntos de fusión del Cobre, Zinc y Bismuto difieren significativamente, se recomienda que en el proceso de fusión de la aleación de latón, el orden durante el cargue de los metales sea: Base cobre-Zinc, luego se agregue los aleantes y al momento de colar el material se agregue otra cantidad de Zinc metálico, para compensar las pérdidas del proceso. Las reacciones de vaporización del Zinc son altas; es necesario controlar esta condición, ya que los gases puede arrastrar bismuto y descompensar los contenidos del elemento en la aleación.
- Se recomienda agregar trazas de elementos como el Aluminio metálico, de la tal forma que el porcentaje de retención en la aleación sea en rangos entre 0,15 a 0,35%, esta condición garantizara una buena fluidez de metal fundido y mantener la vaporización del Zinc al mínimo. En el caso del P y Si, se deben tener rangos máximos de concentración en peso del 4% y 0.020 % respectivamente; esto garantizará la no formación de poros internos en las piezas fundidas.
- Se recomienda continuar con una segunda etapa de caracterización de aleaciones de latones al Bismuto, pero en concentraciones del elemento por encima al 3% en peso, con el fin de seguir construyendo una investigación más complementada y una evaluación más cercana a las condiciones reales de los latones plomados comerciales. Es aconsejable sea ampliada la caracterización de aleaciones de latón bismutado en rangos de concentración del elemento entre 2,3 % y 2,4% wt; debido que algunas aleaciones en estos rangos, lograron algunas características similares al latón plomado del estudio, si pueden ser tecnificadas; podrían tener una buena probabilidad en cuanto a las propiedades mecánicas deseadas para este tipo de aplicaciones.
- Se recomienda ampliar la caracterización de estos latones, empleando otras técnicas analíticas tales como XRD y Microdureza, principalmente en los precipitados formados microestructuralmente en los latones y los posibles compuestos intermetálicos, evidenciados en las micrografías evaluadas.

A Anexo: Cálculos y balances de carga.

En el presente anexo se relacionan datos detallados de la composición química según ASTM B854 de algunas aleaciones de latón al Bismuto, que son comercialmente usadas en algunas aplicaciones. Estos datos permitieron definir un punto de partida para establecer las concentraciones teóricas de Bismuto deseadas a obtener en la investigación.

COMPOSICIONES ALEACIONES LATONES AL BISMUTO ASTM B584 (% EN PESO)													
DENOMINACION	Cu (%)	Tin (%)	Lead (%)	Zn (%)	Ni (%)	S (%)	Fe (%)	Al (%)	Nb (%)	Bi (%)	Sn	Se	Total en peso
LATON Bi Se C89510D	87	5	0	5,00	0	0	0	0	0	1	0		98
LATON Bi Se C89520	86	5 1/2	0	5,00	0	0	0	0	0	1,9	0		98,4
LATON Bi Se C89530	86,5	4,7	0	8,00	0	0	0	0	0	1,5	0		100,7
LATON Bi Se C89535	86,5	3	0	7,00	0,65	0	0	0	0	1,4	0		98,55
LATON Bi													
C89537	85	4,5	0	9,00	0	0	0	0,9	0	1,7	0		101,1
C89670	60,5	0,8	0	36,50	0,32	0	0	0	0	1	0		99,12
C89720	67,5	1	0	29,80	0	0	0	0,5	0	0,7	0		99,5
Latón Rojo Bi C89833	89	5	0	3,00	0	0	0	0	0	2,2	0		99,2
Bronce al Bi C89836	89,5	5,5	0	3,00	0	0	0	0	0	2	0		100
Latón al Bi Semi Rojo C844	84 1/2	4	0	8,00	0	0	0	0	0	3	0		99,5

De igual manera, el Anexo A relaciona las composiciones químicas teóricas proyectadas, para la obtención de las aleaciones de latones al Bismuto y las aleaciones que no contendrían el elemento (*LBi1* y *LBi11*).

Son relacionados también, los cálculos de carga efectuados para el total de material a obtener en las coladas C1 y C2 de latón Madre:

LATONES (Contenidos Teóricos)													
MUESTRA C1 y C2 LATON	Muestra	Cu (%)	Tin (%)	Lead (%)	Zn (%)	Ni (%)	S (%)	Fe (%)	Al (%)	Nb (%)	Bi (%)	Sn	Se
	LBi1	60,84	0,00	0	39,08	0,00	0	0	0,3	0	0	0,2	0
	LBi2	60,84	0,00	0	39,08	0,00	0	0	0,3	0	1,15	0,2	0
	LBi3	60,84	0,00	0	39,08	0,00	0	0	0,3	0	1,25	0,2	0
	LBi4	60,84	0,00	0	39,08	0,00	0	0	0,3	0	1,45	0,2	0
	LBi5	60,84	0,00	0	39,08	0,00	0	0	0,3	0	1,6	0,2	0
	LBi6	60,84	0,00	0	39,08	0,00	0	0	0,3	0	2,1	0,2	0
	LBi7	60,84	0,00	0	39,08	0,00	0	0	0,3	0	2,5	0,2	0
	LBi8	60,84	0,00	0	39,08	0,00	0	0	0,3	0	2,8	0,2	0
	LBi9	60,84	0,00	0	39,08	0,00	0	0	0,3	0	3	0,2	0
	LBi10	60,84	0,00	0	39,08	0,00	0	0	0,3	0	3,4	0,2	0
	LBi11	60,84	0,00	5	39,08	0,00	0	0	0,3	0	0	0,2	0
	LBi12	60,84	0,00	0	39,08	0,00	0	0	0,3	0	1,9	0,2	0
	LBi13	60,84	0,00	0	39,08	0,00	0	0	0,3	0	2,6	0,2	0
	LBi14	60,84	0,00	0	39,08	0,00	0	0	0,3	0	2,9	0,2	0
	LBi15	60,84	0,00	0	39,08	0,00	0	0	0,3	0	3,4	0,2	0

BALANCES DE CARGA

Capacidad del Horno 20 Kg/ 2 Kg

COLADA MADRE (Base de Cálculo 10000 g)	
Elemento	Peso (g)
Cu	4.350
Retorno LATON	2.750
Zn	6.195
Total	10.545

Composición Retorno Latón		COLADA
Cu	60,84	C1
Cu	61,41	C2
Zn	39,08	C1
Zn	38,51	C2

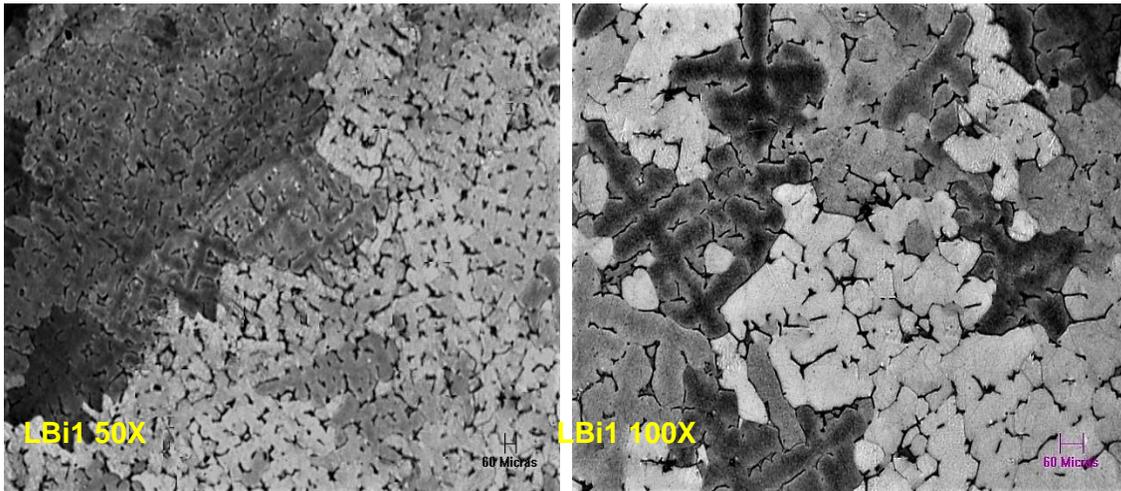
En las tablas a continuación son descritos los cálculos de carga efectuados para cada una de las aleaciones de latones al Bismuto:

LATONES AL BISMUTO (Cal. 1000g)						
Elemento (g)	LBi1	LBi2	LBi3	LBi4	LBi5	LBi6
Retorno Latón	978,90	966,83	965,79	963,71	962,14	956,94
Zn	16,14	16,14	16,14	16,14	16,14	16,14
Al	3,03	3,03	3,03	3,03	3,03	3,03
Bi	0,00	11,98	13,02	15,10	16,67	21,88
Pb	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sn	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02
Total	1000,09	1000,00	1000,00	1000,00	1000,00	1000,00

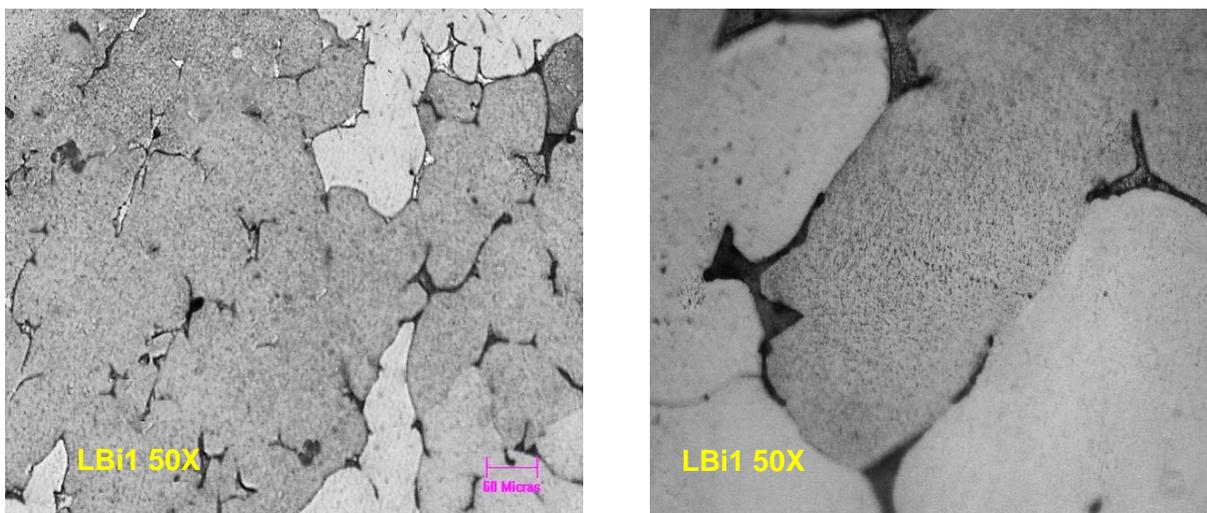
LATONES AL BISMUTO (Cal. 1000g)									
Elemento (g)	LBi7	LBi8	LBi9	LBi10	LBi11	LBi12	LBi13	LBi14	LBi15
Retorno Latón	952,77	949,64	947,56	943,39	927,50	931,56	918,83	913,38	904,29
Zn	16,14	16,14	16,14	16,14	16,14	28,49	28,49	28,49	28,49
Al	3,03	3,03	3,03	3,03	3,03	3,50	3,50	3,50	3,50
Bi	26,04	29,17	31,25	35,42	0,00	34,54	47,27	52,72	61,81
Pb	0,00	0,00	0,00	0,00	50,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sn	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02
Total	1000,00	1000,00	1000,00	1000,00	998,69	1.000,11	1.000,11	1.000,11	1.000,11

B Anexo: Metalografías latones al Bismuto.

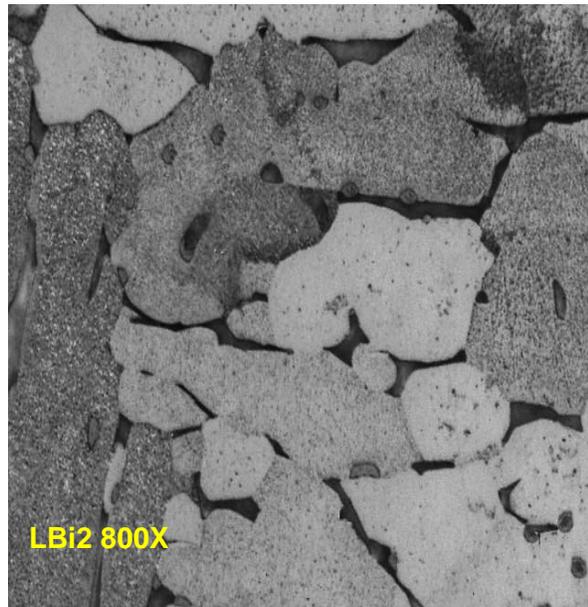
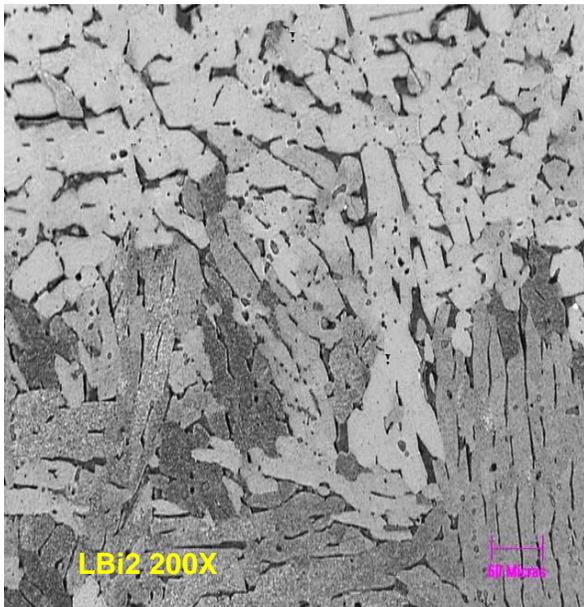
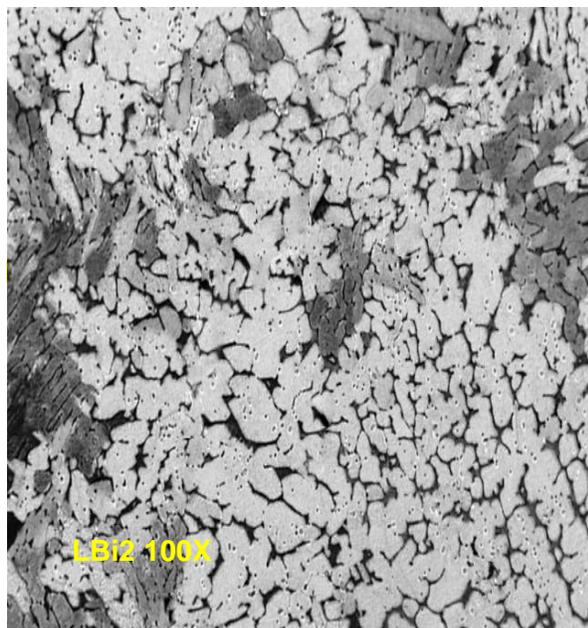
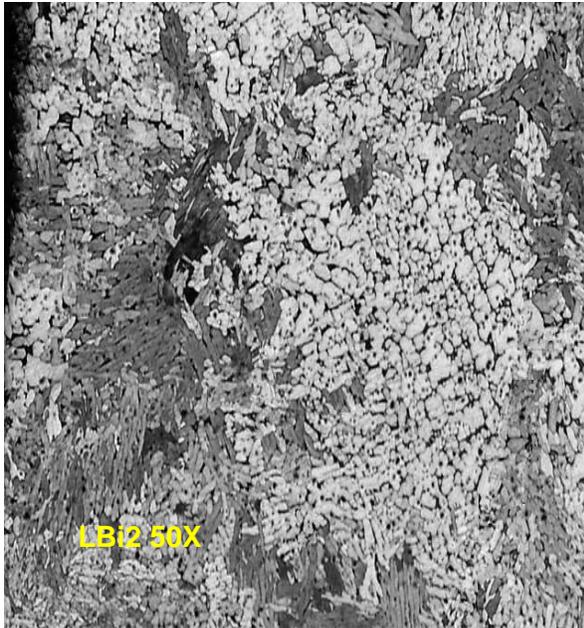
Son relacionadas a continuación las micrografías de las aleaciones de latón, en diferentes aumentos después del ataque químico.



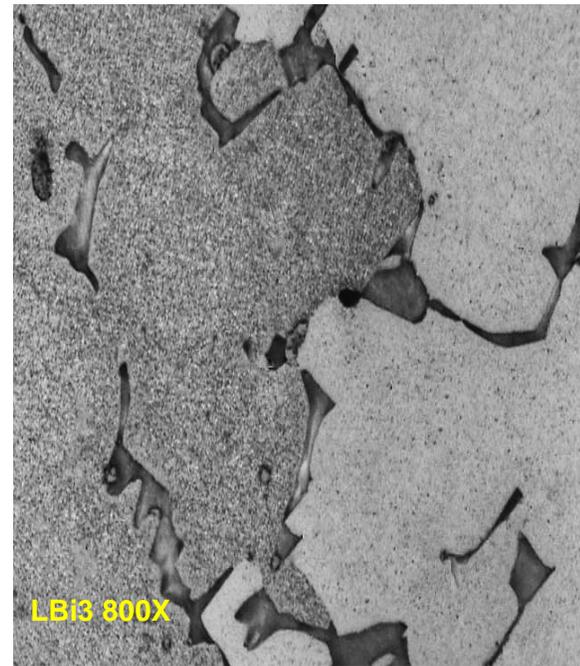
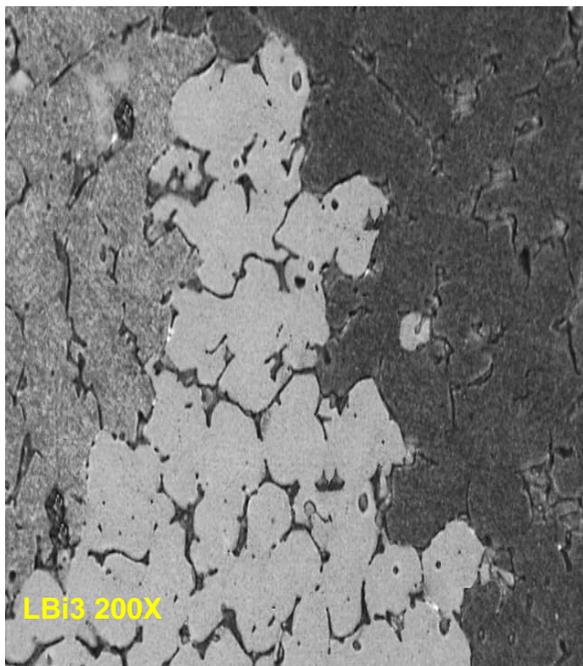
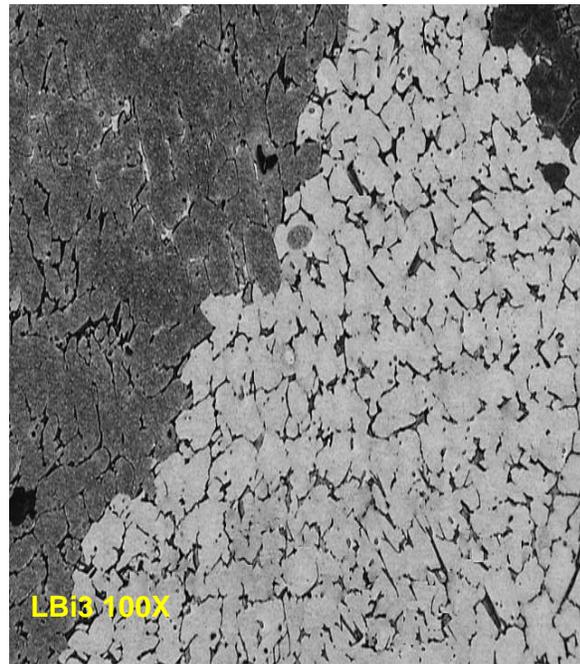
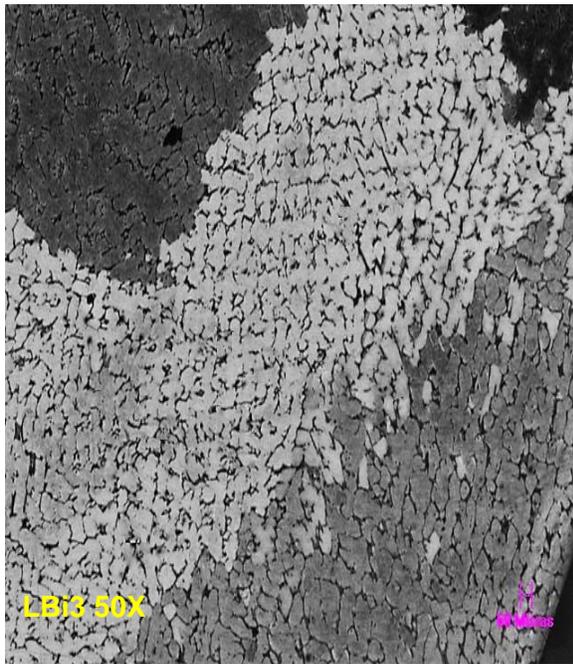
En las micrografías para el latón LBi 1 es posible identificar la formación de granos de tipo dendrítico, con predominio de fases de tipo Alfágeno.



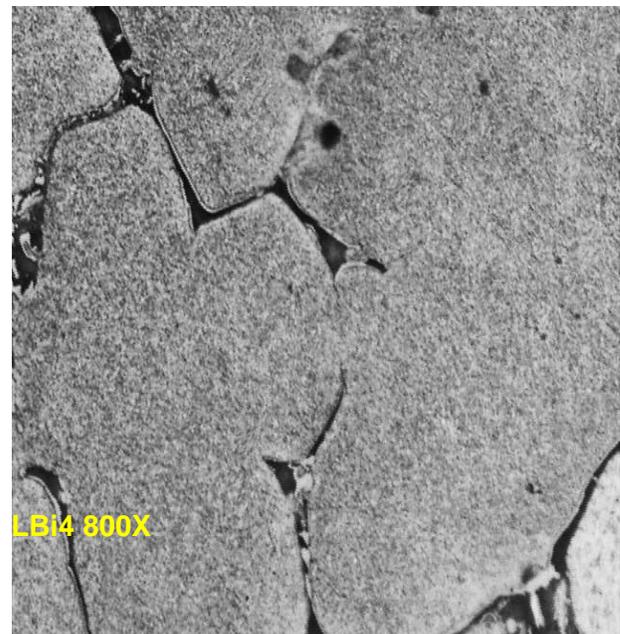
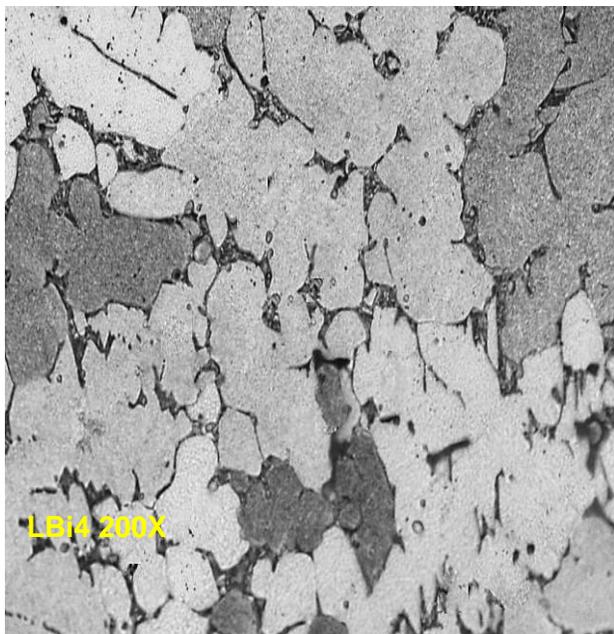
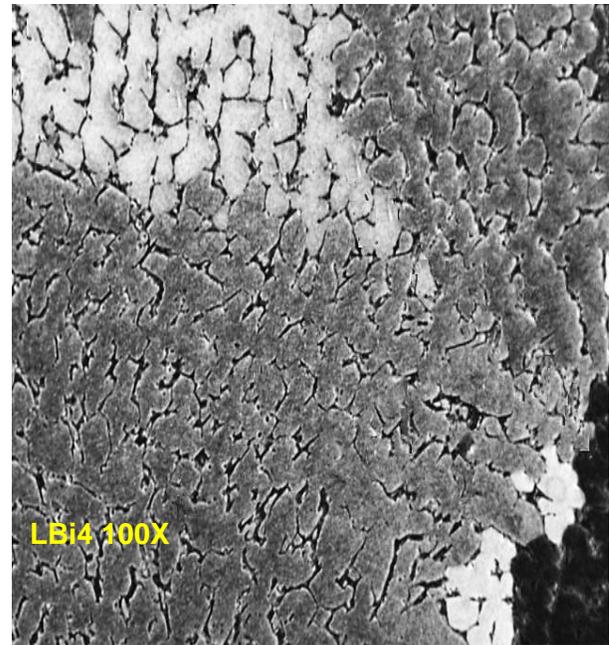
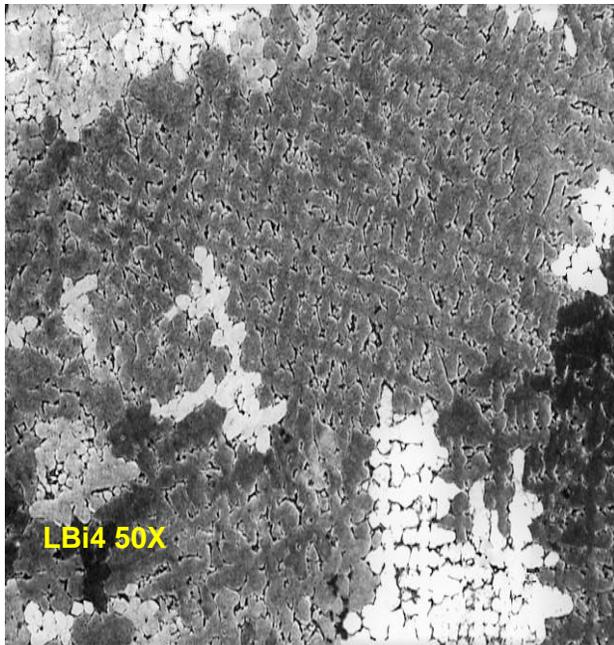
Para la muestra de latón LBi2, las micrográficas revelaron predominio de fase Alfa; con formación de granos equiaxiales; algunas partículas absorbidas en el grano.



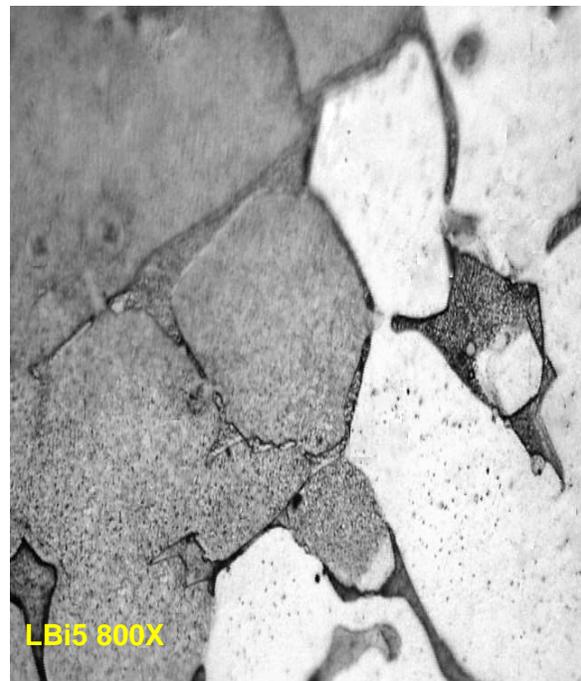
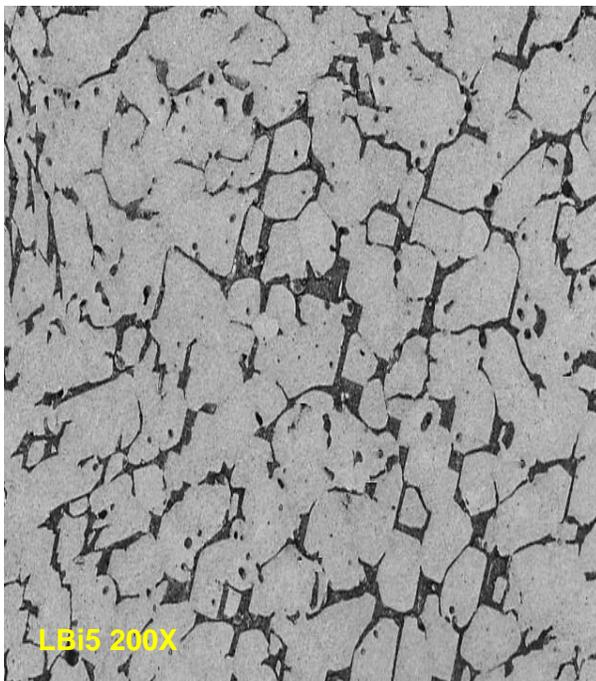
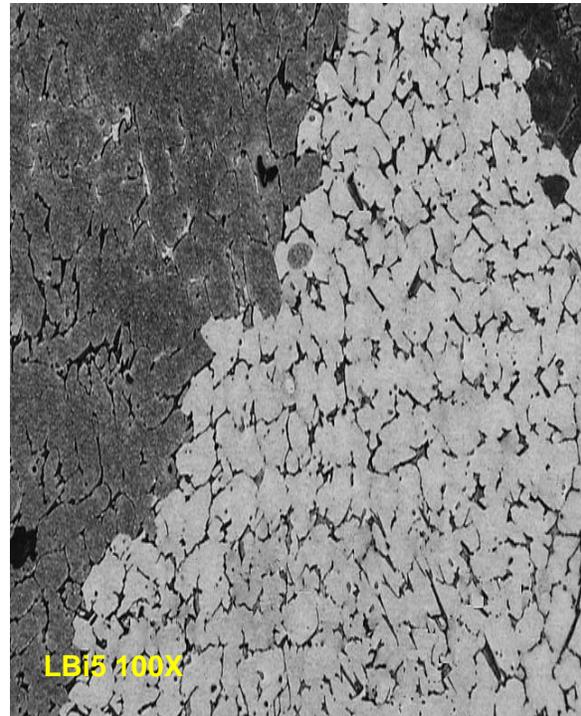
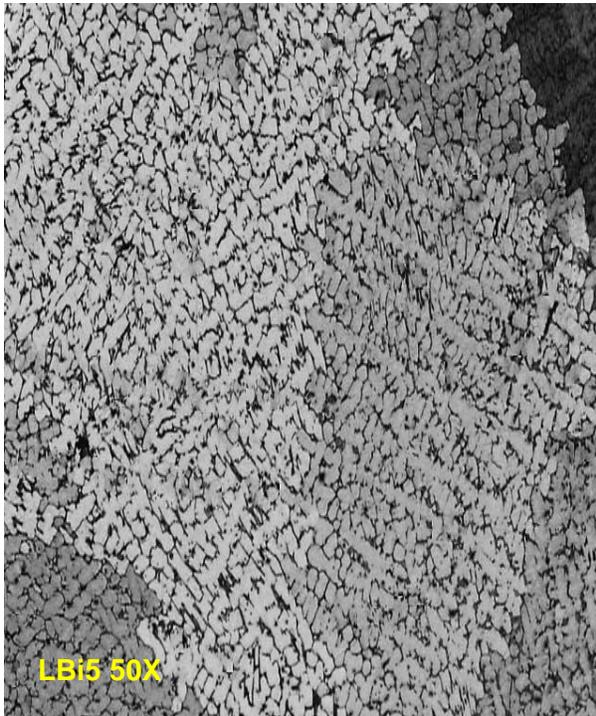
En las micrográficas de la muestra LBi3, hay formación de granos equiaxiales y en los límites de grano se observan algunas partículas insolubles de Bismuto.



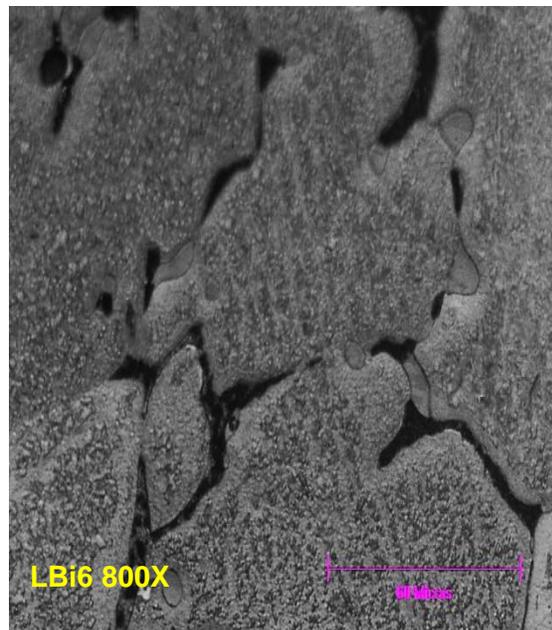
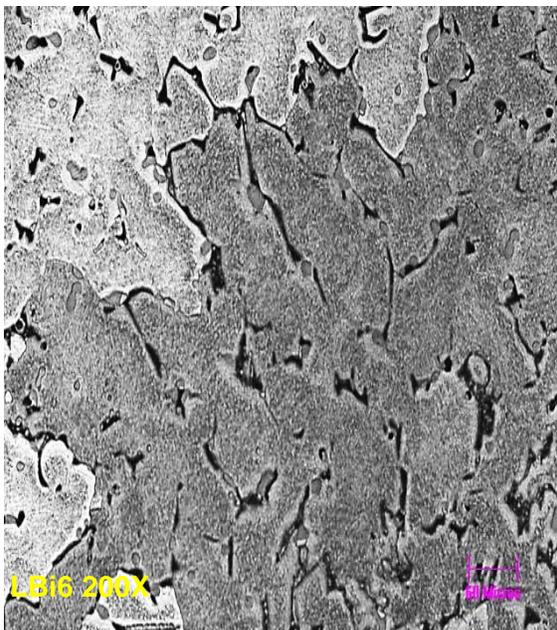
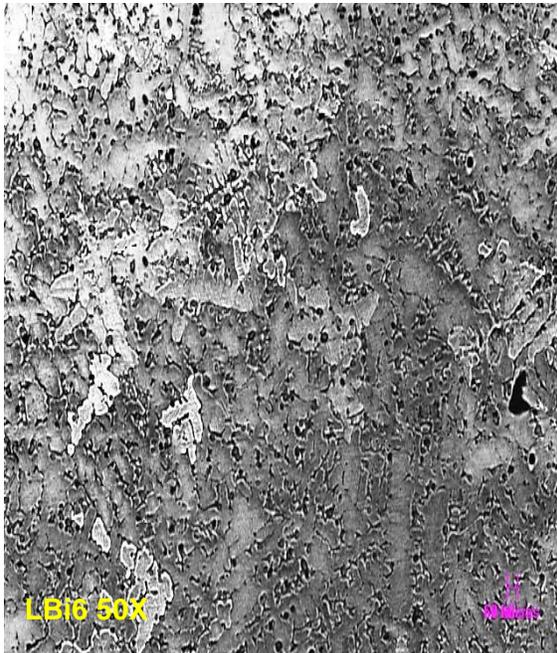
En las micrografías de latón LBi4, es notable la formación Alfégena, los precipitados de Bismuto se orientan hacia los límites de grano. Algunas partículas son absorbidas al interior de éstos.



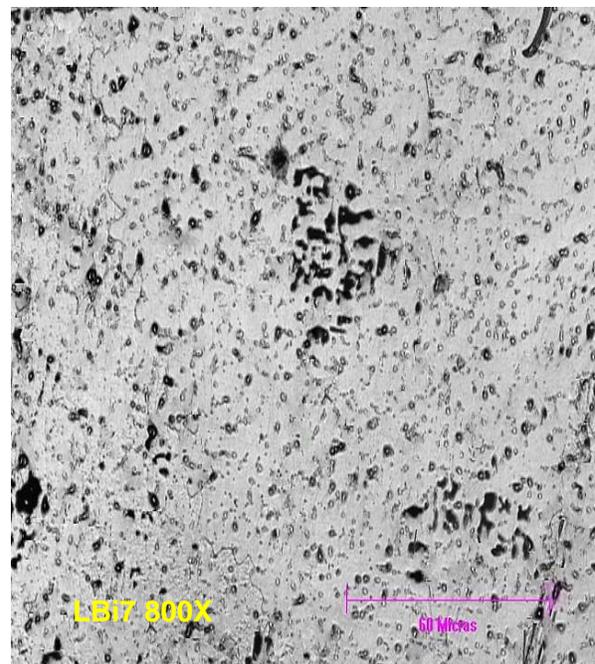
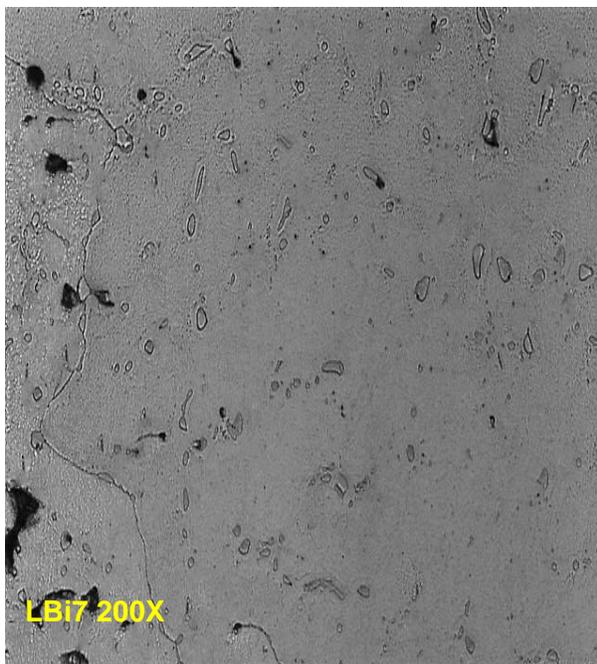
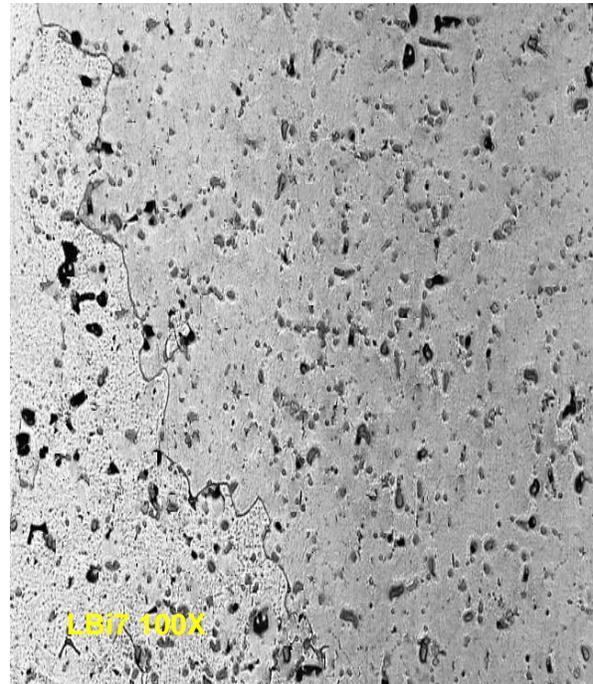
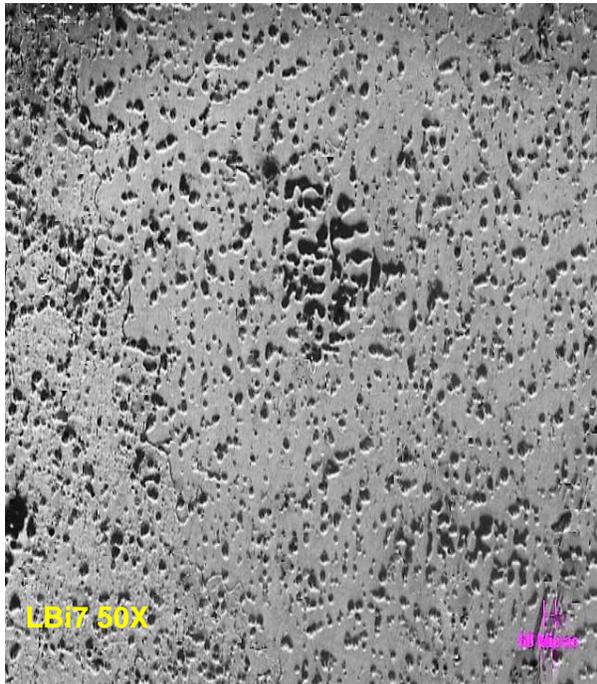
Muestra LBi5, formación de tipo Alfégeno con granos de tipo equiaxial. A 800X se observan algunas partículas del Bi en los límites de grano.



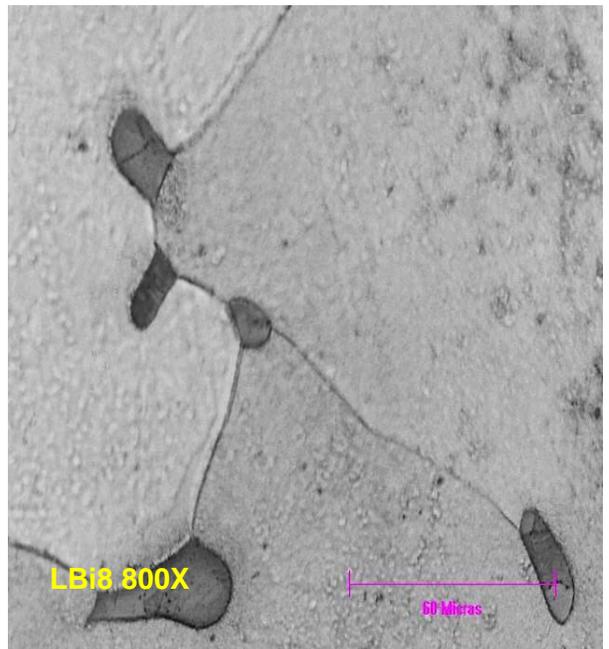
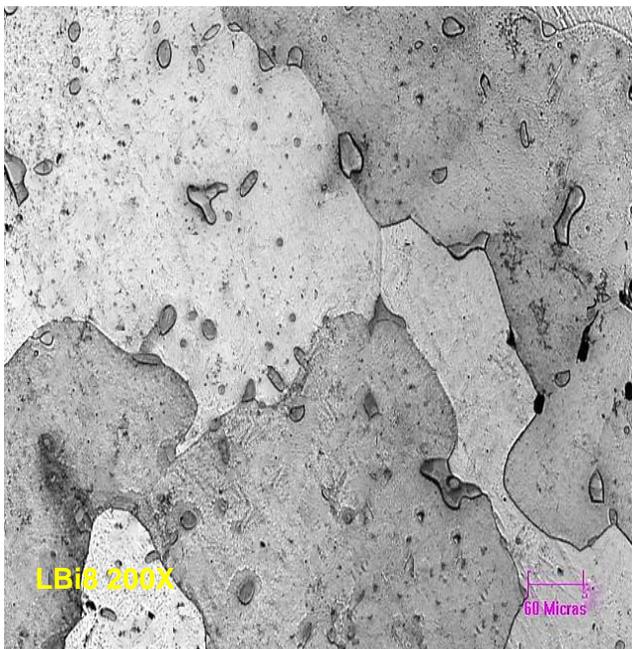
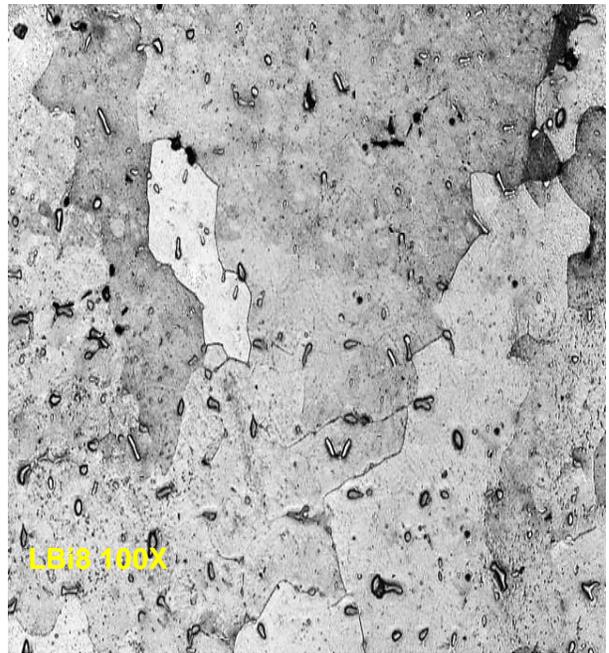
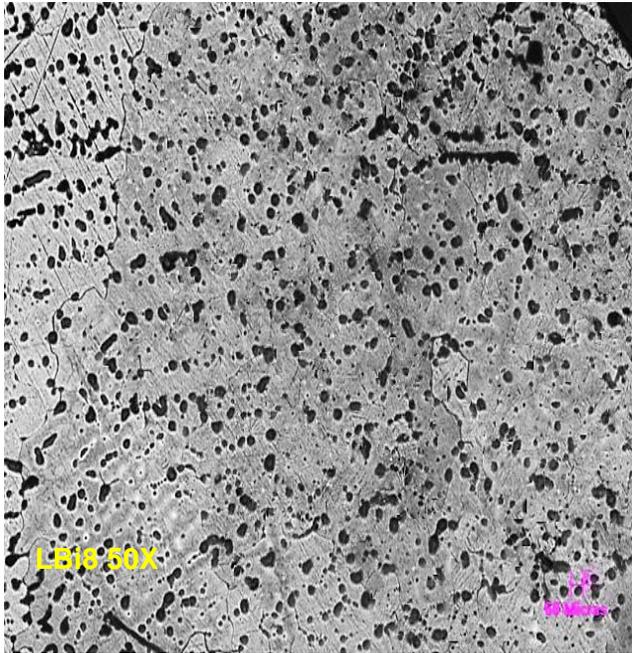
Muestra LBi6; formación de granos equiaxiales, predominio de fase Alfa. Presencia de algunos defectos al interior de los granos. Precipitados de Bi en los límites de grano.



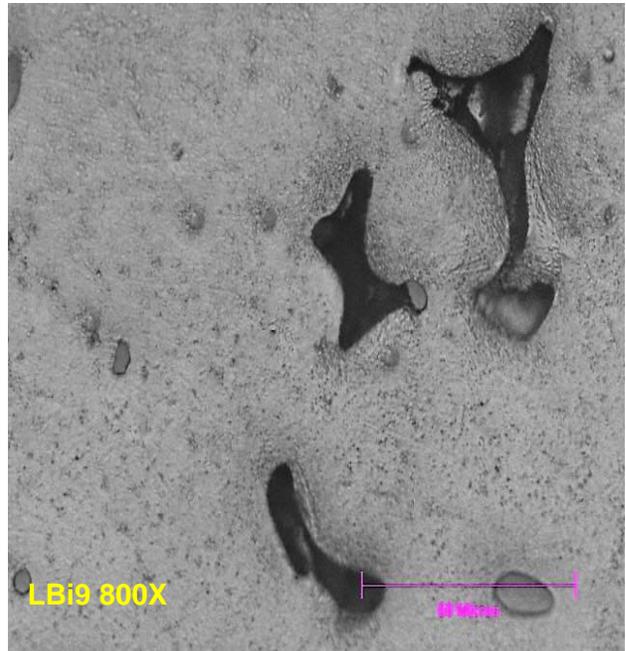
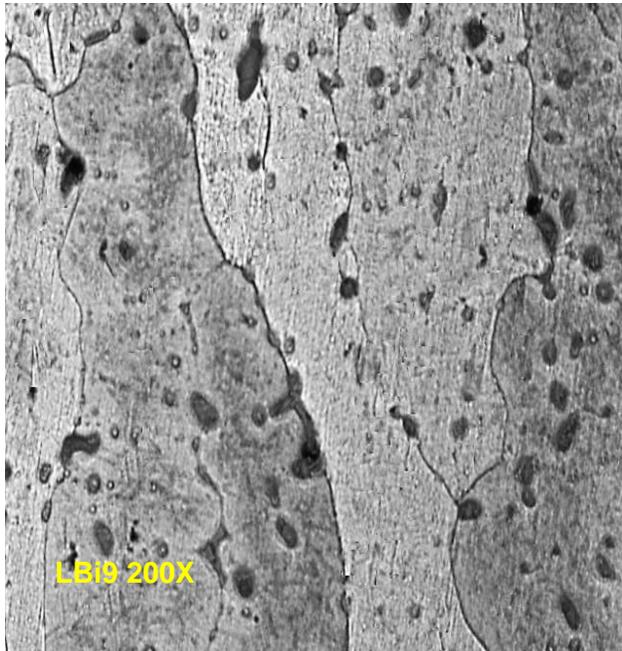
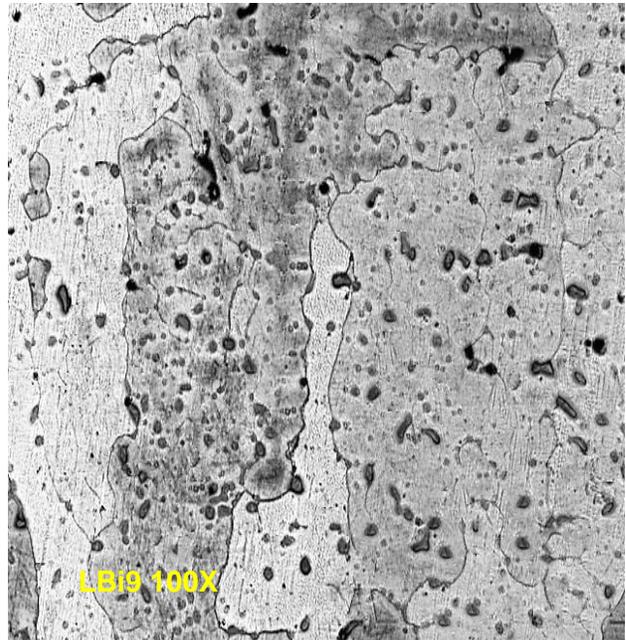
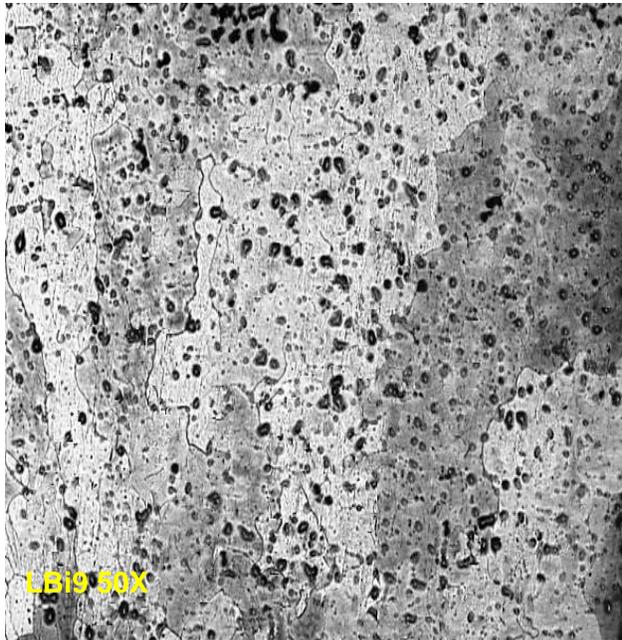
Muestra LBi7, predominio de fase Alfa en la matriz. Presencia de discontinuidades y algunos precipitados de Bi en los límites de grano.



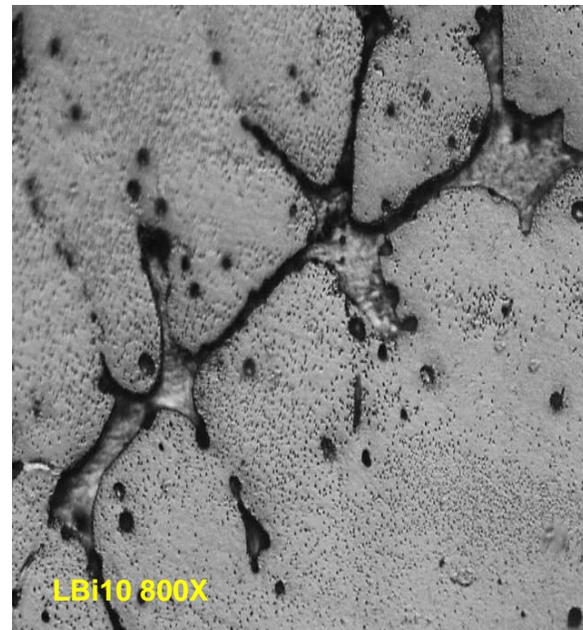
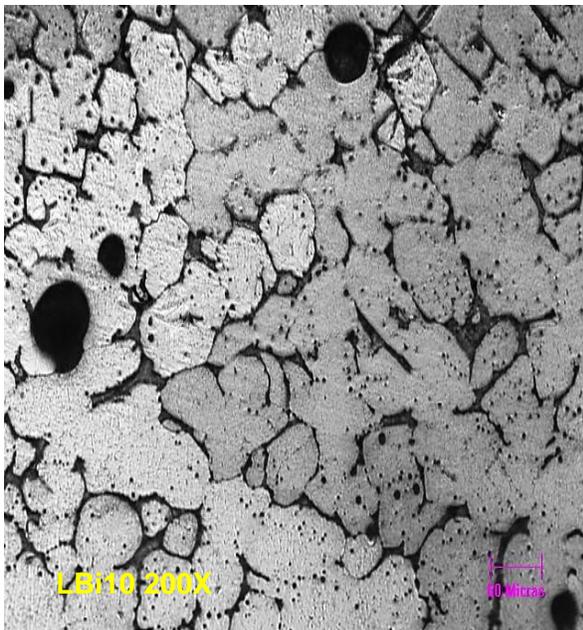
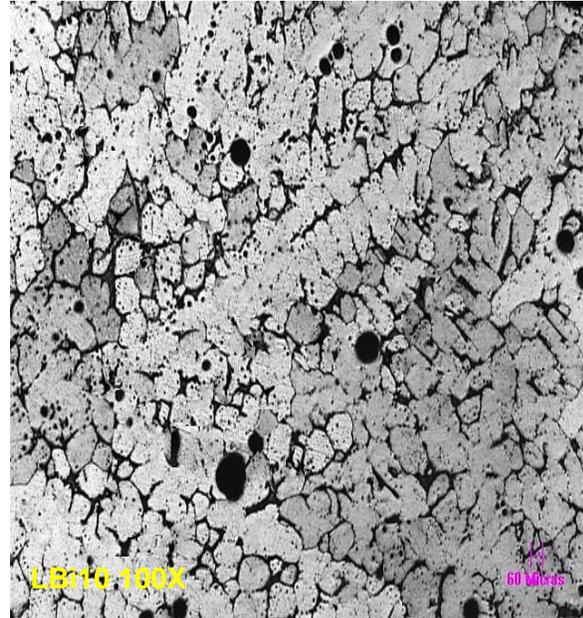
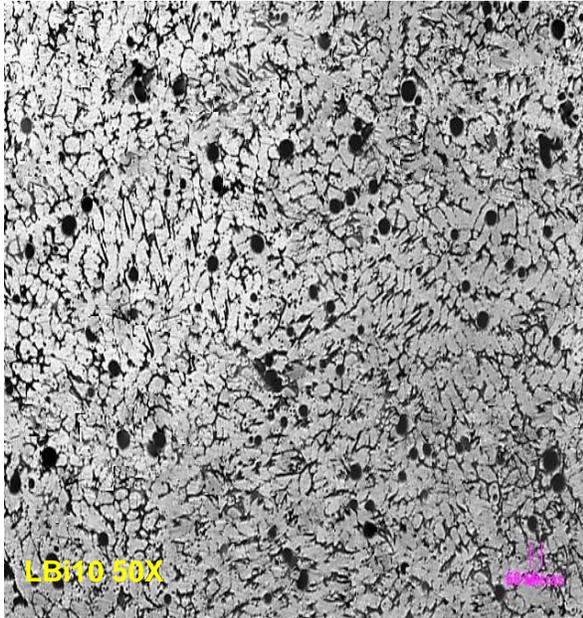
Muestra LBi8, formación de granos equiaxiales poliédricos. A 800X se observa precipitados de Bi en los límites de grano. Presencia de discontinuidades al interior de los granos.



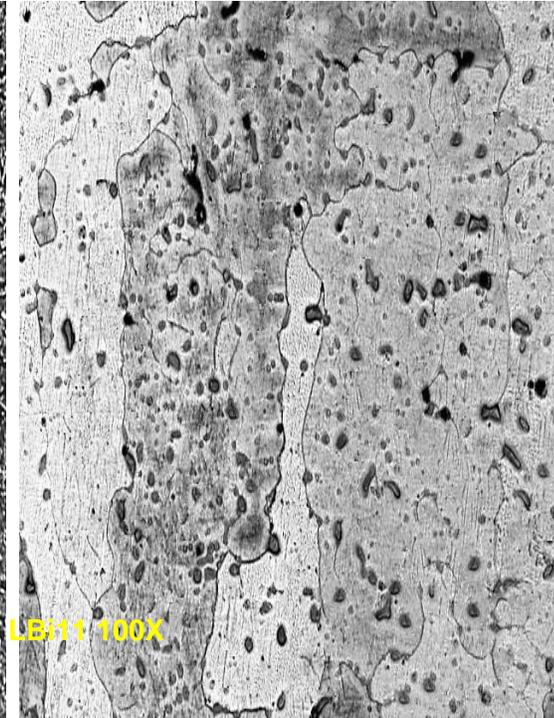
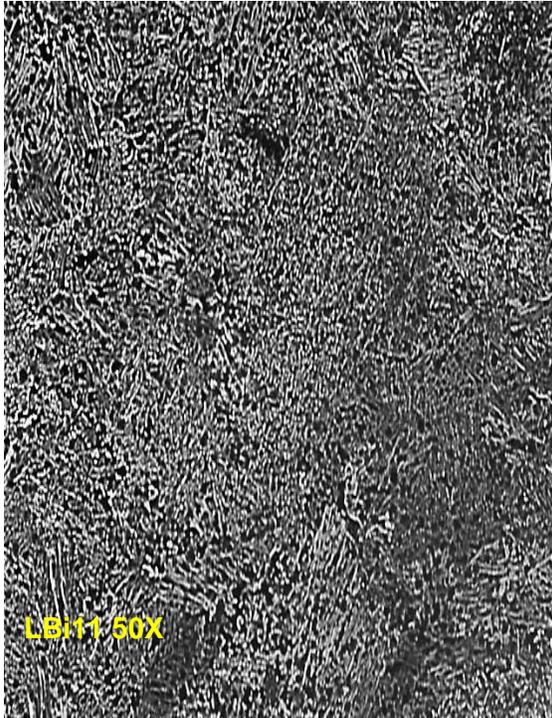
Muestra LBi9, predominio de fase tipo Alfágena. Formación de granos equiaxiales poliédricos alargados, con presencia de Bi como partícula insoluble en los bordes de grano. Presencia de defectos al interior de los granos.



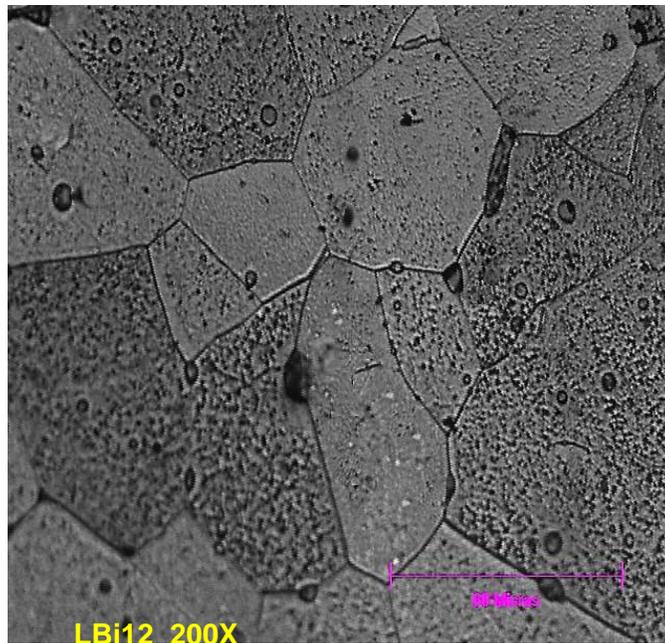
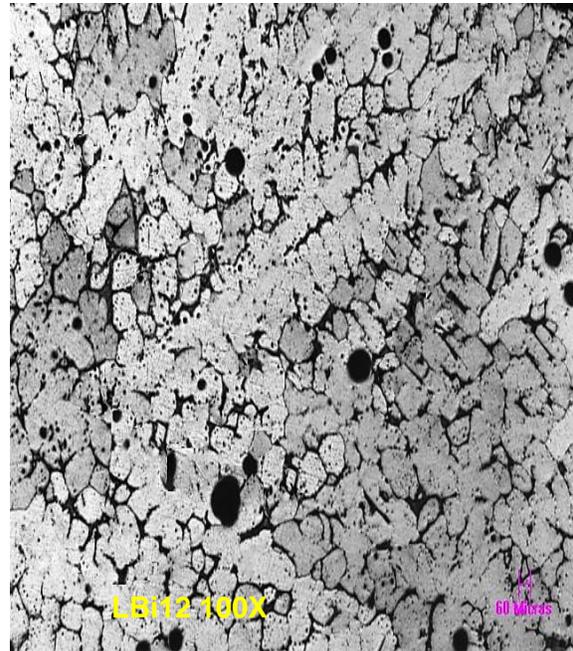
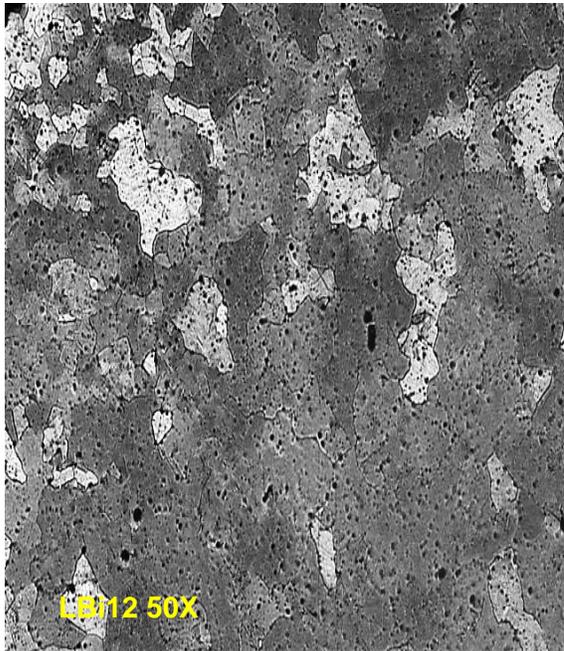
Muestra LBi10, formación de fases de tipo bifásico (Alfa y Beta). Granos de tipo equiaxial, con presencia de precipitados de Bismuto en los límites de grano, a 800X se observa aglomeración de los precipitados en el borde de los granos.



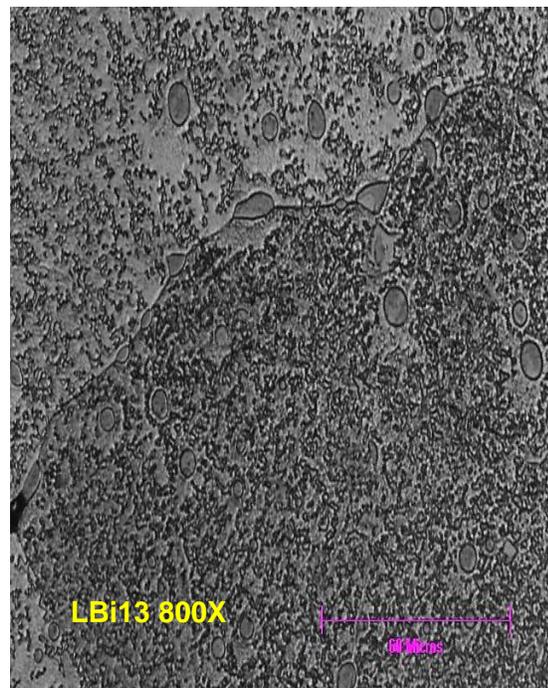
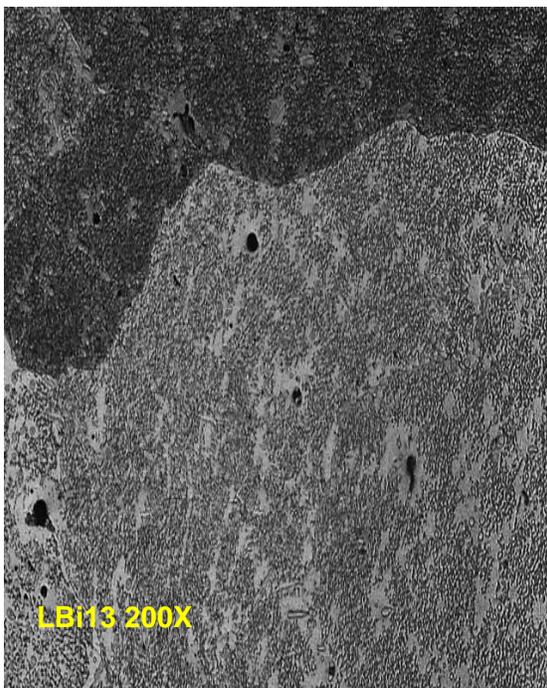
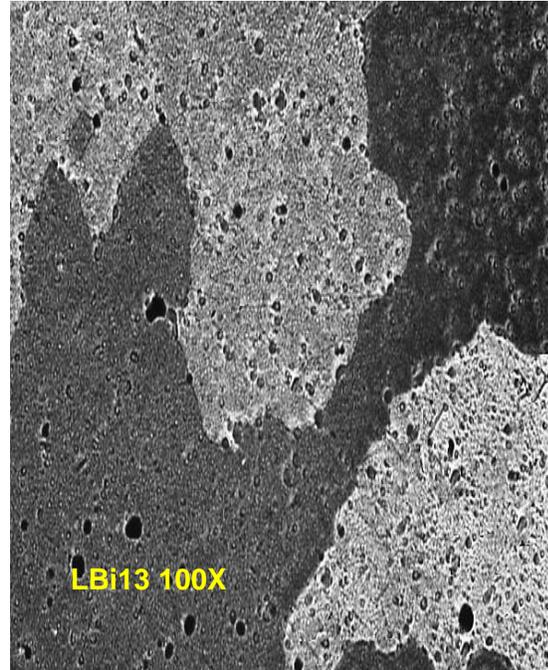
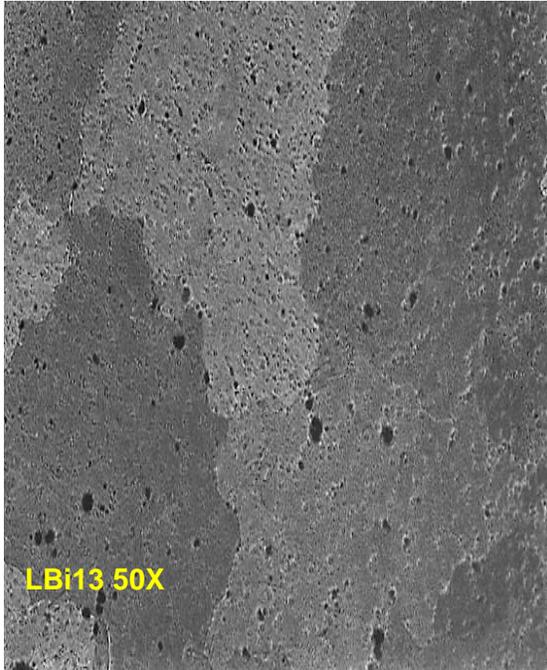
Muestra LBi11, aleación de latón con Plomo. Formación de estructura de tipo Widmanstätten, granos columnares alargados orientados. Latón de tipo de bifásico, precipitados insolubles de Plomo en los bordes de grano.



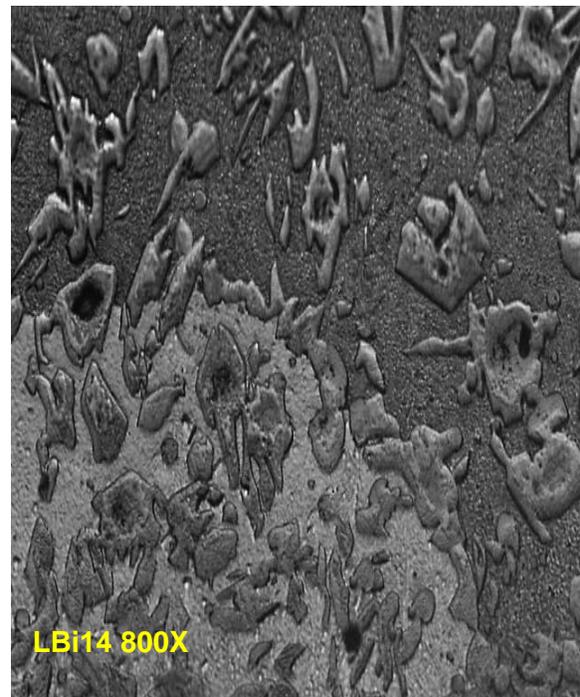
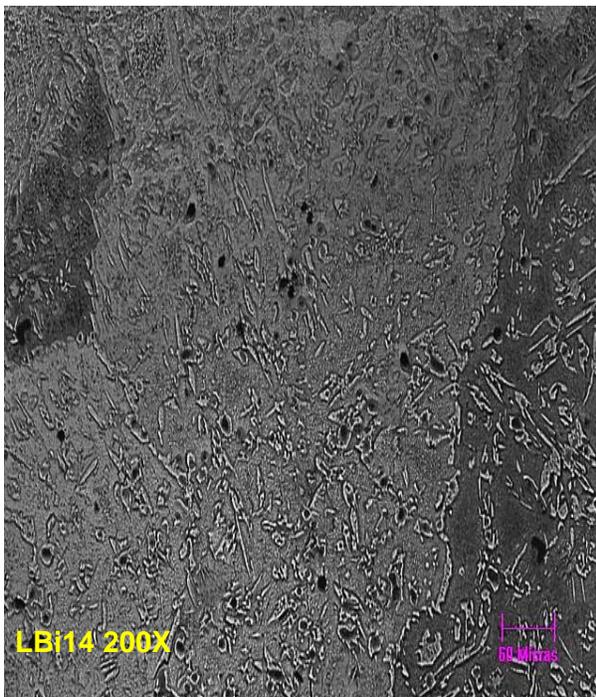
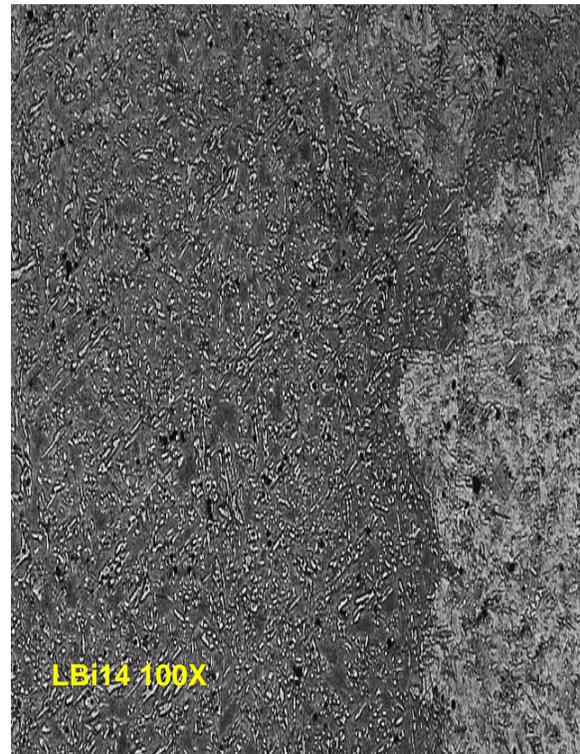
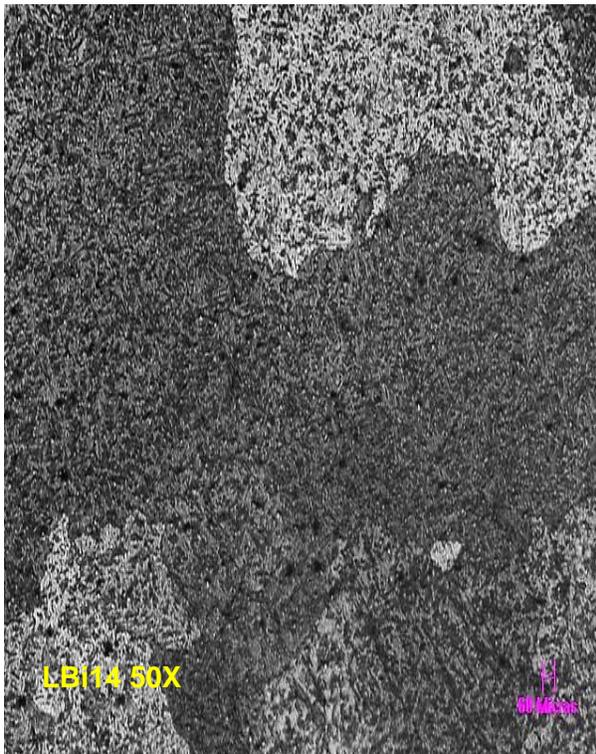
Muestra LBi12, latón de tipo bifásico. Con formación de granos equiaxiales poliédricos. Los precipitados de Bismuto se orientan hacia los bordes de grano como se observa a 800X.



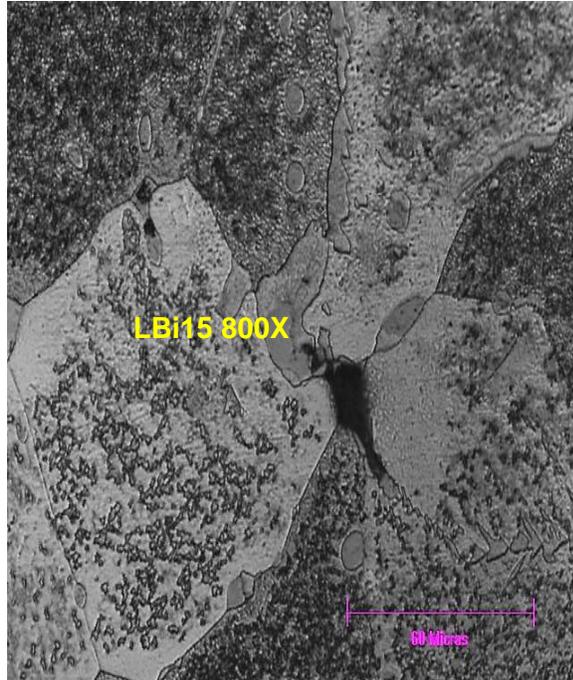
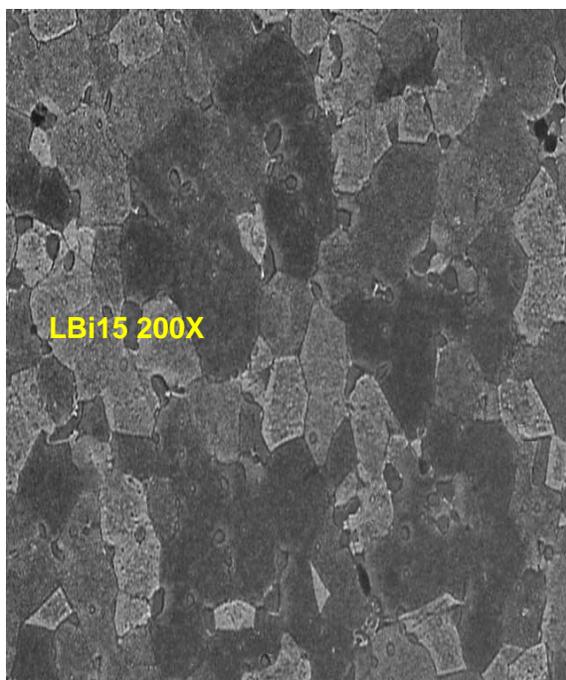
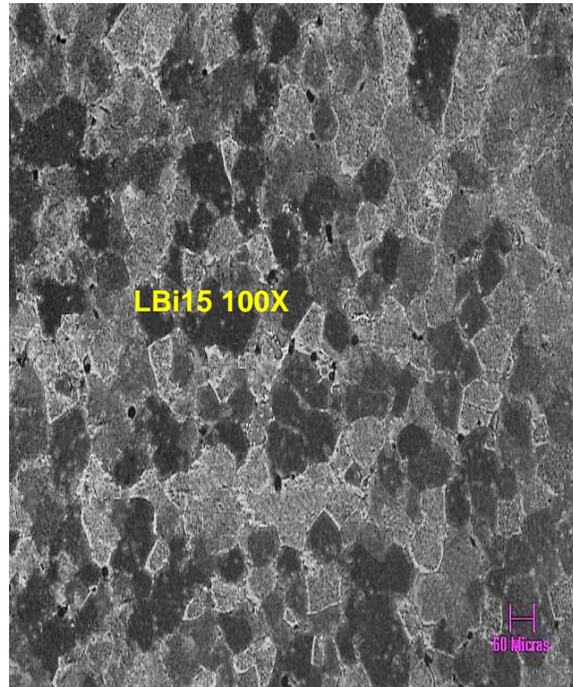
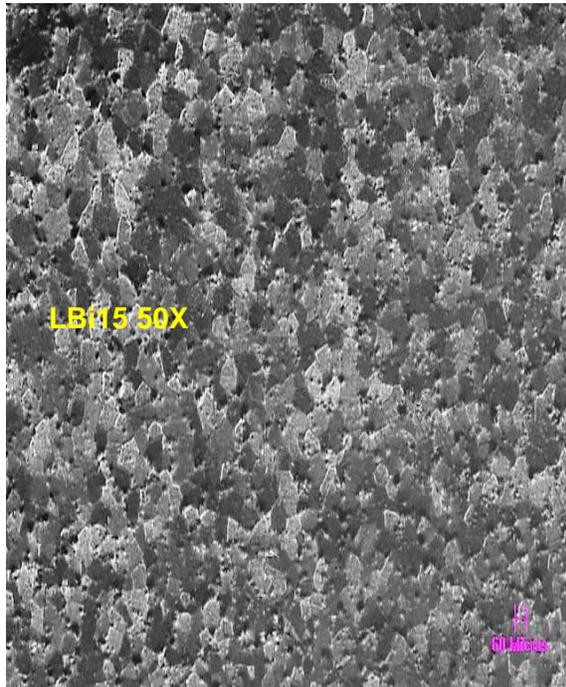
Muestra LBi13, formación de tipo bifásico. Granos equiaxiales de gran tamaño con precipitaciones de Bi en los límites de grano. Partículas absorbidas al interior de los granos.



Muestra LBi14, latón con formación de tipo bifásico y granos equiaxiales. Presencia de una gran densidad de Bismuto en los bordes de grano.

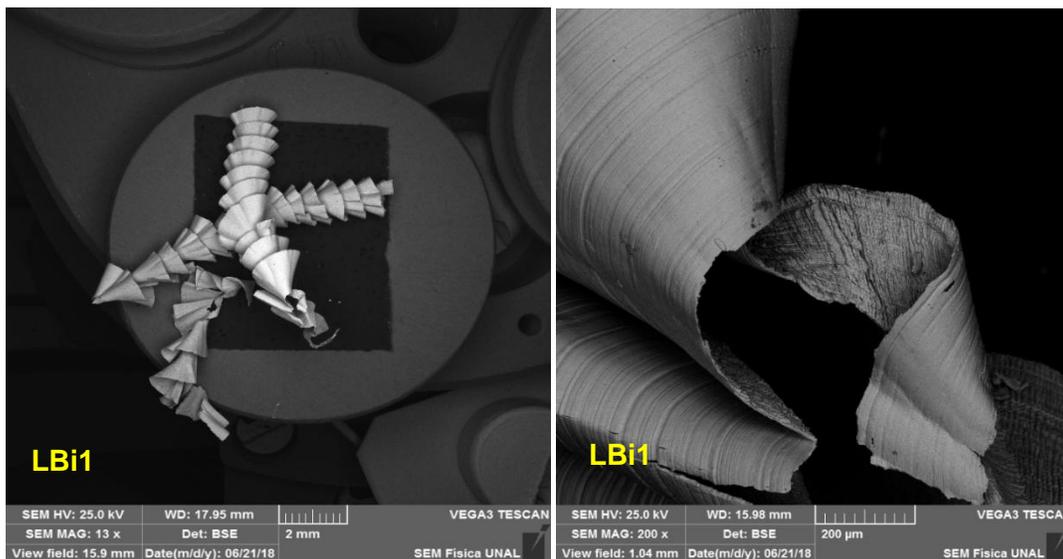


Muestra LBi15, formación de granos equiaxiales poliédricos. Latón de tipo bifásico, con presencia de precipitados de Bismuto en los límites de grano.



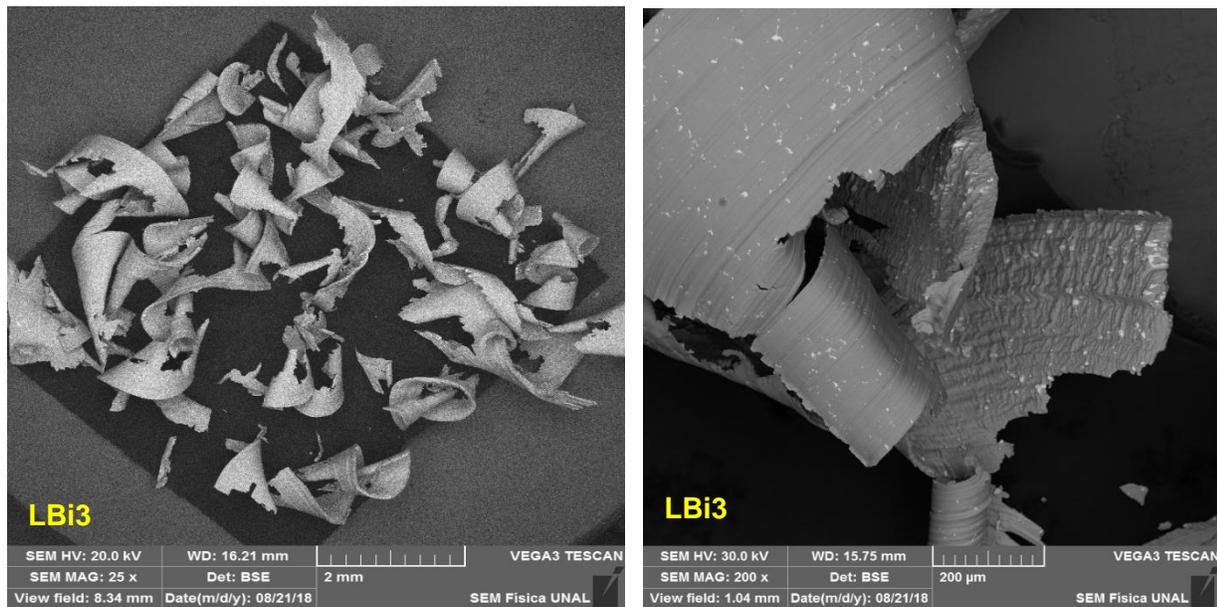
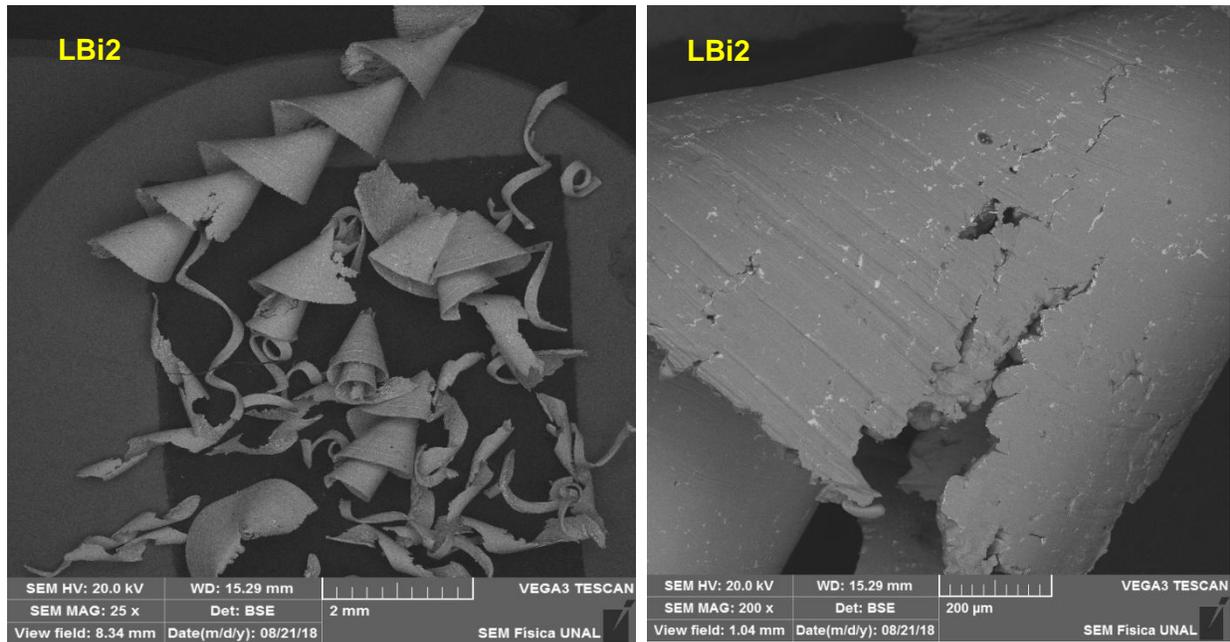
C Anexo: Micrografías SEM- virutas

En el presente Anexo, se relacionan las observaciones microscópicas SEM de las virutas de los latones al Bismuto y de las muestras que no contienen el elemento. Fueron efectuadas con detección BSE en magnificaciones de 25X y 200X.



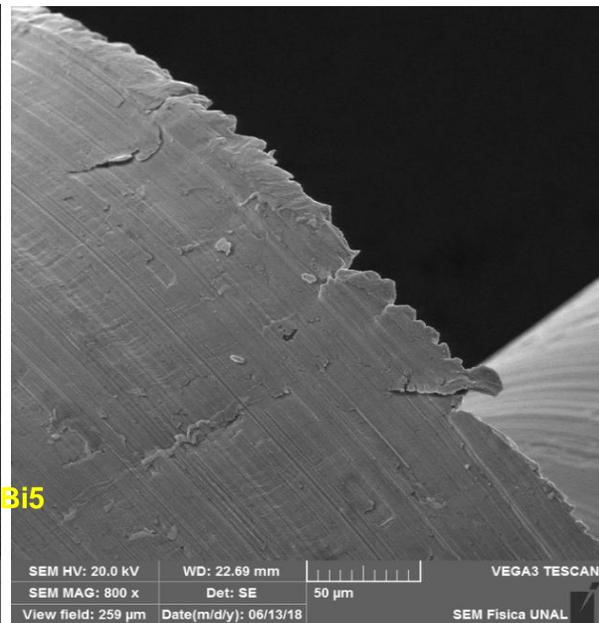
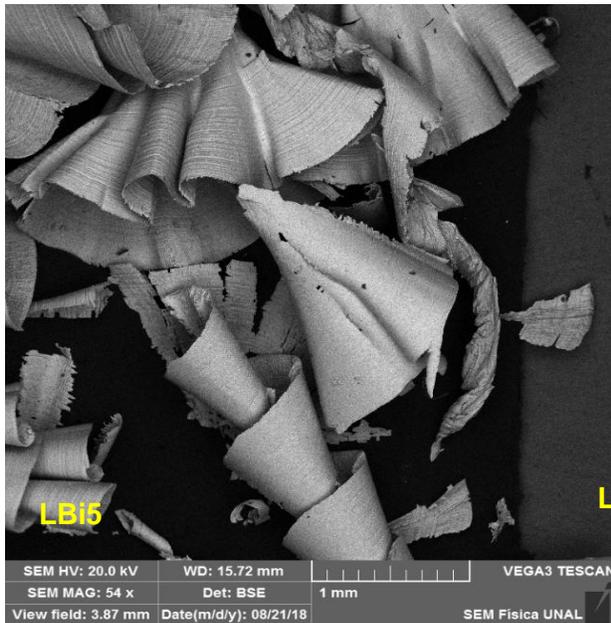
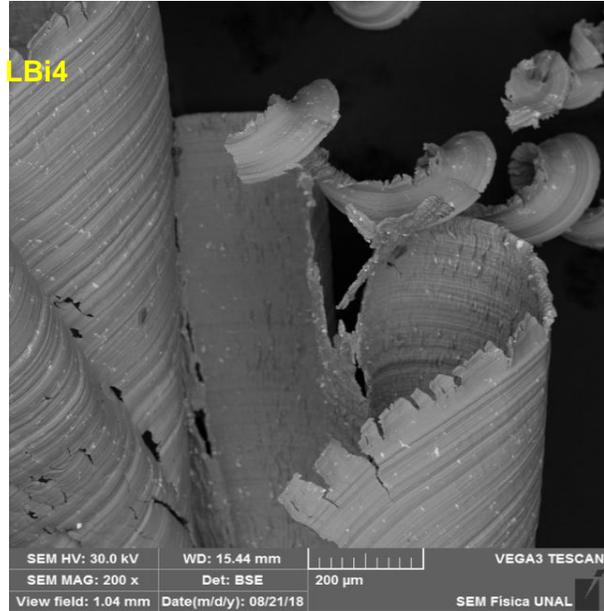
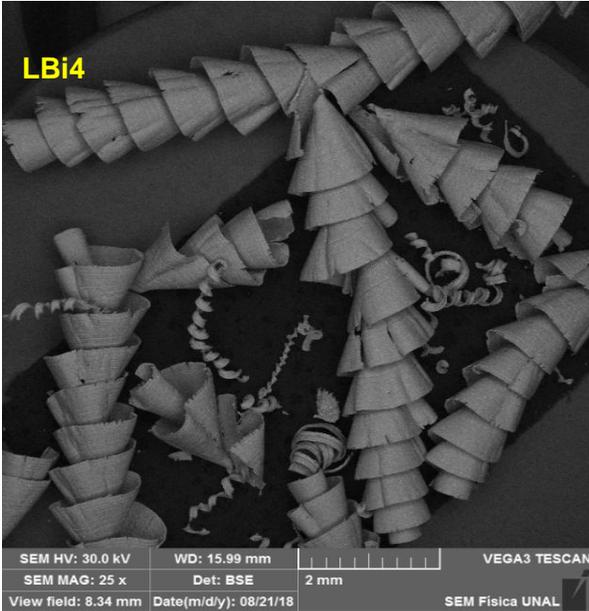
En la micrografía de la muestra LBi1, es posible observar la formación de virutas cónico helicoidal alargada, a 200X se evidencia las bandas de deslizamiento cóncava y convexa, formadas por la herramienta de corte y el material; no se observa Bi.

Muestra LBi 2, formación de virutas cónico helicoidales largas y virutas tipo arco. A 200X se observan algunos vestigios de Bismuto de color blanco brillante, en la cara cóncava

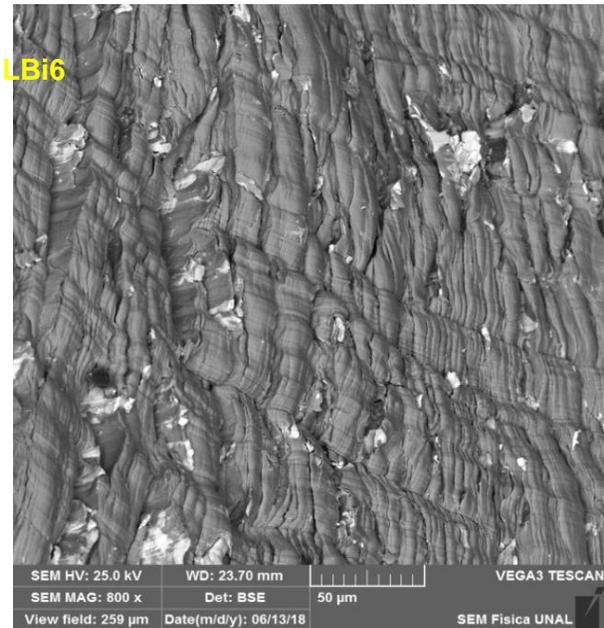
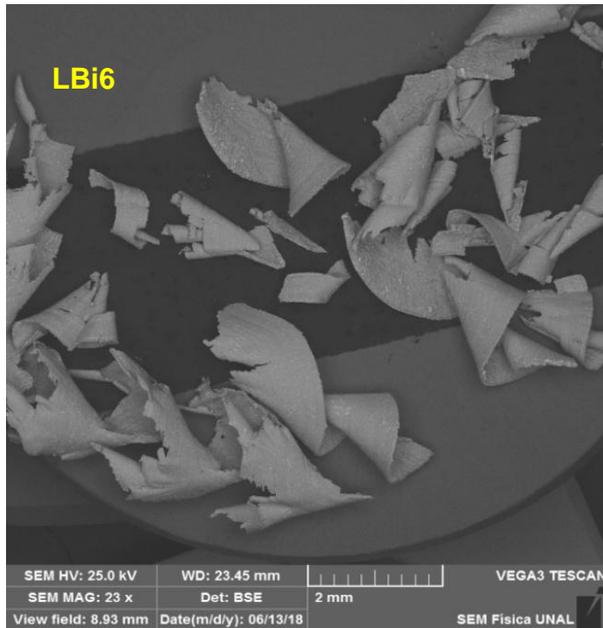


Muestra LBi 3, formación de virutas cónico helicoidales largas y virutas tipo arco. A 200X se observan algunos vestigios de Bismuto de color blanco brillante, en la cara cóncava.

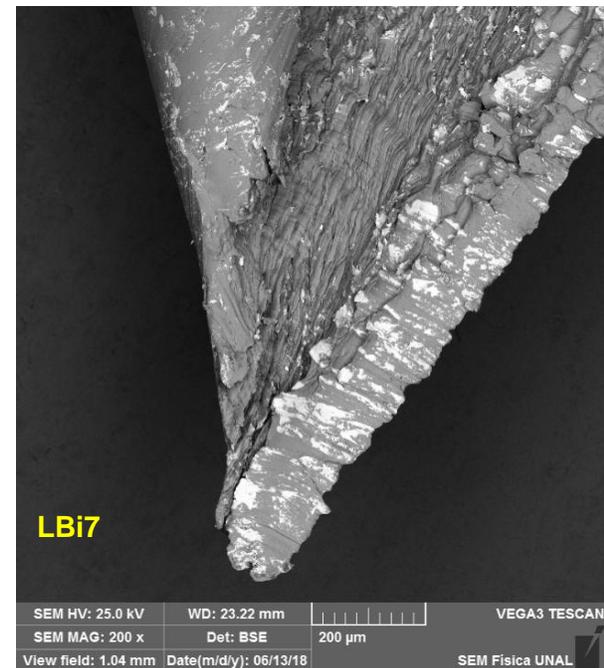
Muestras LBi4 y LBi5, formación de virutas de tipo cónico helicoidal largas, a 800X es posible observar la banda de deslizamiento en la cara convexa de la viruta con una leve presencia partículas de Bi de color blanco.



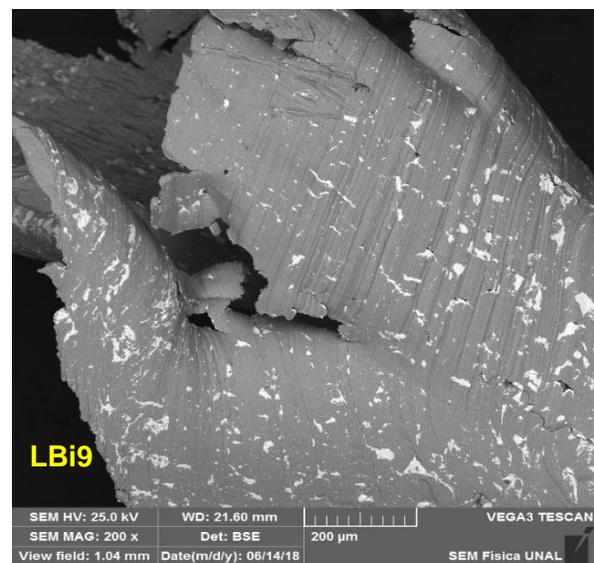
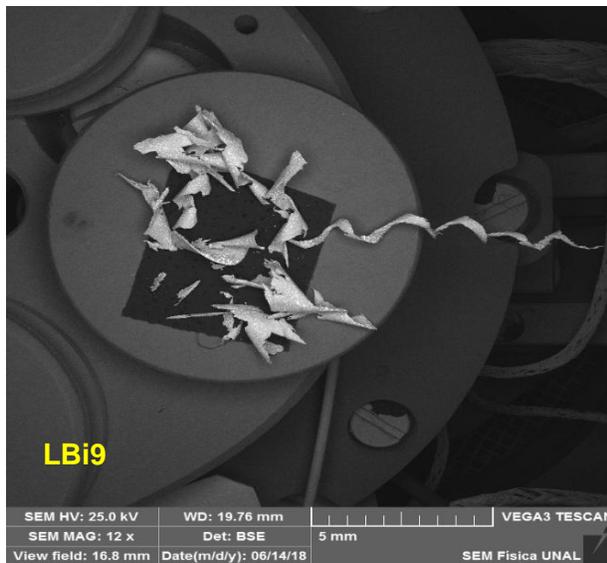
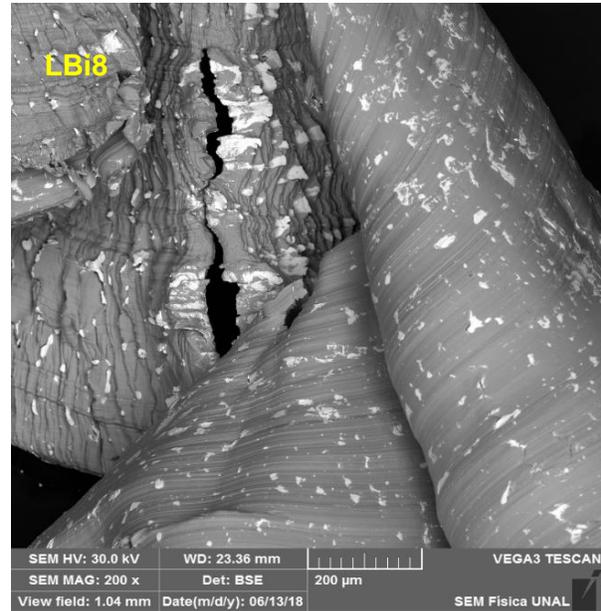
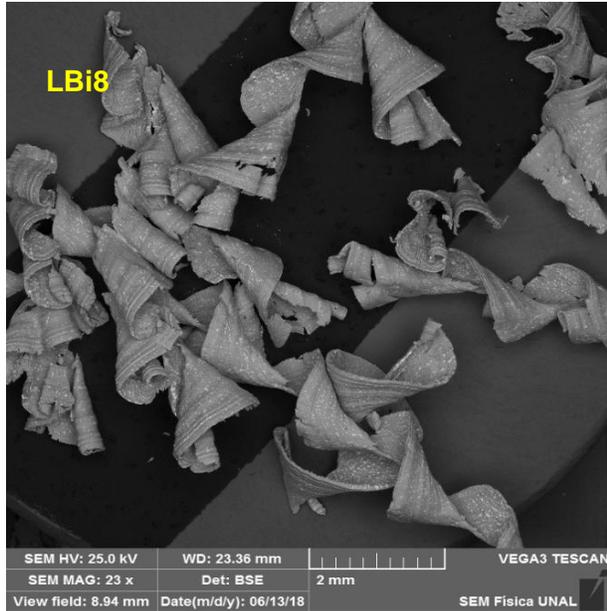
Muestra LBi 6, formación de virutas de tipo arco, en 800X se observa presencia de Bismuto en la matriz (cara convexa).



Muestra LBi7, virutas cónicas helicoidales cortas, aglomeración precipitados de Bi en grieta.

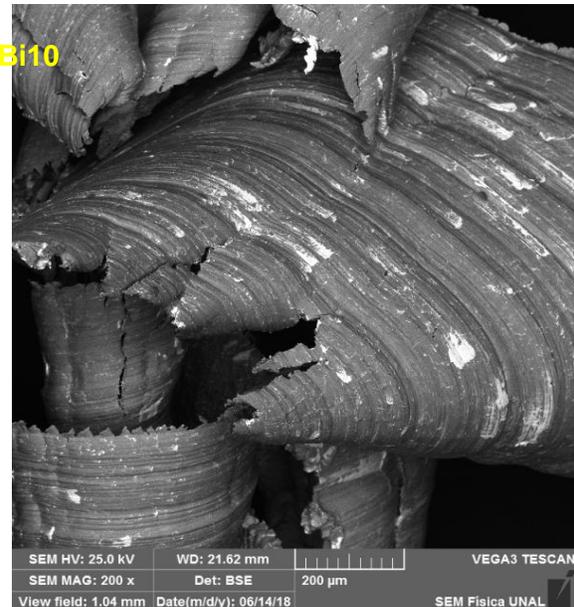
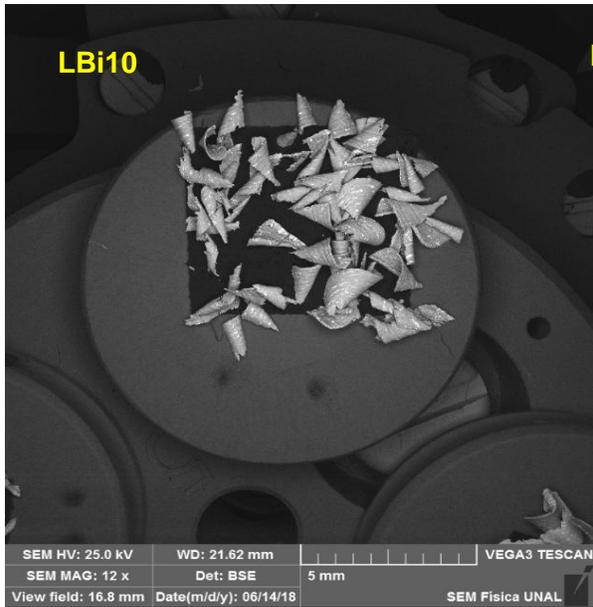


Muestra LBi8, virutas cónicas helicoidales cortas, aglomeración precipitados de Bi en grieta, formación de banda de deslizamiento en cara convexa.

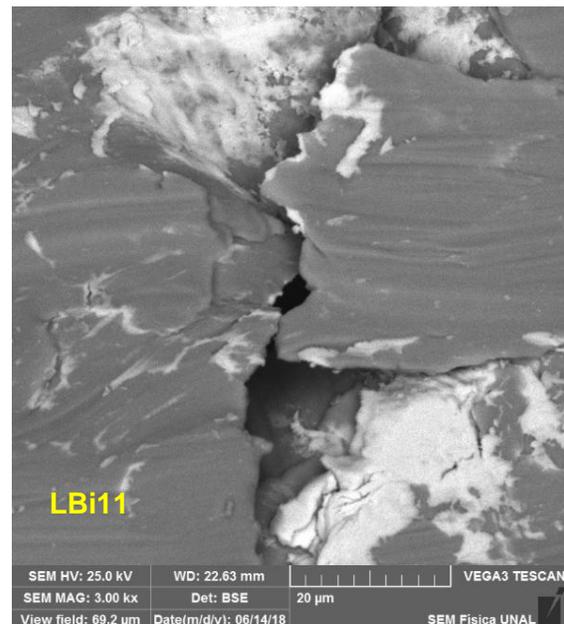


Muestra LBi 9, formación de viruta tipo arco, a 800X se observa la distribución del Bismuto en toda la matriz, el elemento genera un efecto “lubricante” frente a la herramienta de corte en la cara cóncava que está en contacto con la herramienta.

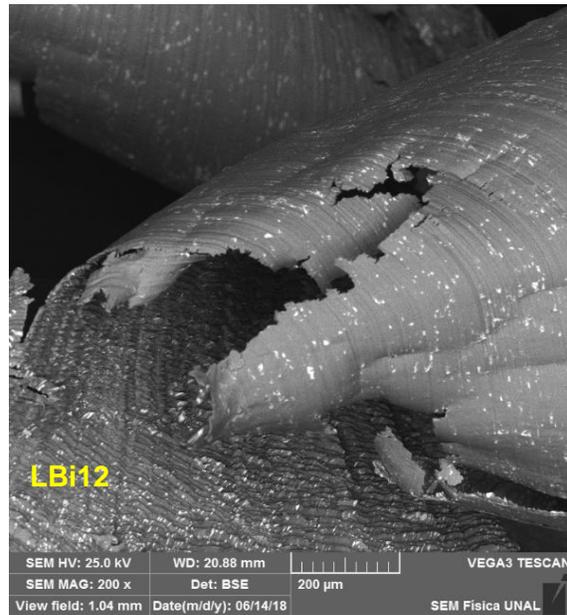
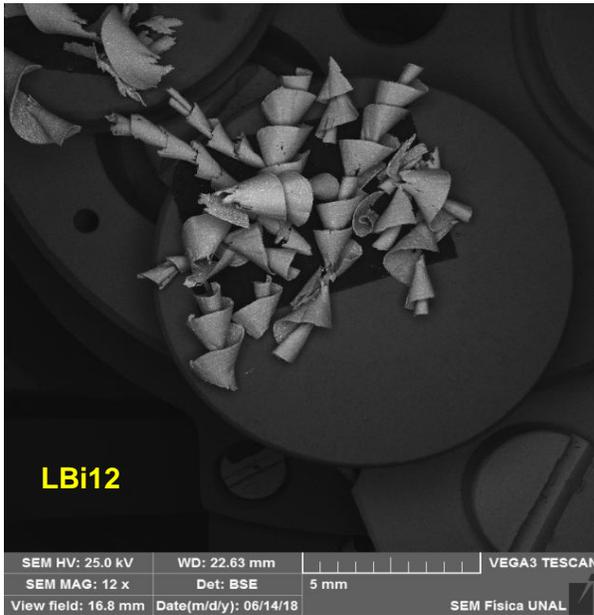
Muestra LBi10, formación de virutas tipo arco. A 800X se observa banda de deslizamiento con presencia de Bismutos dispersos y deformados por la acción cortante.



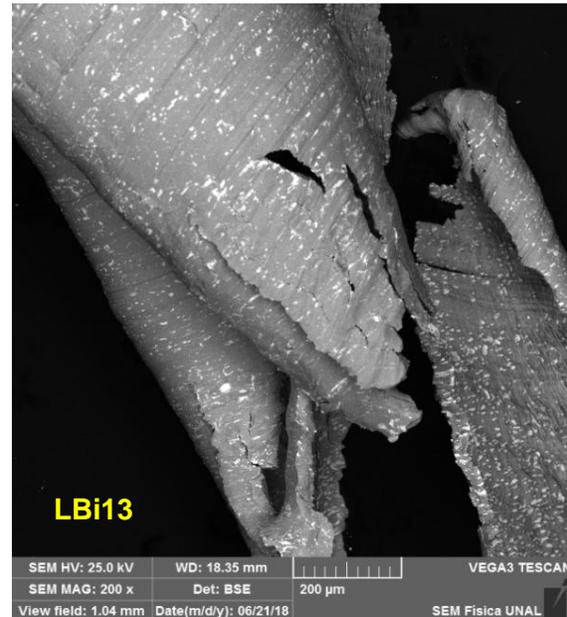
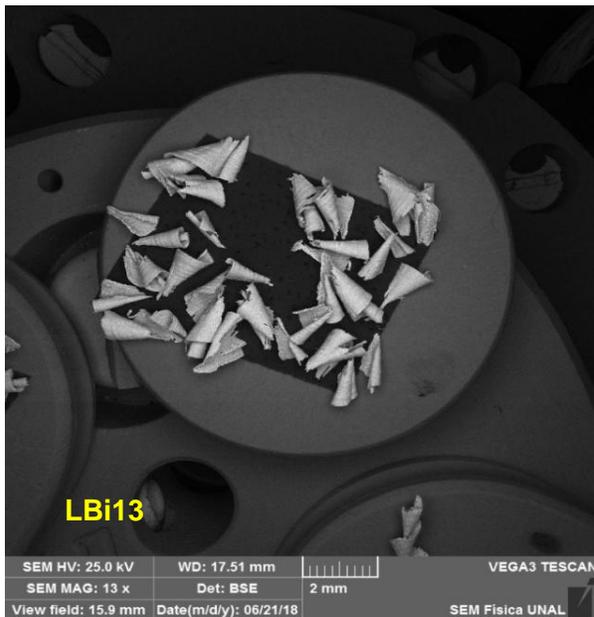
Muestra LBi11, formación de virutas tipo arco y cónico helicoidal corta. A 800X se observa banda de deslizamiento con presencia de Plomos en las grietas; favoreciendo el crecimiento de éstas.



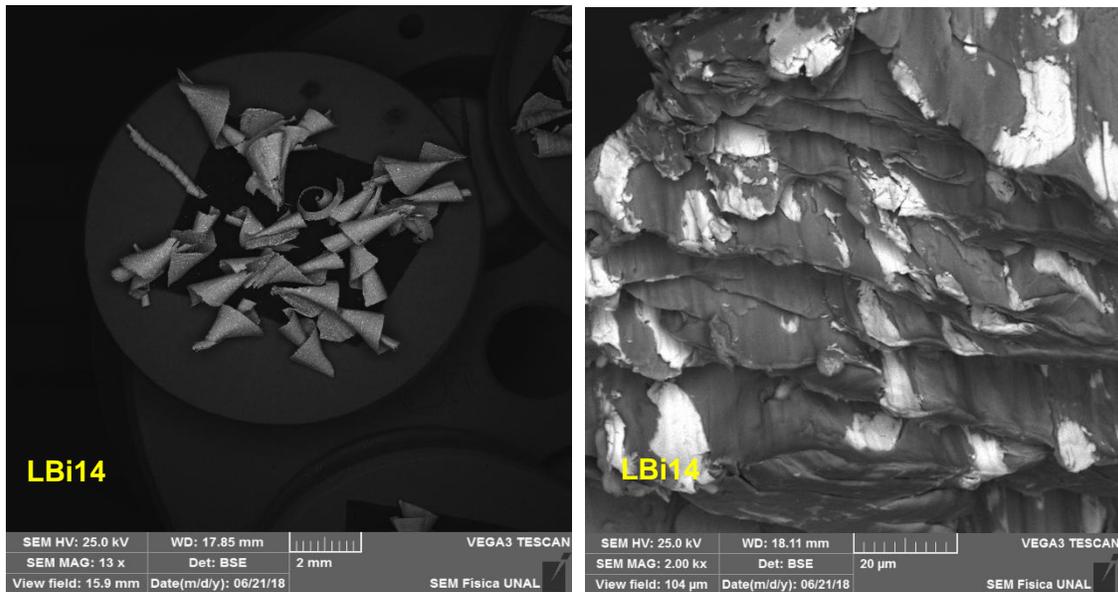
Muestra LBi12, formación de virutas tipo cónico helicoidal cortas. A 800X se observa banda de deslizamiento con presencia de Bismutos dispersos y deformados por la acción cortante



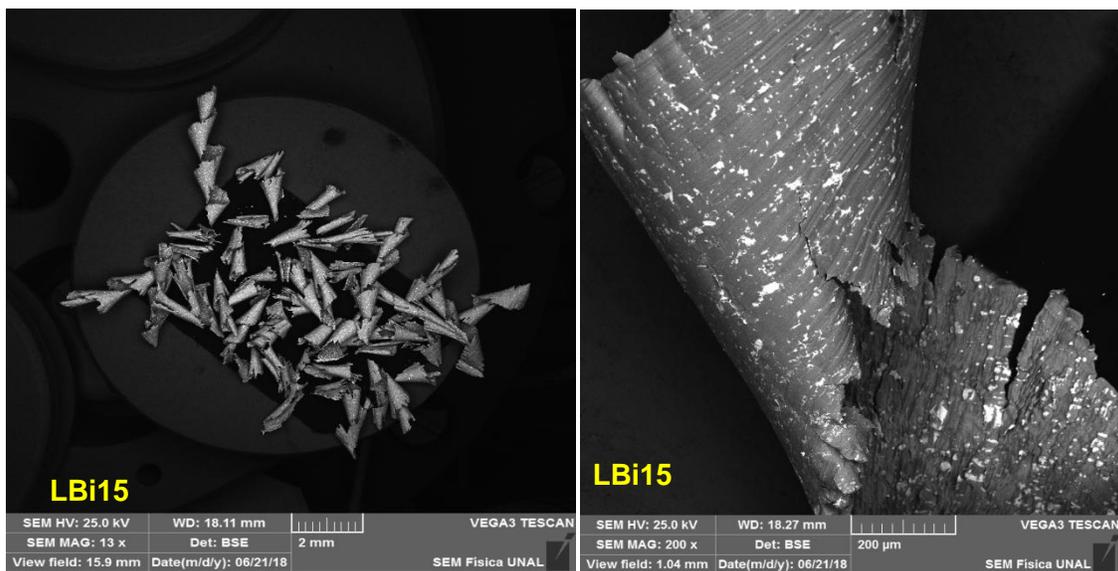
Muestra LBi13, formación de virutas tipo arco. A 800X se observa banda de deslizamiento con presencia de Bismutos dispersos en caras cóncavas y convexas de la viruta.



Muestra LBi14, formación de virutas tipo cónico helicoidal cortas. A 2.0 Kx se observa banda de deslizamiento con presencia de Bismutos, de aspecto blanco y brillante.



Muestra LBi15, formación de virutas tipo cónico helicoidal cortas. A 800X se observa banda de deslizamiento con presencia de Bismutos dispersos y deformados, se concentran en las grietas.



D. Anexo: Datos estadísticos.

Variable	Media	Mediana	Desviación Estándar	Intervalo de Confianza	P-Valor (Prueba de Normalidad)
Dureza	141,34	140,5	24,06	[135,81 ; 146,64]	0,200
Maquinado (Seg.)	14,22	9,08	14,17	[11,93 ; 16,50]	0,000
Viruta Fina	0,85	0,77	0,59	[0,51 ; 1,18]	0,496
Viruta Gruesa	0,58	0,56	0,52	[0,29 ; 0,87]	0,090
Peso Total	1,64	1,59	0,37	[1,43 ; 1,84]	0,227
BI%	1,27	1,2	0,78	[0,83 ; 1,70]	0,438

Dureza.

Muestra	Media	Mediana	Desviación Estándar	Intervalo de Confianza
LBi1	146,6	145,46	8,97	[135,46 ; 157,74]
LBi2	162,45	163,65	3,69	[157,86 ; 167,04]
LBi3	157,07	155,5	5,83	[149,83 ; 164,31]
LBi4	158,57	157,31	2,77	[155,13 ; 162,02]
LBi5	163,52	164,14	6,47	[155,47 ; 171,56]
LBi6	141,5	140,5	11,23	[127,55 ; 155,45]
LBi7	120,03	115,51	11,56	[105,66 ; 134,39]
LBi8	113,16	118,02	18,82	[89,78 ; 136,53]
LBi9	116,09	114,35	6,45	[108,08 ; 124,10]
LBi10	142,08	140,7	6,53	[133,97 ; 150,19]
LBi11 (con Pb)	194,73	195,05	0,88	[193,63 ; 195,83]
LBi12	136,5	133,79	16,15	[116,44 ; 156,55]
LBi13	132,88	132,72	6,14	[125,24 ; 140,51]
LBi14	109,01	108,43	3,14	[105,11 ; 112,91]
LBi15	126,01	125,87	1,62	[123,99 ; 128,03]

Maquinado.

Muestra	Media	Mediana	Desviación Estándar	Intervalo de Confianza
LBi1	62,34	61,56	2,76	[60,36 ; 64,32]
LBi2	10,65	10,55	0,7	[10,15 ; 11,16]
LBi3	7,14	7,03	1,09	[6,36 ; 7,93]
LBi4	28,24	28,06	3,71	[25,58 ; 30,90]
LBi5	10,14	9,55	2,13	[8,62 ; 11,67]
LBi6	9,84	9,03	3,78	[7,13 ; 12,55]
LBi7	7,95	7,55	1,36	[6,97 ; 8,92]
LBi8	6,85	6,55	0,91	[6,20 ; 7,50]
LBi9	6,86	6,56	0,91	[6,20 ; 7,51]
LBi10	4,75	5,01	0,67	[4,27 ; 5,23]
LBi11 (con Pb)	6,63	6,05	0,96	[5,94 ; 7,32]
LBi12	13,34	13,09	0,47	[13,00 ; 13,68]
LBi13	9,64	9,54	0,7	[9,13 ; 10,14]
LBi14	11,34	12,03	1,99	[9,92 ; 12,77]
LBi15	17,53	17,06	1,41	[16,52 ; 18,54]

Durezas (Parámetros de selección Prueba Estadística) Valor de Referencia - latón LBi11 (latón plomado)= 194,74

Muestra	Test	P-valor	Decisión
LBi1	T - Student	0,003	Rechazar Hipótesis Nula
LBi2	T - Student	0,000	Rechazar Hipótesis Nula
LBi3	T - Student	0,000	Rechazar Hipótesis Nula
LBi4	T - Student	0,000	Rechazar Hipótesis Nula
LBi5	T - Student	0,000	Rechazar Hipótesis Nula
LBi6	T - Student	0,013	Rechazar Hipótesis Nula
LBi7	T - Student	0,996	No Rechazar Hipótesis Nula
LBi8	T - Student	0,462	No Rechazar Hipótesis Nula
LBi9	T - Student	0,247	No Rechazar Hipótesis Nula
LBi10	T - Student	0,002	Rechazar Hipótesis Nula
LBi11 (con Pb)	T - Student	0,000	Rechazar Hipótesis Nula
LBi12	T - Student	0,084	No Rechazar Hipótesis Nula
LBi13	T - Student	0,009	Rechazar Hipótesis Nula
LBi14	T - Student	0,001	Rechazar Hipótesis Nula
LBi15	T - Student	0,001	Rechazar Hipótesis Nula

Maquinado: Parámetros Selección Prueba Estadística Valor de Referencia latón LBi11 (latón plomado)

Muestra	Test	P-valor	Decisión
LBi1	U the Mann Whitney	0,000	Rechazar Hipótesis Nula
LBi2	U the Mann Whitney	0,000	Rechazar Hipótesis Nula
LBi3	U the Mann Whitney	0,000	Rechazar Hipótesis Nula
LBi4	U the Mann Whitney	0,000	Rechazar Hipótesis Nula
LBi5	U the Mann Whitney	0,000	Rechazar hipótesis Nula
LBi6	U the Mann Whitney	0,000	Rechazar hipótesis Nula
LBi7	U the Mann Whitney	0,000	Rechazar hipótesis Nula
LBi8	U the Mann Whitney	0,000	Rechazar hipótesis Nula
LBi9	U the Mann Whitney	0,000	Rechazar hipótesis Nula
LBi10	U the Mann Whitney	0,000	Rechazar hipótesis Nula
LBi11 (con Pb)	U the Mann Whitney	0,000	Rechazar hipótesis Nula
LBi12	U the Mann Whitney	0,000	Rechazar hipótesis Nula
LBi13	U the Mann Whitney	0,000	Rechazar hipótesis Nula
LBi14	U the Mann Whitney	0,000	Rechazar hipótesis Nula
LBi15	U the Mann Whitney	0,000	Rechazar hipótesis Nula

Maquinado: Valor de Referencia latón LBi11 (latón plomado)= 6,54 Seg.

Muestra	Test	P-valor	Decisión
LBi1	Wilcoxon	0,005	Rechazar hipótesis Nula
LBi2	Wilcoxon	0,005	Rechazar hipótesis Nula
LBi3	Wilcoxon	0,005	Rechazar hipótesis Nula
LBi4	Wilcoxon	0,005	Rechazar hipótesis Nula
LBi5	Wilcoxon	0,005	Rechazar hipótesis Nula
LBi6	Wilcoxon	0,005	Rechazar hipótesis Nula
LBi7	Wilcoxon	0,005	Rechazar hipótesis Nula
LBi8	Wilcoxon	0,005	Rechazar hipótesis Nula
LBi9	Wilcoxon	0,005	Rechazar hipótesis Nula
LBi10	Wilcoxon	0,005	Rechazar hipótesis Nula
LBi11 (con Pb)	Wilcoxon	0,005	Rechazar hipótesis Nula
LBi12	Wilcoxon	0,005	Rechazar hipótesis Nula
LBi13	Wilcoxon	0,005	Rechazar hipótesis Nula
LBi14	Wilcoxon	0,005	Rechazar hipótesis Nula
LBi15	Wilcoxon	0,005	Rechazar hipótesis Nula

Análisis descriptivo General. (Cuando el P valor es menor a 0,05 se rechaza la hipótesis Nula, Cuando el p valor es mayor a 0,05 No se rechaza la hipótesis nula).

Tabla Correlaciones Variables Estadísticas.

En la tabla descrita a continuación, son expuestas las correlaciones de las variables evaluadas en el análisis estadístico. Para definir este criterio de correlación, se empleó el factor " ρ " cuyo rango entre [-1, 1], define aquellos valores cercanos a estos límites una relación directamente proporcional cuando los valores se acercan a 1 e inversamente proporcional cuando los valores tienden a -1.

		Dureza	Maquinado	Viruta cónica H corta (Vf)	Viruta arco alargada (Vg)	Peso Total (g)	%BI
Dureza	Correlación de Pearson	1					
	P- valor						
Maquinado	Correlación de Pearson	,095	1				
	P- valor	,735					
Viruta cónica H corta (Vf)	Correlación de Pearson	-,421	,005	1			
	P- valor	,118	,985				
Viruta arco alargada (Vg)	Correlación de Pearson	,563*	,332	-,302	1		
	P- valor	,029	,227	,275			
Peso Total (g)	Correlación de Pearson	,055	,182	,350	,294	1	
	P- valor	,844	,516	,201	,287		
%BI	Correlación de Pearson	-,674**	-,429	,252	-,734**	,054	1
	P- valor	,006	,111	,364	,002	,848	

Bibliografía

- [1]. Nobel. C, Klocke. F, Lung. D, Wolf. S. Machinability Enhancement of Lead-Free Brass Alloys. Rev Science Direct. Laboratory for Machine Tools and Production Engineering (WZL), RWTH Aachen University, Steinbachstrasse 19, 52074 Aachen, Germany. Pág. 100
- [2]. Martinez, M. Juarez, A. Hernandez, C. Gonzalez R, Hernandez M.A.L. Bismuth Segregation and Crack Formation on a Free Lead Yellow Brass Tap. Engineering Failure Analysis 28 (2013) 63–68 Engineering Failure Analysis 28 (2013) 63–68.
- [3]. Christoph Nobel, Fritz Klocke, Dieter Lung, Sebastian Wolf .Machinability Enhancement of Lead-Free Brass Alloys. Laboratory for Machine Tools and Production Engineering (WZL), RWTH Aachen University, Steinbachstrasse 19, 52074 Aachen, Germany
- [4]. Gan Chunlei, Song Dongfu, Zheng Kaihong, Wang Haiyan, Zhou Nan. Failure analysis of a lead-free brass tap used in potable water. Manuscripto Aceptado. Engineering Failure Analysis. November 2015.
- [5]. A. S. Fouda. H. Mahfouz. Inhibition of Corrosion of A-Brass (Cu-Zn, 67/33) In HNO_3 Solutions by Some Arylazo Indole Erivatives. *Department of Chemistry, Faculty of Science, El-Mansoura University*. March 19, 2009.
- [6]. J. Kozana, St. Rządkosz, M. Piękoś Influence of the selected alloy additions on limiting the phase γ formation in Cu-Zn alloys. Department of Moulding Materials, Mould Technology and Foundry of Non-ferrous Metals, Faculty of Foundry Engineering, AGH University of Science and Technology. Archives of Foundry Engineering. 2010
- [7]. P. Banerjee, S Banerjee. Indian Institute of Technologie, KHARAGPUR Studies Own Some Properties Of Silicon Brass. 2009
- [8]. P. García, S. Rivera, M. Palacios, J. Belzunce. Comparative study of the parameters influencing the machinability of leaded brasses. Fundación ITMA, Centro Tecnológico del Acero y Materiales Metálicos, Parque Empresarial del Principado de Asturias (PEPA), Calafates, N_11, parcela L-3.4, 33400 Avilés, Asturias, Spain Departamento de Ciencia de los Materiales e

Ingeniería Metalúrgica, Universidad de Oviedo, Campus universitario, 33203 Gijón, Asturias, Spain. 2009

[9]. Haruhiko Atsumia, Hisashi Imaib, Shufeng, Katsuyoshi Kondohb, Yoshiharu Kousakac, Akimichi Kojimac. High-strength, lead-free machinable duplex phase brass Cu–40Zn–Cr–Fe–Sn–Bi alloys. 2011

[10]. Hisashi Imai, Yoshiharu Kosaka, Akimichi Kojima, Shufeng Li, Katsuyoshi Kondoh, Junko Umeda, Haruhiko Atsumi. Characteristics and machinability of lead-free P/M Cu60–Zn40 brass alloys dispersed with graphite. 2009

[11]. A. La Fontaine, V.J. Keast. Compositional distributions in classical and lead-free brasses' Australian Key Centre for Microscopy and Microanalysis. Revista: Materials Characterization. 2009

[12]. V. Vázquez, A. Juárez-Hernández, A. Mascarenas, P. Zambrano, M.A.L. Hernández-Rodríguez. Cold shut formation analysis on a free lead yellow brass tap. Revista: Engineering Failure Analysis. 2009.

[13]. Simoni Triantafyllidou, Meredith Raetz, Jeffrey Parks, Marc Edwards. Understanding How Brass Ball Valves Passing Certification Testing Can Cause Elevated Lead In Water When Installed. Revista: Water Research. 2012

[14]. NSF/ ANSI61-2013. Standard for Drinking Water System Components- Health Effects.

[15]. <http://www.copperalliance.es/el-cobre/aleaciones>

[16]. F.J Gil Mar. Metalografía, Universitat Politècnica de Catalunya. 2005

[17]. N. Boada Eulalia. Caracterización de latones obtenidos por colada continua. Trabajo de grado. 2008

[18]. ASM Metal Handbook. Volume 3. Alloys Phases Diagrams. 1992. Pág 2-182.

[19]. Kazanas, H. C., Baker, G. E., & Gregor, T. (2000). Procesos básicos de manufactura. McGraw-Hill Interamericana. Pág. 196

[20]. (Groover, M. P. (1997). Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas. Pearson Educación.)

[21]. Medina I.Fernando. <http://metalografiainsitu.blogspot.com/2010/11/metalografia-laton-70-30.html>

[22]. ASME A112.18.1 / CSA B125.1. Plumbing supply fittings. 2012

[23]. Avner, S. H., & Aracama, L. L. (1979). *Introducción a la metalurgia física* (No. TN690. A96 1988.). México; McGraw-Hill. Págs. 464-470.

- [24]. Shaw, M. C., & Cookson, J. O. (2005). *Metal cutting principles* (Vol. 2). New York: Oxford university press.
- [25]. <https://www.epa.gov/laws-regulations>.
- [26] Sum-Met, B. (2007). *The Science Behind Materials Preparation*. Buehler Ltd.
- [27] ASM Metal Handbook. Volume 9. Alloys Phases Diagrams. 1992. Págs. 392-415.
- [28] Álvarez, M., Boillos, M. M., & Velasco, E. (2015). The process of building the abstract of a paper in the context of a writing workshop for PhDs. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 178, 2-8.
- [29] Cartier, C., Arnold Jr, R. B., Triantafyllidou, S., Prévost, M., & Edwards, M. (2012). Effect of flow rate and lead/copper pipe sequence on lead release from service lines. *Water Research*, 46(13), 4142-4152.
- [30] Beech, I. B., & Sunner, J. A. (2006). Chapter 14: Biocorrosion in drinking water distribution systems. *Interface Science in Drinking Water Treatment*. Elsevier Ltd. Amsterdam, Netherlands, 245-255.
- [31] ASTM, A. E. (2012). E 10-12, Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials.
- [32] Davis, J. R. (Ed.). (2001). *Copper and copper alloys*. ASM internacional.
- [33] Elfland, C., Scardina, P., & Edwards, M. (2010). Lead-contaminated water from brass plumbing devices in new buildings. *Journal-American Water Works Association*, 102(11), 66-76.
- [34] http://www.cimsaww.com/internet/es/cupropedia/aleaciones_1/serie_s/serie_s.jsp