

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y
AGROINDUSTRIA**

**“PURIFICACIÓN DE RESIDUOS DE LATÓN DE LA INDUSTRIA
DE LA GRIFERÍA PARA SU RECICLAJE”**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA
QUÍMICA**

**CRISTINA ALEJANDRA LLUMIQUINGA DUQUE
llcristina2184@hotmail.com**

**DIRECTORA: ING. ALICIA GUEVARA
alicia.guevara@epn.edu.ec**

Quito, Mayo 2011

© Escuela Politécnica Nacional (2011)
Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN

Yo, Cristina Alejandra Llumiquinga Duque, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Cristina Alejandra Llumiquinga Duque

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Cristina Alejandra Llumiquinga Duque, bajo mi supervisión.

Ing. Alicia Guevara Msc.
DIRECTOR DE PROYECTO

AUSPICIO

La presente investigación contó con el auspicio financiero de la empresa Franz Viegener Área Andina S.A. y el Proyecto Semilla PIS09-05 de la Escuela Politécnica nacional, que se ejecuta en el Departamento de Metalurgia Extractiva

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a Dios por darme la oportunidad de tener a mi lado a personas tan maravillosas como son mi familia, y por enseñarme que todo lo bueno o malo que nos sucede en esta vida tiene como propósito hacernos crecer como personas.

A las tres personas más importantes en mi vida y las que más quiero. A mi papi, mi alma gemela, mi compañero de chiste, gracias por ser tan comprensivo, paciente y amoroso, gracias por enseñarme a vivir la vida con alegría y optimismo, y por demostrarme que el amor a una persona es infinito y no tiene límite jamás. A mi mami (mi reina), mi mejor amiga, por ser mi símbolo de valor y fortaleza ante las situaciones más difíciles, gracias por su gran amor y apoyo incondicional, por guiarme y ser mi luz en el camino. A mi ñaño, mi gordito, por ser un verdadero ejemplo para mí, has logrado transmitirme todo lo bueno que has aprendido en la vida, gracias por tu comprensión y tu amor. Gracias a los tres que han sido los pilares fundamentales en mi vida, siempre han estado en los momentos más importantes de mi vida, para darme fortaleza, confianza y sobre todo un gran amor durante todos los días de mi vida.

A Mire y a mi gordito chiquito, gracias por convertirse en este tiempo en personas tan importantes en vida, gracias por su cariño.

A mi mejor amiga Sandra Arias, por ser una verdadera hermana, por estar siempre a mi lado, apoyándome y cuidando de mí, por ayudarme a cumplir mis sueños y estar incondicionalmente en las buenas y malas. A mi súper amigo José Guallichico, gracias por siempre aconsejarme y que a pesar de todas sus obligaciones y responsabilidades siempre tiene un espacio para los amigos de prepo. A Marcelo Semblantes, por la gran amistad que me ha brindado durante todo este tiempo y por ser esa persona tan original. Gracias amigos, ustedes me enseñaron que la verdadera amistad sobrepasa cualquier barrera. (H1)

A la Ing. Alicia Guevara por su gran ayuda, comprensión, colaboración y tiempo para la realización de este proyecto, gracias por brindarme su amistad, y por ser

la gran persona que es, gracias por enseñarme tantas lecciones de vida y por ser un ser humano tan bueno con todas las personas que necesitan de su ayuda.

Al Ing. Ernesto de la Torre, por su apoyo y colaboración en esta investigación, gracias por sus comentarios y críticas que ayudaron a culminar con este excelente trabajo.

A la empresa Franz Viegner S.A., en especial a la Ing. Sara Buitrón, por brindarme la oportunidad de ser parte de este proyecto.

A mis grandes amigas, mis compañeras de vida, Feri Iza, Fer Cando, Pauli Ibujés, Angelita Quishpe, Michelle Flores, Geova Fernández, Ely Manangón, Majo Cabrera, Evelyn Mina, Dora Morales, gracias chicas por los buenos momentos que pasamos, por tantas alegrías y tristezas compartidas, porque cada una es una mujer única, luchadora, optimista y sobre todo que enfrenta todo lo que Dios nos da en la vida con una alegría que contagia a todas las personas a su alrededor.

A mis amigos de la Poli, Fer S., Diego A., Diego B., Mary M., Carlos M., Richard M., Magi C., Diego P., Juan C., Pauli L., Mariu M., Cris M, gracias por la gran amistad que me han brindando.

A los amigos DEMEX, Majito R., Daniel P., Lucho V., Pepe Lucho, Ricky M., Diana C., Sebas E., Silvi B., por hacer de este lugar tan ameno y chévere, lleno de risas y chistes. Gracias mejor amigo Santi Y. por toda tu gran ayuda, paciencia y amistad. A don Kleberito, por su apoyo incondicional y sus palabras de aliento. A Maguita, por ser siempre la alegría, por su ternura y por su ayuda. A Eve y la Señora Verito, gracias por su ayuda, por todas las palabras de apoyo. Gracias a todos por hacernos sentir como una verdadera familia. Al Ing. Lozada por ser una gran profesional y una gran ayuda en el proyecto.

A mis amiguis del cole: Diana A., Pauli P., Erika F. y Priscila P. gracias por todo su cariño y apoyo desde el cole.

DEDICATORIA

A mis papis Jaime y Blanquita y a mi hermano Maurito, por ser la base de toda mi vida, por su amor, cariño, fortaleza, apoyo y confianza. Y por enseñarme que Dios siempre nos da lo que nosotros necesitamos no lo que queremos.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
RESUMEN.....	xviii
INTRODUCCIÓN.....	xix
1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	1
1.1. Latón.....	1
1.1.1. Propiedades físicas del latón.....	4
1.1.2. Propiedades químicas del latón.....	5
1.1.3. Propiedades mecánicas del latón.....	6
1.1.4. Diagrama de fase de latones.....	7
1.1.5. Tipos de latón.....	8
1.1.5.1. Latones alfa.....	9
1.1.5.2. Latones beta.....	9
1.1.5.3. Latones alfa-beta.....	12
1.1.5.4. Latones especiales.....	13
1.1.6. Producción del latón.....	15
1.2. Residuos industriales y su reciclaje.....	18
1.2.1. Residuo industrial.....	18
1.2.2. Reciclaje de residuos industriales.....	19
1.2.1.1. Reciclaje de Metales.....	20
1.2.1.2. Reciclaje de latón.....	22
1.2.1.3. Origen de residuos de latón.....	25
1.3. Métodos de purificación de residuos de latón.....	27
1.3.1. Separación magnética.....	28
1.3.1.1. Principios de la separación magnética.....	28
1.3.1.2. Procesos de separación magnética.....	30
1.3.1.3. Equipos de separación magnética.....	32
1.3.2. Separación por tamizado.....	37
1.3.3. Fusión.....	41
1.3.3.1. Agentes fundentes.....	42
1.3.3.2. Hornos de fusión.....	45
1.3.3.3. Agitación en la fusión.....	49
2. PARTE EXPERIMENTAL	51
2.1. Caracterización físico-química de los residuos de latón de la industria de la grifería.....	53
2.1.1. Caracterización física de residuos de latón.....	53
2.1.1.1. Determinación del tamaño de partícula para los residuos de latón.....	53
2.1.1.2. Determinación de la densidad aparente de los residuos de latón.....	54
2.1.1.3. Determinación de densidad real de los residuos de latón.....	54
2.1.1.4. Caracterización por microscopía óptica de los residuos de latón.....	55
2.1.1.5. Caracterización por microscopía electrónica de los residuos de latón.....	55
2.1.2. Caracterización química de los residuos de latón.....	56

2.1.2.1.	Determinación del pH de los residuos de latón	56
2.1.2.2.	Determinación de la concentración de metales pesados en los desechos de latón	56
2.1.2.3.	Caracterización de los residuos de latón mediante difracción de rayos X	58
2.2.	Ensayos de separación magnética de residuos de latón del proceso de acabado.....	58
2.2.1.	Método de separación magnética en seco.....	58
2.2.2.	Método por separación magnética en húmedo.....	61
2.2.3.	Caracterización de residuo de latón del proceso de acabado pretratado con separación mgnética.....	64
2.3.	Ensayos de clasificación por tamaño de partícula de residuos de latón del pulido.....	64
2.4.	Ensayo de fusión de los residuos de latón pretratados.....	65
2.4.1.	Ensayosde fusión con carga fundente estándar para los desechos industriales de latón.....	65
2.4.2.	Identificación de sales de cloro para el proceso de fusión de desechos industriales de latón.....	68
2.4.3.	Definición de los parámetros de operación para la fusión de desechos de latón en presencia de sales de cloro.....	70
2.4.3.1.	Definición de carga de sales fundentes respecto a la carga de material pretratado para el proceso de fusión	71
2.4.3.2.	Definición del tiempo de operación para el proceso de fusión de material pretratado en presencia de sales de cloro.....	72
2.4.3.3.	Análisis de la implementación de agitación para el proceso de fusión de muestras pretratadas en presencia de sales de cloro.....	73
2.5.	Caracterización de residuos de latón purificado.....	754
2.5.1.	Caracterización por microscopía electrónica de barrido de residuos de latón purificados.....	74
2.5.2.	Caracterización por espectroscopia de absorción atómica de residuos de latón purificados.....	74
2.6.	Elaboración del diseño conceptual del proceso de purificación de residuos industriales de latón para su reciclaje y su evaluación.....	75
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	80
3.1.	Caracterización física de residuos de latón.....	80
3.1.1.	Análisis granulométrico de los residuos de latón.....	80
3.1.2.	Determinación de densidad de residuo de latón.....	81
3.1.3.	Caracterización por microscopia óptica de los residuos de latón del proceso de pulido de piezas.....	82
3.1.4.	Caracterización por microscopía electrónica de los residuos de latón....	86
3.2.	Caracterización química de los residuos de latón.....	88
3.2.1.	Determinación del ph de los residuos de latón.....	88
3.2.2.	Determinación de la concentración de metales pesados en los desechos de latón de la industria de la grifería.....	89
3.2.3.	Caracterización de residuos de latón de la industria de la grifería mediante difracción de rayos x.....	91
3.2.4.	Caracterización química de las muestras de latón del por medio del microscopio electrónico de barrido.....	92

3.3.	Ensayos de separación magnética de residuos de latón del proceso de acabado.....	97
3.3.1.	Ensayos separación magnética en seco.....	97
3.3.2.	Ensayos de separación magnética en húmedo.....	100
3.4.	Método de clasificación por tamaño de partícula de residuos del proceso de pulido.....	102
3.4.1.	Separación de tamaño de partícula mediante tamizado.....	102
3.5.	Ensayos de fusión de los residuos de latón pretratados.....	109
3.5.1.	Ensayo de fusión con carga fundente estándar para los desechos industriales de latón.....	109
3.5.2.	Identificación de sales de cloro para el proceso de fusión de desechos industriales de latón.....	111
3.5.3.	Definición de los parámetros de operación para la fusión de latón en presencia de sales de cloro.....	115
3.5.3.1.	Definición de carga de sales fundentes respecto a la carga del material pretratado, el tiempo de trabajo e implementación de agitación para el proceso de fusión.....	115
3.6.	Calidad de los productos de latón de fundición en presencia de cloruro de potasio.....	123
3.6.1.	Calidad del producto de latón obtenido a partir de la fundición de la fracción magnética.....	124
3.6.2.	Calidad del producto de latón obtenido a partir de la fundición de la fracción < 75 um.....	125
3.7.	Diseño conceptual y análisis económico preliminar del establecimiento de una planta de purificación de residuos industriales de latón para su reciclaje.....	125
3.7.1.	Diseño conceptual para el procesamiento de residuos industriales de latón para su reciclaje.....	125
3.7.1.1.	Volumen a producir en una planta de purificación de residuos de latón para su reciclaje.....	126
3.7.1.2.	Balance de masa realizado para la instalación de una planta de purificación de residuos de latón para su reciclaje.....	126
3.7.1.3.	Síntesis de la tecnología para la purificación de residuos de latón para su reciclaje.....	133
3.7.1.4.	Capacidad de los equipos.....	133
3.7.1.5.	Implantación de equipos para el proceso de purificación de los residuos de latón para su reciclaje.....	136
3.7.2.	Estimación de costos y resultados.....	138
3.7.2.1.	Inicio del proyecto.....	138
3.7.2.2.	Costo de los equipos principales.....	139
3.7.2.3.	Elementos de costos fijos.....	140
3.7.2.4.	Elementos de costos variables.....	142
3.7.3.	Ingresos del proyecto.....	143
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	148
4.1.	Conclusiones.....	148
4.2.	Recomendaciones.....	151
	BIBLIOGRAFÍA.....	152
	ANEXOS.....	161

INDICE DE TABLAS

	PÁGINAS
Tabla 1.1. Punto de fusión del latón y de los metales que lo conforman	5
Tabla 1.2. Resumen de los tipo de latones	13
Tabla 1.3. Tipos de latones especiales	14
Tabla 1.4. Reservas conocidas y vida previsible de Al, Cu, Pb y Zn.....	21
Tabla 1.5. Uso mundial de cobre refinado y reciclado.....	24
Tabla 1.6. Susceptibilidad magnética de varios minerales.....	30
Tabla 1.7. Tipos de agentes fundentes	45
Tabla 2.1. Tamices empleados para la realización del ensayo granulométrico del residuo de latón del proceso de acabado de piezas	54
Tabla 2.2. Niveles mínimos detección de metales pesados por Absorción Atómica	57
Tabla 2.3. Condiciones operatorias utilizadas para la separación magnética	60
Tabla 2.4. Carga fundente estándar usada para la fusión de desechos industriales	66
Tabla 2.5. Temperaturas de fusión de las sales de cloro empleadas en el proceso de fusión de desechos de latón.....	68
Tabla 2.6. Cantidades de material y de sales de cloro para los ensayos de fusión para selección de sales fundentes	70
Tabla 2.7. Condiciones de trabajo para cada material en la definición de la carga de sales fundentes respecto a la carga material pretratado	72
Tabla 2.8. Variación del tiempo de operación para el proceso de fusión de desechos de aluminio en presencia de sales de cloro	72
Tabla 3.1. d_{80} para el residuo de latón del proceso de acabado de piezas	80
Tabla 3.2. Densidad real y aparente, y porosidad para los residuo de latón del proceso de acabado y pulido de piezas.....	81
Tabla 3.3. Determinación de propiedades físicas de los residuos de latón, mediante microscopía óptica de luz reflejada	85
Tabla 3.4. Determinación del pH de los residuos de latón.....	88
Tabla 3.5. Concentración de metales pesados en los desechos de latón de la industria de la grifería.....	89
Tabla 3.6. Análisis de difracción de rayos X de residuos de latón de los procesos de acabado y pulido de piezas	91
Tabla 3.7. Resultados para el análisis semicuantitativo del residuo de latón del proceso de acabado piezas (100 aumentos) usando Analizar RX (MEB-TESCAN)	94
Tabla 3.8. Resultados para el análisis semicuantitativo del residuo de latón del proceso de pulido de piezas (100 aumentos), usando Analizar Rx (Meb-Tescan).....	96
Tabla 3.9. Resultados para el análisis semicuantitativo de la fibra de paño, presente en el residuo de latón del proceso de pulido (600 aumentos), usando Analizar RX (MEB-Tescan)	97
Tabla 3.10. Concentración de metales y recuperación de latón, en el proceso de separación magnética seca.....	98
Tabla 3.11. Concentración de metales y recuperación de latón, en el proceso de separación magnética húmeda.....	100

Tabla 3.12.	Peso retenido en cada malla	102
Tabla 3.13.	Caracterización de las fracciones obtenidas por tamizado, usando microscopía óptica de luz reflejada.....	104
Tabla 3.14.	Variación de tiempo de tamizado con el peso retenido en la malla #200, a diferentes tiempos.....	107
Tabla 3.15.	Contenido de metales pesados de la fracción < 75 [µm], a 5 [min] de tamizado.....	108
Tabla 3.16.	Concentración de metales, en muestra pretratada luego de fusión con carga estándar fundente en horno de crisol gas	110
Tabla 3.17.	Recuperaciones de latón de la fusión de material pretratado en presencia de sales de cloro	112
Tabla 3.18.	Recuperaciones para la definición de la concentración de cada sal de cloro dentro de una mezcla fundente a la temperatura de trabajo para material pretratado	114
Tabla 3.19.	Recuperaciones para la definición de la concentración del cloruro de potasio, el tiempo de fusión y la homogenización.....	116
Tabla 3.20.	Concentraciones de metales pesados en material fundido con diferentes cantidades de cloruro de potasio, a 30 y 45 [min].....	118
Tabla 3.21.	Concentraciones elementales de cada metal para la superficie de latón de la fusión de material de material pretratado con agitación del sistema con varilla metálica.....	123
Tabla 3.22.	Condiciones de operación definidas para la fundición de material metálico pretratado en presencia de cloruro de potasio	123
Tabla 3.23.	Análisis de calidad para el producto obtenido de la fundición de fracción no magnética para las mejores condiciones operatorias	124
Tabla 3.24.	Análisis de calidad para el producto obtenido de la fundición de la fracción < 75 [µm] para la mejores condiciones de operación	125
Tabla 3.25.	Condiciones de operación para la separación magnética seca del residuo del proceso de acabado de piezas	128
Tabla 3.26.	Condiciones de operación para la fusión de residuo del proceso de acabado pretratado	128
Tabla 3.27.	Balance de masa para la recuperación de latón del residuo del proceso de acabado de piezas, durante un día de trabajo	129
Tabla 3.28.	Condiciones de operación para la fusión de residuo del proceso de pulido de piezas pretratado	130
Tabla 3.29.	Condiciones de operación para la separación física por tamizado del residuo de latón del proceso de pulido de piezas.....	130
Tabla 3.30.	Balance de masa diario para la recuperación de latón del residuo del proceso de pulido de piezas	131
Tabla 3.31.	Recuperación global de latón obtenida del tratamiento de residuos de proceso de grifería.....	132
Tabla 3.32.	Descripción del proceso para la purificación de residuos de latón.....	133
Tabla 3.33.	Resultado de cálculo de variables magnéticas	134
Tabla 3.34.	Capacidad de transporte con diferentes anchos de banda	134
Tabla 3.35.	Resultados de cálculo de área de tamizado	135

Tabla 3.36.	Características de los equipos para la planta de purificación de residuos de latón	136
Tabla 3.37.	Inversión estimada de la planta	139
Tabla 3.38.	Especificaciones técnicas y costos de los equipos a utilizar en una planta de tratamiento de residuos de latón.....	139
Tabla 3.39.	Gastos fijos de la planta	141
Tabla 3.40.	Consumo y costo de los reactivos a utilizar en una planta de procesamiento de residuos de latón del proceso de acabado y del proceso de pulido de piezas.....	142
Tabla 3.41.	Ingresos mensuales por venta de los productos	143
Tabla 3.42.	Análisis financiero de la implementación de una planta de tratamiento de residuos de latón de la industria de la grifería.....	145
Tabla 3.43.	Indicadores económicos obtenidos.....	146
Tabla 4.1.	Parámetros definidos para la purificación y recuperación de residuos de latón	150

INDICE DE FIGURAS

	PÁGINAS
Figura 1.1. Principales usos de latón	3
Figura 1.2. Principales países exportadores de latón	3
Figura 1.3. Comparación de precios de barra hecha de latón y acero	4
Figura 1.4. Influencia del incremento de Zinc en las propiedades de los latones	7
Figura 1.5. Diagrama de fases de Cu-Zn (latones)	8
Figura 1.6. Fase β' para una composición equivalente de átomos cobre y zinc.....	10
Figura 1.7. Ilustración esquemática del posible mecanismo de formación de los dos dominios	11
Figura 1.8. Esquema del proceso de producción de latón	16
Figura 1.9. Esquema del proceso de reciclaje a partir de desechos de latón	18
Figura 1.10. Cadena de reciclaje de residuos industriales	20
Figura 1.11. Uso mundial de cobre de los años 1973 y 2000.....	23
Figura 1.12. Fuentes de abastecimiento para el reciclaje de zinc	25
Figura 1.13. Mecanismo de operación del proceso de granallado de piezas metálicas.....	26
Figura 1.14. Mecanismo de operación del proceso de pulido de piezas metálicas.....	27
Figura 1.15. Curvas típicas de magnetización: a) Minerales ferromagnéticos b) Minerales paramagnéticos y diamagnéticos	29
Figura 1.16. Mecanismo de operación de la separación magnética de baja intensidad	31
Figura 1.17. Separador de tambor por vía húmeda.....	33
Figura 1.18. Separador magnético de banda transversal de alta intensidad	34
Figura 1.19. Esquema de un separador magnético de rodillo inducido de tres etapas	35
Figura 1.20. Principio de funcionamiento de separador de corrientes de Foucault.....	36
Figura 1.21. Representación del proceso de estratificación	40
Figura 1.22. Tipos de cribado	41
Figura 1.23. Horno de crisol estacionario.....	47
Figura 1.24. Horno de crisol móvil.....	48
Figura 1.25. Esquema de funcionamiento de un horno cubilote, a gas natural	48
Figura 1.26. Mecanismo de agitación mecánica para la fusión.....	50
Figura 2.1. Metodología para la recuperación de latón a partir de desechos de la industria de la grifería.....	52
Figura 2.2. Fotografía del Microscopio electrónica de barrido, TESCAN, empleado en el análisis de elementos.....	56
Figura 2.3. Fotografía del espectrofotómetro de absorción atómica, AAAnalyst 300.....	57
Figura 2.4. Principio de operación del separador magnético de tambor inducido de alta intensidad marca CARPCO	59
Figura 2.5. Separador Magnético de tambor inducido de alta intensidad	59

Figura 2.6.	Esquema de la separación magnética realizada con un separador magnético de tambor inducido de alta intensidad.....	61
Figura 2.7.	Separador Magnético de tambor húmedo (WPD).....	62
Figura 2.8.	Principio de operación del separador magnético de tambor húmedo (WPD) de tambor inducido de alta intensidad marca CARPCO	62
Figura 2.9.	Esquema de la separación magnética realizada con un separador magnético de tambor inducido de alta intensidad.....	63
Figura 2.10.	Serie de tamices utilizados para la separación por tamaño de partícula.....	65
Figura 2.11.	Fotografía horno de crisol a gas, empleado en la fusión y sus dimensiones	68
Figura 2.12.	Ensayos de fusión de latón en presencia de sales de cloro (a) Homogenización de sal+muestra (b) Capa de sal en muestra	69
Figura 2.13.	Fotografía horno tubular, F21100, empleado en la fusión de desechos industriales y electrónicos.....	70
Figura 2.14.	Esquema de los parámetros determinados, para la fusión de latón, en una mufla eléctrica y en presencia de KCl	71
Figura 2.15.	Mecanismo de agitación realizado en la fundición de desechos de latón pretratado	73
Figura 2.16.	Angulo de reposo para el material.....	77
Figura 3.1.	Fotografía d la superficie del residuo del proceso de acabado mediante microcopia óptica de luz reflejada (a) 10 aumentos (b) 100 aumentos	83
Figura 3.2.	Fotografía d la superficie del residuo del proceso de pulido mediante microcopia óptica de luz reflejada (a) 10 aumentos (b) 100 aumentos	84
Figura 3.3.	Fotografía de la superficie del residuo del proceso de acabado, mediante microscopia electrónica de barrido. (a) 100 aumentos. (b) 300 aumentos	86
Figura 3.4.	Fotografía de la superficie del residuo del proceso de pulido, mediante microscopia electrónica de barrido. (a) 100 aumentos (b) 600 aumentos	87
Figura 3.5.	Mapeo químico elemental del residuo del proceso de acabado de piezas.	92
Figura 3.6.	Mapeo químico de cada metal del residuo del proceso de acabado (100 aumentos).....	93
Figura 3.7.	Mapeo químico elemental del residuo de latón del pulido (100 aumentos).....	95
Figura 3.8.	Mapeo químico de cada metal de residuo de latón del pulido (100 aumentos).....	95
Figura 3.9.	Variación del contenido de hierro, con cada de fracción a diferente CMA en la separación magnética seca.....	99
Figura 3.10.	Variación del contenido de hierro, con cada en cada fracción a diferente número de pasadas en el separador magnético húmedo	101
Figura 3.11.	Peso retenido en cada tamiz	103
Figura 3.12.	Fotografía del material retenido en la malla #270, correspondiente a 53 [μ m], mediante microscopia óptica de luz reflejada (100 aumentos).....	105

Figura 3.13. Fotografía del material < 38 [μm], a 100 aumentos en el microscopio óptico de luz reflejada	106
Figura 3.14. Variación del porcentaje de material retenido a diferentes tiempos en el proceso de tamizado	107
Figura 3.15. Procedimiento seguido para la fusión de material de latón pretratado	109
Figura 3.16. Muestras pretratadas, después de fusión con carga típica fundente en horno de crisol a gas	110
Figura 3.17. (a) Muestra sin fundir (b) Muestra fundida	112
Figura 3.18. Variación de la recuperación de latón con la cantidad de cloruro de potasio para cada tiempo de fusión y homogenización	116
Figura 3.19. Sección transversal de una pieza de latón, sin agitación en el proceso de fusión.....	119
Figura 3.20. Cavidades y grietas formadas durante la solidificación de latón obtenido en la fusión de material metálico pretratado sin agitación	120
Figura 3.21. Superficie de latón obtenido en la fusión de material pretratado de latón con agitación del sistema con una varilla metálica	121
Figura 3.22. Mapeo químico elemental de la superficie de latón obtenida en la fusión de material pretratado con agitación del sistema con varilla metálica	121
Figura 3.23. Mapeos químicos de cada metal para la superficie de latón obtenida en la fusión de material pretratado con agitación del sistema con varilla metálica	122
Figura 3.24. Diagrama de purificación de residuos de latón	127
Figura 3.25. Balance de masa para la purificación del residuo del proceso de acabado	129
Figura 3.26. Balance de masa para la purificación del residuo del proceso de pulido	130
Figura 3.27. Balance global para el proceso de purificación de residuos de latón para su reciclaje	131
Figura 3.28. Vista superior de la planta de tratamiento de residuos de latón	137

ÍNDICE DE ANEXOS

	PÁGINAS
ANEXO I	
Caracterización física de los residuos industriales de latón.....	180
ANEXO II	
Determinación de la concentración de metales pesados en los desechos industriales de latón.....	186
ANEXO III	
Caracterización química del residuo de latón del proceso de acabado de piezas.....	187
ANEXO IV	
Determinación de campo magnético aplicado (CMA) en gauss en la separación magnética en seco.....	191
ANEXO V	
Ensayos de separación magnética en seco.....	193
ANEXO VI	
Ensayos de separación magnética húmeda.....	202
ANEXO VII	
Ensayo de separación física por tamizado.....	206
ANEXO VIII	
Caracterización química del latón comercial.....	208
ANEXO IX	
Definición de la carga de sales fundentes respecto al material pretratado, tiempo de fusión e implementación de agitación.....	209
ANEXO X	
Determinación de las capacidades de los equipos para purificación de residuos de latón para su reciclaje.....	212
ANEXO XI	
Catálogo de los equipos.....	216

RESUMEN

Este trabajo de investigación tuvo por objetivo, evaluar diferentes métodos para la recuperación de latón a partir de residuos industriales producidos por la fabricación de piezas de grifería. Estos residuos metálicos contienen, altas concentraciones de hierro (> 10%) del proceso de acabado (granallado de piezas), fibras de paño sintético del proceso de pulido.

Para la caracterización física química y mineralógica de los residuos de latón del proceso de acabado y del proceso de pulido, se usó espectrofotometría de absorción atómica (AA), difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido (MEB-EDX).

El residuo de latón del proceso de acabado de piezas con 47,8% de Cu, 36,8% de Zn y 11,6% de Fe, fue previamente tratado por separación magnética de baja intensidad, para eliminar el exceso de hierro. Los residuos del proceso de acabado con 53,8% de Cu; 34,6% de Zn y 1,1% de Fe, fueron purificados de las impurezas no metálicas (fibras de paño) por medio de un tamiz malla estándar #200 (75 μ m). Con recuperaciones aproximadas del 85%.

Los residuos pre-tratados, fueron fundidos en una mufla eléctrica a 1000 °C, 45 min, agitación y con la adición de cloruro de potasio para evitar la oxidación del zinc y eliminar el hierro remanente en los residuos. Estos procesos permiten obtener latón que cumplen con las características necesarias para ser reutilizados (59% Cu, 30 % Zn, 0,5 % Fe).

Finalmente, se realizó un diseño conceptual del proceso de purificación de residuos de latón y su evaluación económica. En un escenario conservador el proyecto brindó una tasa interna de retorno de 74.18%, y un valor actual neto de 71.184.08 USD, cuya la inversión inicial de 56.579,00 USD podría ser cubierta en un año, cuatro meses de operación, en el cual se recuperara toda la inversión.

INTRODUCCIÓN

El latón, es una mezcla de cobre y zinc, que ha sido utilizado a nivel mundial desde la revolución industrial, como una aleación tecnificada. Los desarrollos subsecuentes en la tecnología de producción, han permitido atender las demandas de los clientes de mejores, más consistentes y en grandes cantidades de productos de latón. El latón posee mayor dureza que el cobre, es fácil de mecanizar, grabar y fundir, debido a la presencia del zinc en su composición.

Las propiedades mecánicas del metal, varían enormemente en función de su composición y la forma de trabajo. Existen alrededor de 70 aleaciones distintas, cada una con características específicas. Comercialmente no existen latones con contenidos de zinc superiores al 50 %, debido a la presencia de la fase γ que hace a la aleación muy frágil, lo que pierde el interés industrial.

Muchas empresas trabajan con latón como materia prima, ya que este material es fácil de tornearse, grabar y fundir, su campo de aplicación es muy extenso, va desde la industria mecánica a la eléctrica, incluye aplicaciones decorativas, sus amplias posibilidades de utilización generan también gran cantidad de residuos metálicos. Así por ejemplo en la elaboración de piezas de grifería se generan alrededor de 1 tonelada al mes de residuos metálicos.

Esta aleación posee una gran ventaja, es fácilmente reciclable y sus residuos se pueden seleccionar con facilidad y volver a fundir cuantas veces sea necesario. Los subproductos del latón industrial en barras, producto trefilado o laminado (virutas procedentes del mecanizado, rebabas de las piezas), tienen un alto valor económico y una extraordinaria utilidad para la nueva fabricación de latón.

Actualmente las economías mundiales han cambiado de punto de vista con respecto a los recursos minerales, tales como son los metales, ahora suelen considerar los residuos como verdaderos recursos. Esto debido a que las reservas

de materia prima han disminuido tanto que han llegado casi a su punto de agotamiento.

La evolución que han tenido las reservas de metales como el Fe y Al presentan una situación tranquilizadora, no obstante es alarmante en el caso del Cu y Zn, se estima que el 26% del cobre y el 19% del zinc extraíble de la corteza terrestre se pierde actualmente en desechos no reciclados. Los precios actuales no reflejan esas pérdidas porque el suministro es todavía lo bastante grande como para cubrir la demanda, y además nuevos métodos han ayudado a las minas a producir el material con más eficiencia, pero en el futuro los metales afrontarán agotamiento. (Riba, 2008)

Esto significa que la humanidad debe asumir el reciclaje en una escala mucho más amplia. De los metales que existen, la mayor parte pueden ser fundidos y volver a procesarse para crear metales. De los desperdicios que producimos diariamente, el 10% lo constituyen los metales

A nivel mundial el reciclaje proporciona un notable ahorro de energía, ya que reduce la demanda de nuevos materiales. La ventaja de los metales es que, de todos los materiales actualmente utilizados por la sociedad, éstos tienen el mayor potencial de reciclado ilimitado, es decir son 100% reciclables. (Amaya *et al.*, 2006).

El presente trabajo, estudia la purificación de residuos de la industria de la grifería, con el fin de recuperar latón para su reciclaje. Se reduce, el contenido de impurezas no metálicas de los residuos de latón del proceso de pulido por medios físicos, y por medios magnéticos el contenido de hierro de los residuos del proceso de acabado, para su posterior fusión en presencia de sales de cloro para obtener un producto que presente concentraciones de hierro inferiores al 1% y contenidos de cobre y zinc similares a los del latón industrial. Además se hace un análisis económico de prefactibilidad, el cual muestra la rentabilidad de la instalación de una planta de recuperación de latón.

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1. LATÓN

El latón es una aleación de metales no ferrosos, principalmente cobre y zinc. Esta mezcla sólida se forma por la fusión de los dos metales. Ha sido fabricado hace miles de años en diversas partes del mundo. El latón como una de la aleaciones de cobre más conocidas, empleadas y más económicas, depende principalmente de su composición. Esta aleación posee una gran ventaja sobre otros materiales, sus residuos pueden ser reciclados o reutilizados, en lugar de ser desechado en un relleno sanitario, lo que ayudará a asegurar un suministro continuo durante muchos años. (Vin, 2000)

El latón se caracteriza por ser la aleación de cobre más común, es el mejor material para la fabricación de muchos componentes debido a su combinación única de propiedades. Las aplicaciones del latón son muy amplias entre las que más destacan: joyería conocida como bisutería, elementos decorativos, campos de armamento, calderería, soldadura, fabricación de alambres, tubos de condensador, terminales eléctricas, elaboración de dinero en moneda. El latón es un buen conductor térmico y se utiliza para fabricar radiadores e intercambiadores de calor (aire acondicionado, enfriadores de aceite y los núcleos del calentador). (Vander, 1999)

Como no es atacado por el agua salada, se utiliza en la construcción de barcos, en equipos pesqueros, marinos, y en la fabricación de muchos instrumentos musicales de aliento, lengüetas sonoras para armonios, acordeones y registros de lengüetería para órganos musicales. Además, por su acción antimicrobiana, se usa en los pomos de las puertas en los hospitales, que se desinfectan solos a diferencia de los metálicos. (Mott *et al.*, 2006)

El latón no produce chispas por impacto mecánico, una propiedad atípica en las aleaciones, esta característica convierte al latón en un material importante en la fabricación de envases para la manipulación de compuestos inflamables. Por su

fácil mecanización y buen precio de recompra de las virutas se usa mucho para la fabricación de válvulas para uso industrial. Se utiliza en la fabricación de hélices de barco por su resistencia a la cavitación. (Fink *et al.*, 1984)

En el campo de fabricación de relojes, el latón es una aleación metálica excelente, ya que su fundición es más rápida que la del hierro. Adicionalmente la aleación es resistente a la corrosión y es maleable, por lo que puede tornearse con facilidad. (Lara, 2003)

Otra aplicación del latón está en el campo eléctrico en la fabricación de alambres, tubos de condensador, terminales eléctricas, esto gracias a la excelente resistencia a la corrosión del latón, lo que garantiza un tiempo de vida del producto indefinido, sin acumulación de óxidos de aislamiento y como consecuencia una mayor resistencia de contacto eléctrico. (Copper Development Association Inc, 1998).

La aleación cobre-zinc es usada además para fabricar tubos de latón de paredes delgadas, que se utilizan para separar componentes ópticos. Estos separadores tienen una superficie que reduce la reflexión en la calidad de la imagen. (Pancorbo, 2009)

Actualmente se usa al latón como material sustitutivo del plástico, en la elaboración de tapas. Inicialmente, el uso del plástico poseía grandes ventajas, debido a la aparente facilidad de sustitución, forma novedosa y la disponibilidad de decoración. Sin embargo los plásticos utilizados para la fabricación de tapas son susceptibles al agrietamiento por tensión, los revestimientos decorativos no son duraderos debido a la adhesión a la superficie causada por la expansión térmica. En el caso de las piezas de grifería elaboradas con latón están disponibles en tiendas de plomería al mismo precio de las plásticas, además existen una variedad de colores duraderos, texturas de la superficie y acabados. (Copper Development Association Inc, 2005). Un resumen se muestra en la figura 1.1, donde se visualizan los principales usos del latón.

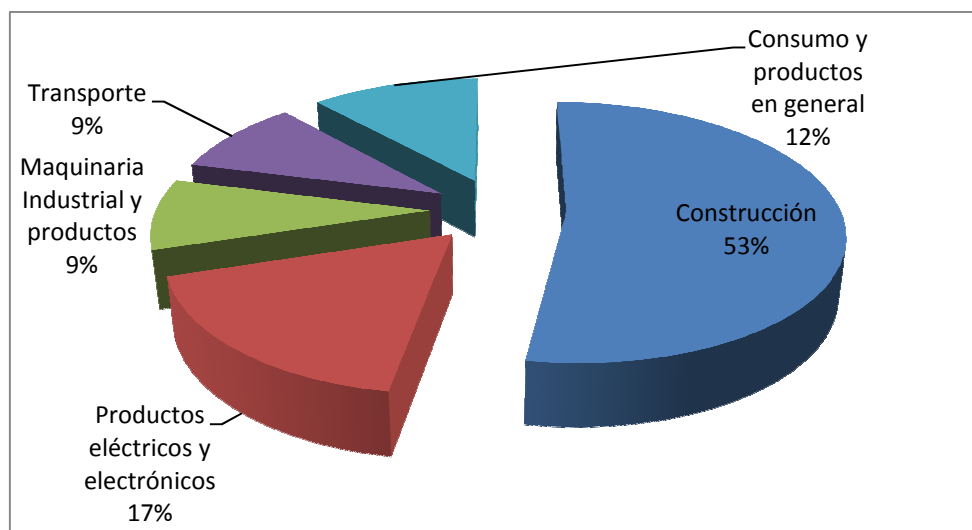


Figura 1.1. Principales usos de latón
(Copper Development Association Inc., 2005)

Los mercados de destino de consumo de latón durante el 2009 fueron: Colombia el que ocupó la primera posición con 31 % seguido de Bolivia 16 % y Estados Unidos con 13 %. A pesar que en estos países de destino se observa una disminución en sus valores de exportación, cabe resaltar que República Dominicana y Ecuador registraron una tasa de crecimiento de 58,7 % y 31 % debido que se registraron nuevas empresas exportadoras, quienes dirigieron sus exportaciones a dichos mercados. (Adex, 2009)

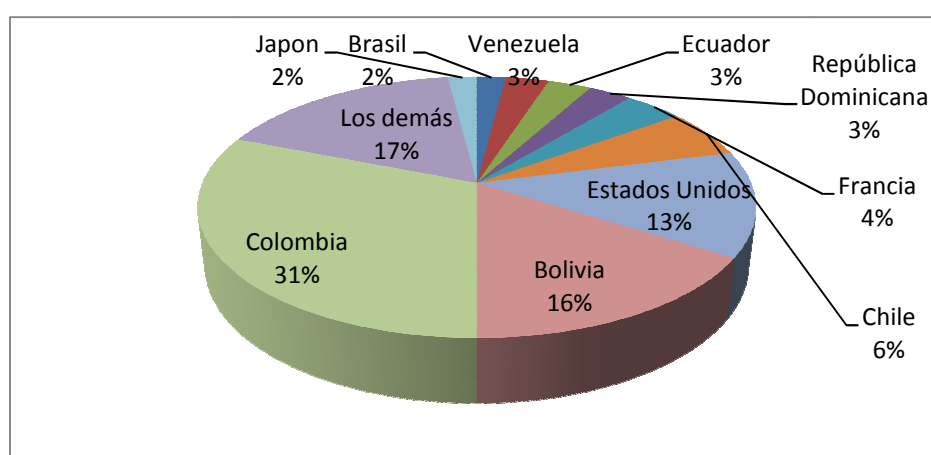


Figura 1.2. Principales países exportadores de latón
(Adex, 2009)

En la figura 1.3, se hace una comparación del costo de producción del acero inoxidable respecto al del latón. Como se puede ver, el acero inoxidable puede ser de dos a cinco veces más caro que el latón, debido a que los costos de mecanizado del acero son muy altos. (CDA, 1998)

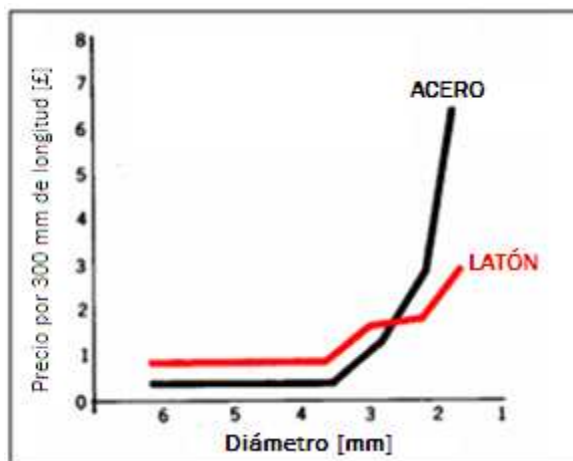


Figura 1.3. Comparación de precios de barra hecha de latón y acero
(Copper Development Association Inc., 1998)

El latón es la aleación más común para la fabricación de grifos y válvulas. Sus propiedades mecánicas varían enormemente en función de su composición y la forma de trabajo. Existen alrededor de 70 aleaciones distintas, cada una con características específicas. El latón de cartuchería 70/30 es el más conocido, se emplean para tubos, chapas finas y alambre. Otro latón usado industrialmente, es la aleación 60/40 conocida como Metal Muntz, además los latones especiales que gracias a la adición de pequeñas cantidades de otros metales mejoran las propiedades mecánicas de la aleación. Comercialmente no existen latones con contenidos de zinc superiores al 50 %, debido a la presencia de la fase que hace a la aleación muy frágil, lo que pierde el interés industrial. (Pancorbo, 2009)

1.1.1. PROPIEDADES FÍSICAS DEL LATÓN

El latón posee varias propiedades físicas que proporcionan un uso industrial en múltiples aplicaciones. Tienen una excelente resistencia a la corrosión que lo

convierte en una alternativa económica y natural en diversos campos. Adicionalmente es un buen conductor de calor, debido a esta propiedad el latón se utiliza para fabricar tubos y tuberías de extracción por arrastre con el clima. El latón es un metal fácilmente reciclable, cuyos residuos se pueden seleccionar con facilidad y volver a fundir cuantas veces sea necesario, pues casi el 90 % de residuos hoy son reciclados. (Guevara, 2003)

Tiene un color que puede variar de un marrón rojizo oscuro hasta un color amarillo claro y una densidad entre 8,4 y 8,7 g / cm³, depende de la cantidad de cobre y zinc presentes. Posee una temperatura de fusión alrededor de 980 °C inferior a la del hierro, los aceros, el bronce y el cobre puro, el aspecto brillante y dorado del latón, le confiere una especial belleza y no precisa en la mayoría de los caso ningún recubrimiento superficial ulterior. (Vásquez, 2001)

En la tabla 1.1, se presenta los puntos de fusión para el latón y para los principales metales que conforman esta aleación.

Tabla 1.1. Punto de fusión del latón y de los metales que lo conforman

Metales	Punto de fusión	
	°C	°F
Latón	955	1751
Cobre	1050	1980
Zinc	420	787
Plomo	340	650
Aluminio	635	1175
Estaño	240	450

(Kalpakjian y Schmid, 2002)

1.1.2. PROPIEDADES QUÍMICAS DEL LATÓN

En esta aleación no existe interacción química entre los metales componentes, sino solo una unión, esto debido a que la estructura cristalina del cobre es cúbica centrada en las caras y la del cinc es hexagonal compacta, en consecuencia, la

solubilidad del cinc en el cobre no puede ser completa. Pero, la diferencia de tamaño de ambos átomos es sólo del 4 %, permite así una gran solubilidad. (Xintao *et al.*, 2007 y Kempson, 2005)

El latón presenta alta resistencia a la corrosión que se atribuye principalmente a la presencia de una película superficial de oxo-hidróxidos de cobre cuya solubilidad está fuertemente ligada a la presencia o ausencia de iones cloruro en el electrolito. Asimismo, la disolución de dichos óxidos determina el tipo de mecanismo corrosivo predominante. En paralelo, la incorporación de zinc a la película pasiva del latón también afecta su resistencia a la corrosión. (Céré *et al.*, 1999)

1.1.3. PROPIEDADES MECÁNICAS DEL LATÓN

Las propiedades mecánicas del latón dependen principalmente del contenido de zinc. Esta aleación posee un algo grado de ductilidad y maleabilidad lo que permite producir láminas. Además se caracteriza por tener una buena resistencia mecánica y la dificultad de producir chispas por impacto mecánico una de sus propiedades más típicas. Se vuelve quebradizo cuando se calienta a una temperatura próxima al punto de fusión, su resistencia a la tracción de 350 MPa (N/mm²) y la resistencia a la compresión de 120 MPa (N/mm²). La deformación del latón es 100 % en flexión en caliente y un 30 % en frío. (Kempson, 2005)

En La figura 1.4, se aprecia que los latones pueden tener un porcentaje de zinc de hasta el 50 %, sobre este la aleación es frágil y quebradiza. El latón con un contenido de zinc del 40 %, da una aleación con buenas resistencias y excelentes propiedades de trabajo en caliente. Cantidades de zinc entre el 30 y 35 %, generan un producto con alta densidad y excelentes propiedades de trabajo en frío. (Pancorbo, 2009)

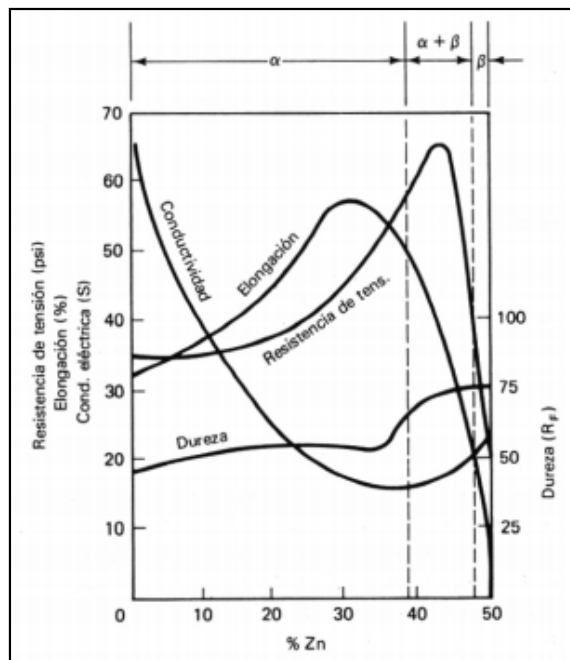


Figura 1.4. Influencia del incremento de Zinc en las propiedades de los latones
(Pancorbo, 2009)

1.1.4. DIAGRAMA DE FASE DE LATONES

Las aleaciones importantes de cobre y zinc desde el punto de vista industrial están comprendidas dentro de ciertos límites de contenido de zinc. (Morrall *et al.*, 2004).

Los latones comerciales contienen aproximadamente entre un 5 y 50 % de cinc. Por debajo del 35 % de Zn, el cinc se disuelve en el cobre para formar una solución sólida sustitucional de composición uniforme, estructura monofásica denominada fase α (Figura 1.5). Al aumentar el contenido de Zn es estable una nueva solución sólida más rica en Zn, denominada fase β . Entre el 35 % y 45 % de Zn coexisten las dos fases, α y β , son los denominados latones dúplex o alfa-beta. [Pankratov *et al.*, 2006 y Kempson, 2005]

El diagrama de fases Cu-Zn se caracteriza por tener: dos fases terminales (α y η) y cuatro fases intermedias (β , γ , δ y ϵ). Presenta cinco puntos peritéticos

invariantes y un punto eutectoide de la región de la fase intermedia δ , como se aprecia en la figura 1.5. El dominio de existencia de la fase β puede verse extendido o disminuido por el resto de elementos de aleación de los latones. Los elementos de adición afectan a la estructura y las propiedades de los latones α - β . El aluminio aumenta la resistencia a tracción máxima, la dureza y los efectos de la transformación de fases. Además el aluminio aumenta la resistencia a corrosión al formar una película de Al_2O_3 en la superficie. El hierro aparentemente es insoluble en las fases α y β , puede presentarse en forma de siliciuros. Las partículas de hierro aumentan la nucleación y recristalización y retarda el crecimiento de los granos, en este caso favorece el afino de grano. El silicio aumenta la resistencia a corrosión, la resistencia al desgaste, también aumenta la deformabilidad en frío y en caliente. El manganeso aumenta el límite elástico, la ductilidad y la resistencia a tracción. El níquel disminuye la tendencia de los latones a tener corrosión bajo tensión. Por último el plomo es un elemento particular que precipita a lo largo de los límites de grano debido a su baja temperatura de solidificación, es necesario para aumentar la maquinabilidad de los latones. (Rodríguez y Montesinos, 1991)

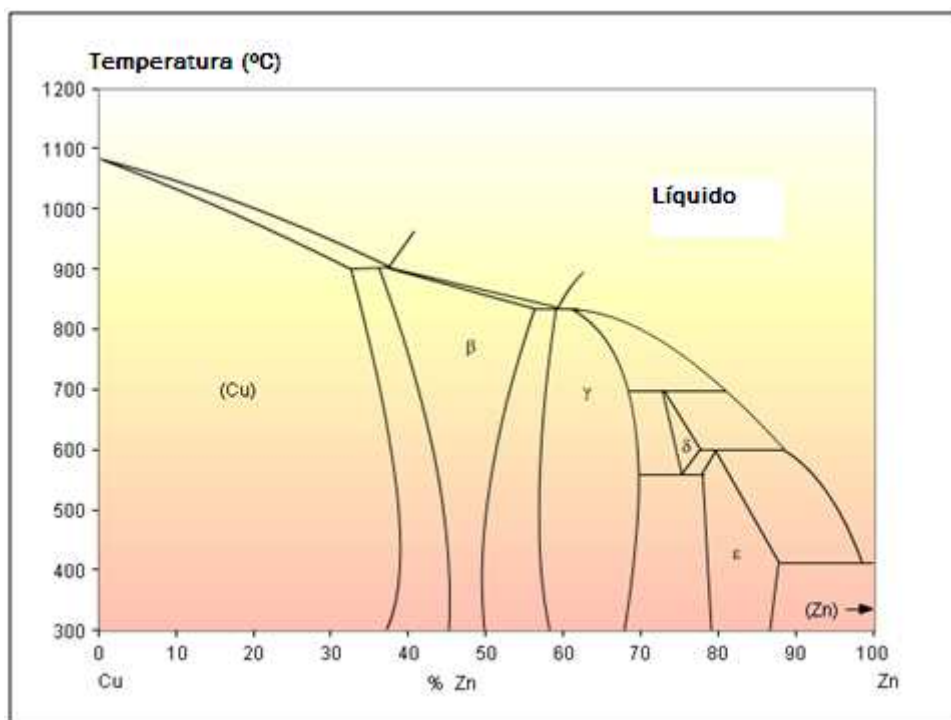


Figura 1.5. Diagrama de fases de Cu-Zn (latones)
(Copper Development Association Inc., 1998)

1.1.5. TIPOS DE LATÓN

Las aleaciones cobre zinc, comprenden una amplia zona de aleaciones que va desde un 45 al 95 % de cobre y el resto de zinc, con la adición de cantidades relativamente pequeñas de otros elementos como: estaño, plomo, manganeso, níquel, aluminio, silicio. (DeGarmo *et al.*, 1994).

1.1.5.1. Latones alfa

Los latones alfa, también denominados latones de trabajo en frío “cold working brasses”, contienen un mínimo del 63 % de cobre y cristalizan en el sistema cúbico centrado en las caras. Se caracterizan por tener gran ductilidad a temperatura ambiente, y puede ser deformado por laminación, embutición, cizallado, doblado de chapa, estirado de chapa, hilado, y laminado de rosca. (Pankratov *et al.*, 2006)

El mejor latón alfa es el conocido como 70/30 o bien latón “cartridge”, CuZn_{30} . Este latón tiene la combinación óptima de propiedades como resistencia a tracción, ductilidad, por eso es apto para trabajos en frío. Los fabricantes menos exigentes demandan aleaciones con mayor contenido de cinc (más económicas) como CuZn_{36} , esta aleación no es tan dúctil como CuZn_{30} , pero las propiedades mecánicas son similares. Se adecuan perfectamente a todas las operaciones de trabajo en frío. (Copper Development Association Inc., 2005) .

1.1.5.2. Latones beta

En la figura 1.5, se observa que la fase β esta centrada en el diagrama Cu-Zn. La fase beta es estable entre el 39 y el 55 % de Zn a 800 °C. Este rango decrece entre el 45 y el 49 % de Zn a la temperatura de 500 °C. (Manero y Gil, 2005)

En la Figura.1.6. se observa que la fase β' a 250 °C pasa a través de una reacción eutéctide, y forma α y γ . Pero los límites de esta reacción no están claros y se

necesita mucho tiempo para iniciarse reacción. En consecuencia, la fase β' puede considerarse estable a 20 °C. (Morral *et al.*, 2004)

La solución sólida β cristaliza en el sistema cúbico centrado en el cuerpo (BCC). Por encima de 470 °C los átomos de cinc se localizan al azar en la red. A temperatura elevada la energía térmica hace vibrar los átomos, al enfriar el material los átomos de cinc se colocan en posiciones preferenciales. (Manero y Gil, 2005)

Por debajo de la temperatura crítica (depende de la composición), los átomos se mantienen en la posición preferencial. Entonces la fase β se dice que esta ordenada (orden de largo alcance) y forma una superred. Esta fase ordenada se denomina β' . La estructura cristalina se muestra en la figura 1.6.

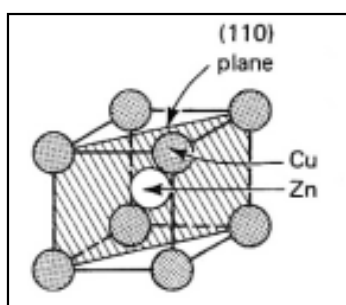


Figura 1.6. Fase β' para una composición equivalente de átomos cobre y zinc (Rodríguez y Montesinos, 1991)

La descripción del proceso del ordenamiento de la red cristalina es compleja y no se entiende bien en algunas aleaciones. En la figura 1.7, se pretende describir el proceso de ordenamiento de una aleación del 50 % de Zn, cerca de la temperatura crítica. La energía térmica hace vibrar los átomos y permite el movimiento de los átomos de un sitio a otro de la red. Este desplazamiento ocurre mediante el movimiento de vacantes. Por debajo de la temperatura crítica las vibraciones de la red no son suficientemente fuertes para superar la energía de atracción entre el cobre y el cinc. Entonces la configuración es estable.

Las regiones ordenadas actúan como núcleo de ordenamiento para aumentar la región ordenada. Estas regiones ordenadas se denominan dominios. La fase ordenada crece a partir de la fase desordenada. (Rodríguez y Montesinos, 1991).

La perfección del ordenamiento de los dominios se refiere al grado de ordenamiento. Si todos los dominios están ordenados el grado de ordenamiento es $S=1$, si solo unos pocos átomos se ordenan el grado de ordenamiento (S) esta entre 0 y 1. Cerca de los 250°C la fase β se unifica. Pero el grado de ordenamiento también esta influenciado por el tratamiento térmico.

Se tienen en cuenta dos características:

- Si el enfriamiento es rápido desde β sólo unos pocos átomos se podrán ordenar. Habrá muchos núcleos pero pocos átomos se habrán ordenado y no estarán los dominios en contacto, entonces la aleación estará localmente ordenada. [Pankratov *et al.*, 2006]
- Si el tamaño de los dominios es pequeño, habrá muchos límites de dominio, esto contribuirá en la resistencia a tracción. [Pankratov *et al.*, 2006]

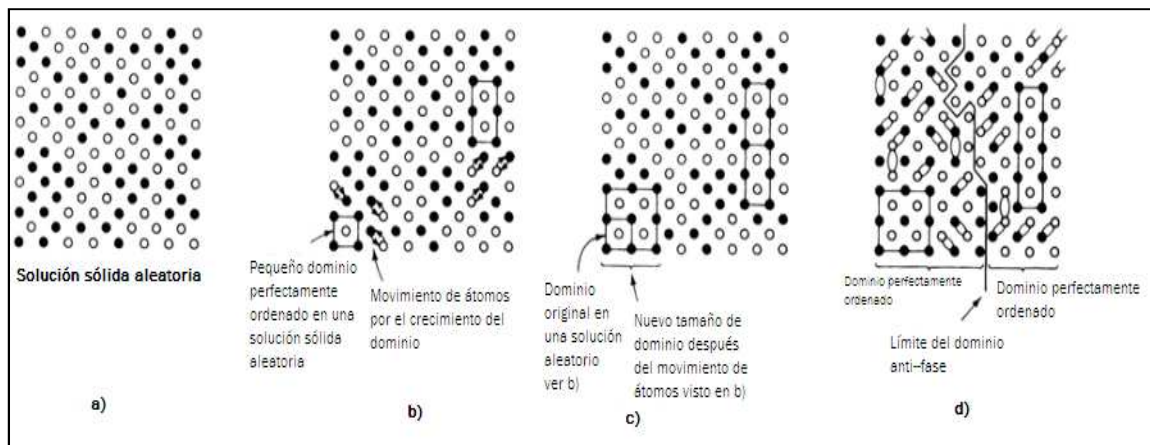


Figura 1.7. Ilustración esquemática del posible mecanismo de formación de los dos dominios
(Copper Development Association Inc., 1998)

1.1.5.3. Latones alfa-beta

Las aleaciones alfa-beta contienen entre el 38 y 42 % de cinc. A diferencia de los latones alfa, la capacidad de ser deformados a temperatura ambiente es limitada. Por el contrario, estos trabajan bien a elevadas temperaturas, pueden ser extruidos en barras o secciones complejas, en macizo o con agujero, y forjados en caliente en matrices cerradas. (Kempson, 2005)

La presencia de fase beta en latones alfa-beta, dificulta el trabajo en frío. Las aleaciones alfa-beta también son resistentes a la tracción y con mayor porcentaje de cinc son más económicas que los latones alfa. Pero son más susceptibles a la corrosión por descincificación. ordenados. (Molina, 2006)

El rango de temperaturas para el trabajo en caliente está entre 650 y 750 °C, mientras la fase alfa precipita (Figura 1.5.). En el mecanizado la fase beta favorece la fragmentación de la viruta en partículas pequeñas y proporciona buenas propiedades mecánicas. Estos latones están disponibles en barras extruidas, redondas y perfiles, abarcan un amplio rango de componentes y accesorios; accesorios para tubería, grifos, válvulas de radiador, aparatos de gas, ventanas y puertas. (Vander, 1999)




Las tolerancias se mantienen durante la manufactura, esto minimiza la necesidad de mecanizado durante la producción final del componente. Así se reduce la generación de virutas y se ahorra costos en el mecanizado.

La adición de plomo en estas aleaciones hace que durante el mecanizado se produzcan pequeñas virutas fáciles de eliminar de la superficie mecanizada así se mejora la maquinabilidad.

El latón presenta buena relación entre durabilidad y costo. Los latones presentan las siguientes propiedades físicas. [Pankratov *et al.*, 2006; Kempson, 2005].

En la tabla 1.2, se hace un resumen de los tipos de latones que se puede encontrar en el mercado y sus características principales.

Tabla 1.2. Resumen de los tipo de latones

Tipo de latón	Composición nominal [%]	Propiedades	Usos	Fotografía
Latones alfa	< 35 Zn	Maleable se puede trabajar en frío	Prensado, forja o aplicaciones similares	
Latones Beta	45-50 Zn	Fuertes, se trabaja en caliente	Aptos para colada	
Latones alfa-beta	35-45 Zn	Contiene fase α y β' , es cúbico. Se trabaja en caliente	Utilizado para las piezas de la máquina que deben ser resistentes a la corrosión.	

(Fernández, 2007)

La fase γ , es de carácter metálico y posee una estructura de cristales gigantes multiatómicos formados por 52 átomos. Las aleaciones con 50 % de zinc están formadas por este constituyente, son frágiles y muy duras por lo que a nivel industrial no tienen importancia. (Pancorbo, 2009)

La fase δ , $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$, es una estructura del tipo de γ del latón regular, mientras que la fase ϵ es una estructura ortorrómbica, y las aleaciones que tienen este componente, poseen un contenido de zinc del 82 al 88 %. La fase η , la conforman las aleaciones con un 97 a 100 % de zinc y presentan una disolución de cobre en zinc con distribución aleatoria. (Molina, 2006)

1.1.5.4. Latones especiales:

Los latones especiales se obtienen al añadir pequeñas cantidades de uno o más elementos a los latones simples, estos elementos pueden ser Aluminio, Niquel, hierro, estaño, manganeso, silicio, plomo, etc. Estas aleaciones se conocen como latones de gran resistencia a la tracción. La adición de estos elementos produce una variación en las solubilidades de las fases α y β , lo que despalaza el equilibrio del diagrama hacia la izquierda. Por lo tanto, desde el punto de vista microestructural, no aparecen fases nuevas, simplemente varía las proporciones

de éstas. con el fin de mejorar las propiedades mecánicas y aumentar la resistencia a la corrosión. Los elementos añadidos (Molera, 1991; Manero y Gil, 2005).

Los latones especiales son principalmente usados en la fabricación de tubos de condensadores, engranajes, tuberías para aire comprimido e hidráulica o perfiles arquitectónicos, tubos de evaporadores y de intercambiadores de calor. (Groover, 2001)

En la tabla 1.3, se describe los tipos de latones especiales existentes.

Tabla 1.3. Tipos de latones especiales

Nombre	Composición [%]	Características	Resistencia a la tracción [kg/mm ²]	Alargamiento [%]
Latones al aluminio	77,5 Cu; 19,8 Zn; 2,4 Al	Aumenta la corrosión y favorece la colabilidad	18	20
Latones al plomo	62 Cu; 35,5 Zn; 2,5 Pb	Reduce la resistencia mecánica pero mejora su maquinabilidad	15	7
Latones al manganeso	58 Cu; 38,5 Zn; 3,5 Mn	Aumenta a la resistencia a la tracción pero disminuye su ductilidad	30	10
Latones al estaño	91 Cu; 8,3 Zn; 0,7 Sn	Aumentan la resistencia a la tracción y a la corrosión.	18	20
Latones al silicio	58 Cu ; 39 Zn; 4 Si	Más fácil de fundir, aumenta la resistencia a la corrosión y a la tracción	35	30

(Calvo, 2001)

1.1.6. PRODUCCIÓN DEL LATÓN

Hasta mediados del siglo XIX el método usual de obtención del latón era la cementación del cobre metálico con óxido de zinc (método de calamina). Las condiciones termoquímicas en las que tiene lugar la cementación impone una limitación importante en la proporción de los elementos aleados, de modo que resulta imposible obtener latones cuyo contenido de zinc supere el 28% en peso. En este mismo siglo se inventa otro procedimiento que permite alear porcentajes de zinc mayores, aparece los latones estándar modernos con cantidades del 33% de zinc. Actualmente la obtención del latón se hace al mezclar el zinc y el cobre en un horno de reverbero o de cubilote, los lingotes solidifican por procedimientos de colada continua y centrífuga de altas velocidades, con esta técnica actual la concentración de zinc puede variar de acuerdo a las necesidades del mercado. (Luzón, 2003).

Primeramente, se calcula la cantidad de elementos aleantes como el cobre, el zinc, plomo, estaño, aluminio, etc. A continuación, se lleva a cabo el proceso de fusión en un horno de reverbero.

Primero se funde el cobre, debido a que es el elemento con el mayor punto de fusión, una vez que el cobre se encuentre en estado líquido, se añaden los elementos aleantes de alto punto de fusión como el níquel y el hierro, aunque poseen mayor punto de fusión que el cobre, estos elementos no se van a fundir en el cobre, sino que se disuelven en el mismo. Una vez disueltos estos elementos, se introduce el aluminio, cuyo punto de fusión es de 700 °C, es decir, no genera inconvenientes. Por último, se introduce el zinc que tiene un punto de fusión de 400 °C y un punto de evaporación de 600 °C. Cuando se tienen listas las muestras fundidas, se procede a la caracterización de los materiales.

En esta caracterización se hace análisis químico, pruebas mecánicas y metalografía del material. Una vez analizadas estas características, si el producto cumple con estas el producto es comercializado, caso contrario es reprocesado.

En figura 1.8, se detalla el proceso para la producción de latón a partir de cobre y zinc metálicos. (Copper Development Association Inc, 1998)

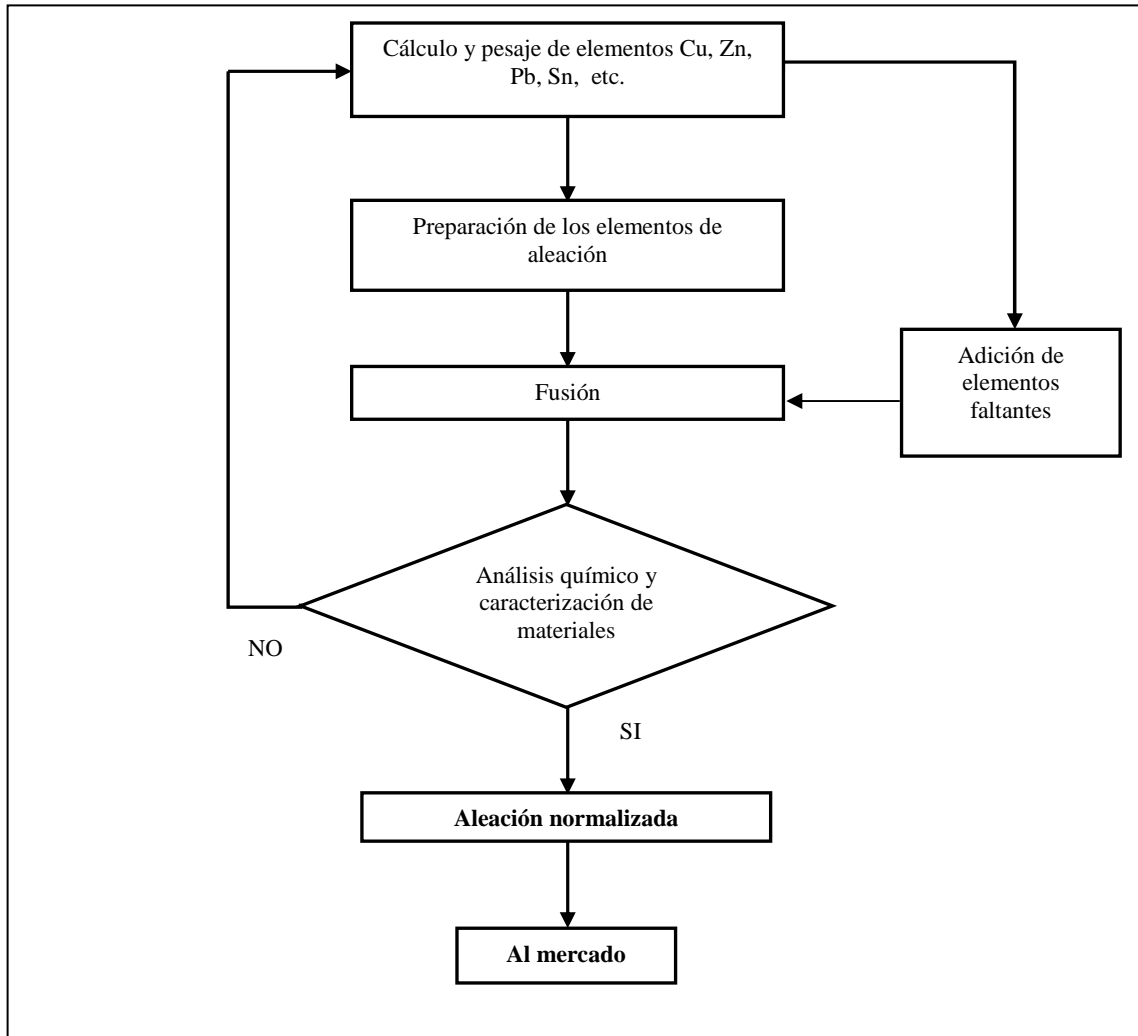


Figura 1.8. Esquema del proceso de producción de latón
(Copper Development Association Inc, 1998)

El reciclaje o producción secundaria de una material, se define como el sometimiento de un material en el ciclo de producción para ser reutilizados como materia prima. Existen dos tipos de reciclaje, el primario o de ciclo cerrado y secundario o de ciclo abierto. El reciclaje primario es el más deseable, es cuando el material desechado se recicla para producir nuevos productos del mismo tipo. (Castells, 2000).

El segundo tipo de reciclaje, se tiene cuando materiales de desecho se transforman en diversos productos para los que se deben encontrar usos. El reciclaje secundario es menos deseable puesto que la reducción de recursos es menor que en el primario, además realmente no se está recicla, se hacen otros productos que en un tiempo dado serán desecho. (Ramos, 2005).

El latón es una aleación, que como muchos metales se puede reciclar. Las razones para reciclar el latón son diversas, entre estas podemos mencionar: el precio, recursos limitados, la eficiencia energética y el medio ambiente. (Figueroa, 2003)

Los desechos de latón no se pueden fundir directamente, debido a que estos contienen una cantidad considerable de impurezas, por lo que se los debe someter a un tratamiento mecánico preliminar, el cual puede consistir de los siguientes procesos:

- Clasificación de los residuos de acuerdo a tamaño y calidad.
- Eliminación de impurezas mediante separadores automáticos.

Luego de la eliminación de las partículas no deseadas de los residuos por medio de separadores automáticos, se seca y se introduce en el horno de inducción de colada continua. Una vez fundida se corrige la aleación con adiciones de cobre o zinc.

Luego se procede a la extrusión y al moldeo de la barra, por último se endereza y se ajusta el tamaño de la pieza. En el caso de la elaboración de lingotes para grifería, se realiza en el horno de crisol móvil. La muestra fundida, es colocada en moldes, luego se enfria y se procede al desmoldeo de la pieza. Finalmente se obtiene dos productos con las características requeridas para su comercialización. (Metalgrup, 2010).

En la figura 1.9, se detalla un esquema del proceso que se lleva a cabo en la producción secundaria de latón.

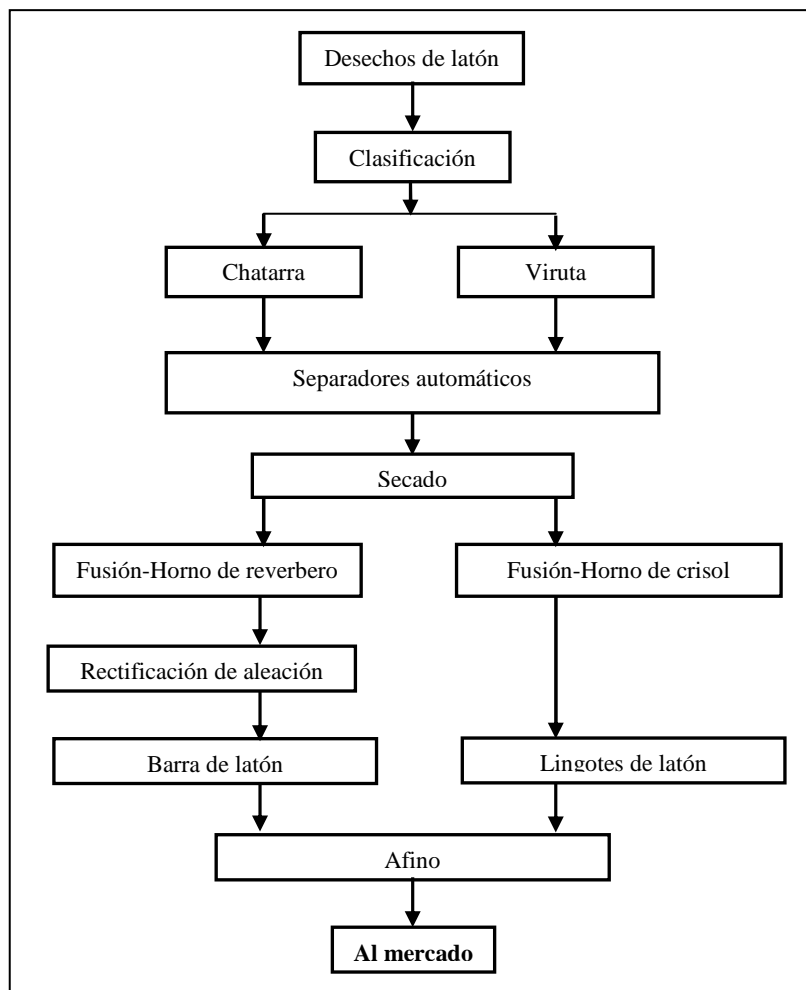


Figura 1.9. Esquema del proceso de reciclaje a partir de desechos de latón (Metalgrup, 2010)

1.2. RESIDUOS INDUSTRIALES Y SU RECICLAJE

1.2.1. RESIDUO INDUSTRIAL

Un residuo ya sea sólido, líquido o gaseoso, es cualquier sustancia, objeto o materia, generado durante el proceso productivo o de consumo. Entre los residuos, existen algunos que pueden presentar algún valor económico para terceros, como material reciclable y/o reutilizable que se denomina residuos valorizables y otros que no poseen valor económico y tienen como único destino la disposición final. (Nebel y Wright, 1999)

La industria genera una gran cantidad de residuos muchos de los cuales son recuperables. El problema está en que las técnicas para aprovechar los residuos y hacerlos útiles son caras y en muchas ocasiones no compensa económicamente hacerlo. De todas formas, aumenta la proporción de residuos que se valorizan para usos posteriores. (Nemerrow y Dasgupta, 1998)

1.2.2. RECICLAJE DE RESIDUOS INDUSTRIALES

En los últimos años ha aumentado en el mundo la generación de residuos industriales, de manera tal que causa un daño al medio ambiente y deteriorando la calidad de vida de sus habitantes. Hoy, su manejo sustentable permite comprobar que es posible incrementar la productividad y reducir drásticamente la generación de residuos o emisiones. Reciclar los materiales procedentes de residuos se ha convertido en una de las principales cuestiones a nivel económico y medioambiental. (Garrison, 1996)

El reciclaje es una transformación fisicoquímico o mecánico de los residuos, con el fin de obtener una materia prima o un nuevo producto, debido al agotamiento de los recursos naturales y para eliminar de forma eficaz los desechos. (Porter, 2002)

Reciclar implica una cadena que se explica a continuación:

- **Origen:** que puede ser doméstico o industrial.
- **Recuperación:** que puede ser realizada por empresas públicas o privadas. Consiste únicamente en la recolección y transporte de los residuos hacia el siguiente eslabón de la cadena.
- **Plantas de transferencia:** se trata de un eslabón voluntario o que no siempre se usa. Aquí se mezclan los residuos para efectuar transportes mayores a menor coste (usa contenedores más grandes o compactadores más potentes).
- **Plantas de clasificación (o separación):** donde se clasifican los residuos y se separan los valorizables.
- **Reciclador final (o planta de valorización):** donde finalmente los residuos se reciclan (papeleras, plásticos), se almacenan (vertederos) o se usan para producción de energía (cementeras, biogas, etc.). (Irasarri, 2006)

En la figura 1.10, se detalla el esquema de la cadena de reciclaje de los residuos.

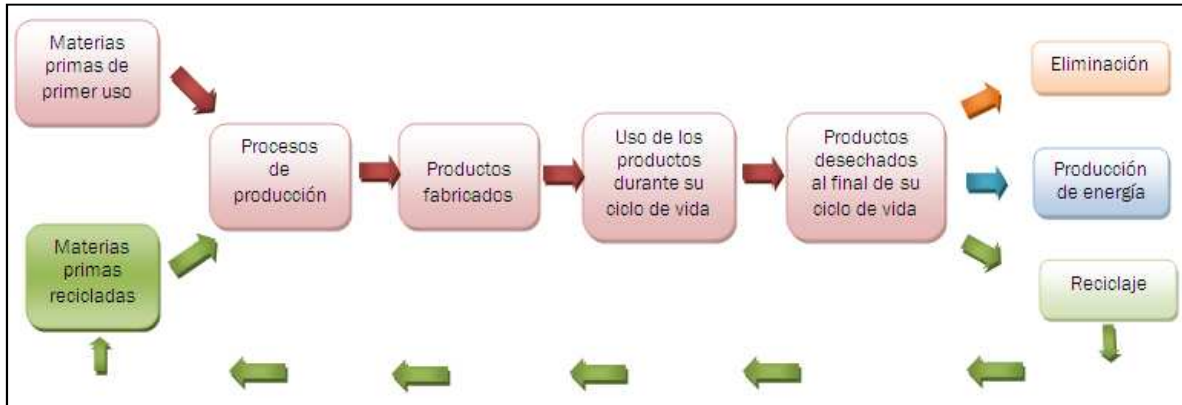


Figura 1.10. Cadena de reciclaje de residuos industriales
(Seoáñez, 2000)

1.2.1.1. Reciclaje de Metales

Los residuos metálicos pueden clasificarse en dos tipos generales:

- Metales ferrosos: residuos procedentes de la producción, transformación y uso del hierro y el acero.
- Metales no ferrosos: residuos metálicos con un alto contenido en aluminio, cobre, plomo, oro, platino o aleaciones de los mismos.

De acuerdo del tipo de residuo se procederá de una manera u otra, pero el proceso de reciclaje es el mismo, la fundición y todos ellos suponen un ahorro considerable de energía, materias primas y una reducción de emisiones de CO₂. (Veritas, 2008).

Los minerales como recursos limitados y no renovables son los que dan origen a los metales y sus derivados. La evolución que han tenido las reservas de metales como el Fe y Al presentan una situación tranquilizadora, no obstante es alarmante en el caso del Cu y Zn, se estima que el 26% del cobre y el 19% del zinc extraíble de la corteza terrestre se pierde actualmente en desechos no reciclados. Los precios actuales no reflejan esas pérdidas porque el suministro es todavía lo bastante grande como para cubrir la demanda, y además nuevos métodos han

ayudado a las minas a producir el material con más eficiencia, pero en el futuro los metales afrontarán agotamiento. (Riba, 2008)

Esto significa que la humanidad debe asumir el reciclaje en una escala mucho más amplia. De los metales que existen, la mayor parte pueden ser fundidos y volver a procesarse para crear metales. De los desperdicios que producimos diariamente, el 10% lo constituyen los metales. En la tabla 1.4, se detallan las reservas conocidas de varios metales.

Tabla 1.4. Reservas conocidas y vida previsible de Al, Cu, Pb y Zn

Metal	Reservas 1980-1989 (Millones de Toneladas)	Vida Estática (años)	Relación entre Reservas y Demanda Acumulada (1989-2000)
Al	22300	217	12.2
Cu	500	40	1.9
Pb	135	21	1.4
Zn	300	21	1.6

Seónez, 2000

El reciclaje de metales ha probado ser claramente beneficioso en comparación con cualquier alternativa de tratamiento, tanto desde el punto de vista económico como el medioambiental. (Seónez, 2000)

En el caso de acero, aproximadamente el 45 % producido en el mundo hoy deriva de chatarras, mientras que en los metales no ferrosos: 40 % del cobre, 30 % del zinc, 50 % del plomo y 25 % del aluminio derivan de sus respectivas chatarras.

La recuperación de metales no ferrosos tiene gran importancia por los siguientes motivos: algunos metales no ferrosos pesados son tóxicos en un amplio rango de organismos que el hombre, su disposición después del uso o como residuo en desechos desde operaciones de fundición puede causar contaminación de suelos y afectar suministros presentes y futuros de agua.

El reciclaje de metales reduce la necesidad de fuentes primaria y por ende a un significativo ahorro de recursos naturales. Esta reducción provee de un buen producto y beneficia al medio ambiente a través de menores demandas de

energía, además disminuye la contaminación de la propia fuente de energía, lo cual se traduce en ahorro económico en cuanto a materias primas y costos de disposición final. Esto es muy importante en regiones densamente pobladas como Japón y Europa. (Pardavé, 2006).

1.2.1.2. Reciclaje de latón

El latón está entre los materiales que han tenido una inmensa importancia en el desarrollo histórico de la humanidad, y claramente continúan teniéndolo. Es un material básico importante que optimiza la calidad de vida en casi todas las áreas del mundo de hoy en día. (Figueroa, 2003)

El latón puede ser reciclado de modo relativamente barato, con un bajo consumo energético y pérdidas mínimas. Pero también, otro criterio básico es el medioambiental. El reciclaje no sólo ayuda a conservar la materia prima y reducir los desechos, sino que ahorra hasta un 75% de la energía utilizada. El residuo de esta aleación es el metal que ya ha sido utilizado una vez y tiene la ventaja de estar presente bajo forma metálica en el medio. Con ello se evita el gasto energético del proceso de extraer, transportar, fundir y refinar el material, ya que la energía que se necesita para refundir y volver a refinar el residuo es menor. (Arlandis, 1999).

El latón, es la aleación en la que predominan el cobre y el zinc (alrededor del 80% y 20%, respectivamente), depende básicamente del reciclaje alcanzado por los componentes. El cobre tiene habitualmente una tasa de reciclaje del 42 % en Europa, mientras que el zinc, aunque podría recuperarse hasta el 100 % sin pérdidas de calidad ni de cantidad, globalmente es reciclado en un 30 %

Pues estudios de existencia de estos metales han demostrado que los recursos podrían no cubrir para siempre las necesidades de la población, incluso con una extracción completa de los metales de la corteza terrestre y con vastos programas de reciclaje. Se estima que el 26 % de cobre y el 19 % de zinc extraíbles de la corteza terrestre se pierde actualmente en desechos no reciclados, los precios

actuales no reflejan esas pérdidas porque el suministro es todavía lo bastante grande como para cubrir la demanda, y además nuevos métodos han ayudado a las minas a producir el material con más eficiencia. (Figuroa, 2003)

De acuerdo a la figura 1.11., en 1973 el uso de cobre en el mundo fue de 8,7 millones de toneladas, mientras que en 2000 fue de 15,1 millones de toneladas, con la existencia de una brecha de crecimiento de 6,45 millones de toneladas. En ese mismo año el cobre reciclado fue de 2,0 millones de toneladas. La producción mundial de cobre de mina este año fue 13,2, lo que sumado al reciclaje de chatarra, suma el uso del cobre ese año. Es decir, se recicló un 23,1 % de cobre. (Lagos, 2009)

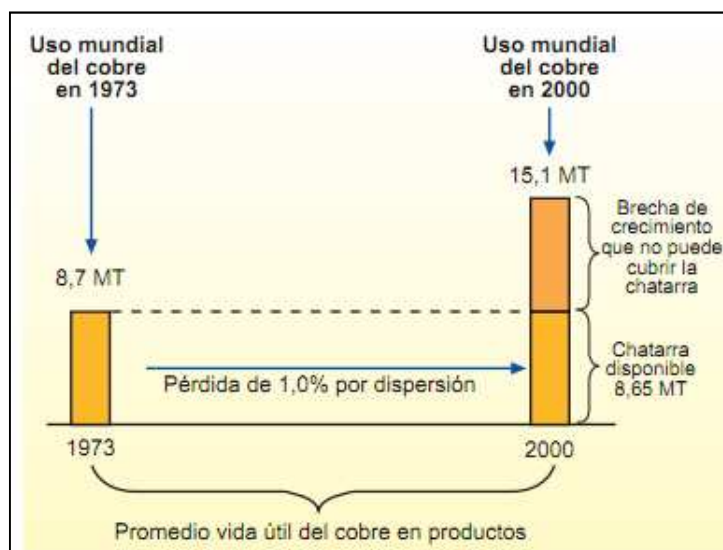


Figura 1.11. Uso mundial de cobre de los años 1973 y 2000
(Lagos, 2009)

El reciclaje es un segmento vital y creciente de la oferta total de cobre. De hecho, se estima que hasta un 40% de la demanda mundial anual de cobre es satisfecha con cobre reciclado. Mientras los restringidos ciclos de vida de los productos continúan en disminución los residuos en la fabricación de productos, el tonelaje de cobre reciclado continuará en aumento, esto es visible en la tabla 1.5.

Tabla 1.5. Uso mundial de cobre refinado y reciclado

Año	Toneladas de cobre Refinado	Toneladas de cobre reciclado
1949	3,0 millones	1,8 millones
1959	4,0 millones	2,5 millones
1969	7,5 millones	5,0 millones
1979	10,0 millones	5,8 millones
1989	11,0 millones	6,5 millones
1999	14,5 millones	7,5 millones

(Lagos, 2009)

Por otro lado el zinc también puede ser reciclado completamente, sin perder ninguna de sus propiedades físicas y químicas. Actualmente el 30 % del zinc consumido se obtiene del reciclado y el 70 % restante se origina en cuerpos mineralizados extraídos de minas.

El nivel de reciclaje aumenta a la par con el avance de la tecnología de la producción de zinc. Hoy en día se recicla más del 90% del zinc disponible para el reciclaje. (Escudero, 2006)

Se obtienen 600 000 toneladas de zinc solo de latón reciclado y se espera que para este año, los desechos de acero protegidos con zinc destinados para el reciclaje aumenten en un 50 %.

Los desechos provenientes del de productos de latón son los más usados para reciclar zinc, representan el 42 % del total de zinc reciclado. Los residuos provenientes del galvanizado el 27 %, luego con un 16% se encuentra los desechos de piezas de zinc fundidas a presión, el polvo de zinc filtrado por los hornos acerías con un 6%, al igual que las chapas de acero, y el porcentaje restante lo ocupan los compuestos de zinc, como se puede observar en la Figura 1.12. (Gardner, 2003)

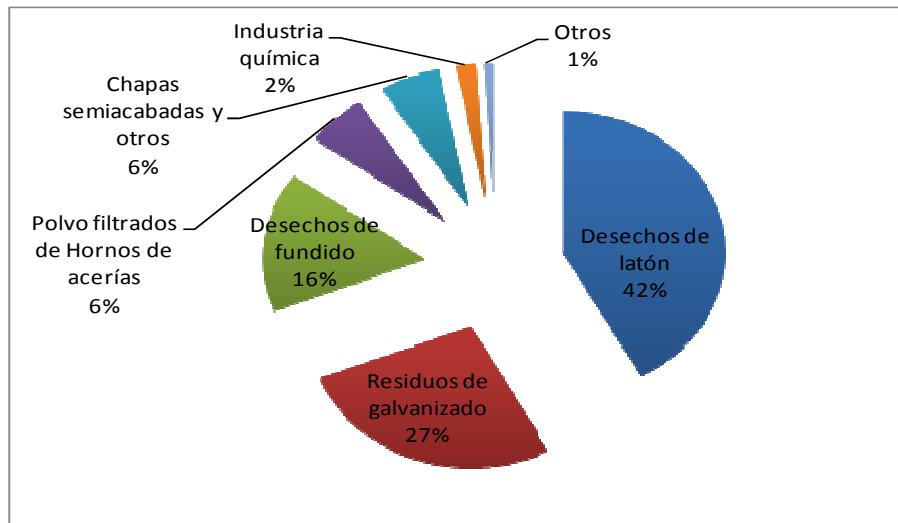


Figura 1.12. Fuentes de abastecimiento para el reciclaje de zinc
(Gardner, 2003)

La industria de la grifería es una de los principales consumidores de latón, debido a que la producción de accesorios de grifería es hecha básicamente de esta aleación. Como consecuencia, esta industria es una potencial generadora de residuos de latón. Existen numerosos procesos donde se producen estos residuos, como por ejemplo la zona de matricería (aquí se realiza el corte del material, torneado de las piezas), el área de tornería y el área de pulido. Estas tres áreas constituyen las principales fuentes de generación de residuos de latón. (Asamtech, 2009)

1.2.1.3. Origen de residuos de latón

- **Origen del residuo del proceso de acabado de piezas de grifería**

El proceso de acabado de piezas es efectuado por medio del granallado que es una técnica de tratamiento superficial por impacto a altas velocidades con microesferas. Estas microesferas son de acero colado, vidrio o cerámica. Es una verdadera operación de bombardeo en que un sinnúmero de microesferas de acero son lanzadas a alta velocidad contra la pieza con la cual se logra un excelente grado de limpieza y simultáneamente correcta terminación superficial.

De este proceso se obtiene como resultante polvo de la pieza metálica contaminado con partículas de hierro provenientes del granallado. [Hufnagel., 1992; Kalpakjian y Schmid, 2002].

En la figura 1.13, se muestra el proceso de granallado dado a piezas de latón, para el acabado superficial de la misma.

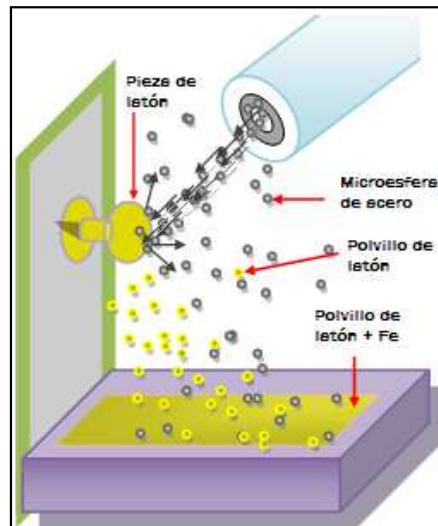


Figura 1.13. Mecanismo de operación del proceso de granallado de piezas metálicas (Asamtech, 2009)

- **Origen del residuo del proceso de pulido de piezas de grifería**

El proceso de pulido es un esmerilado fino de piezas redondas o planas realizado por medio de un abrasivo suelto, en polvo (material de pulir). La elección del material de pulir se rige por el material a trabajar y por la calidad superficial deseada, esta técnica elimina irregularidades superficiales, limpia y proporciona un acabado limpio y brillante, es decir una terminación final de las piezas metálica. El proceso mecánico, se produce mediante el rozamiento del agente pulidor y la pieza, que arranca virutas muy finas de la pieza y produce fibra de paño. [Schade., 1992; Gerling, 1992].

En la figura 1.15, se presentan una representación del proceso de pulido dado a las piezas de latón para dar brillo.

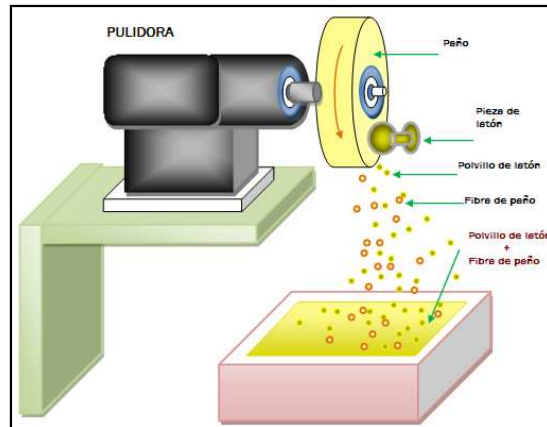


Figura 1.14. Mecanismo de operación del proceso de pulido de piezas metálicas (Asamtech, 2009)

1.3. MÉTODOS DE PURIFICACIÓN DE RESIDUOS DE LATÓN

La producción secundaria de latón se da a través de la recuperación de latón a partir de virutas y chatarra de la aleación. Para alcanzar la máxima recuperación de latón, eliminar impurezas, y clasificar por tamaños, se debe buscar la separación eficiente. Esto se logra mediante fragmentación, métodos de separación por tamaño de partícula o basados en propiedades físicas para la metalurgia recuperativa de la aleación. (Pardavé, 2005).

En el caso del latón no existe ventaja alguna en reprocesar sus residuos hasta cobre puro, por lo que se refunden en hornos rotatorios, de fusión o de inducción y se reformulan la aleación. Alguna refinación se hace por oxidación con aire para quitar aluminio, silicio y hierro como escoria, pero la oxidación debe controlarse estrechamente ya que el zinc que es un componente deseable, también tiende a oxidarse. El calor total necesario para la fusión del latón varía con la composición de la aleación, la cantidad de impurezas de la carga, el tamaño del horno y el grado de continuidad en su utilización. [Fink, *et al.* 1984 y Di Vita, 2004].

1.3.1. SEPARACIÓN MAGNÉTICA

La separación magnética es un proceso que sirve para separar dos sólidos que poseen diferencias en su susceptibilidad magnética, es decir, que responde en forma diferente ante la aplicación de un campo magnético. (Pávez, 2005)

Con base a esta propiedad los materiales se dividen en:

- Paramagnéticos: Son materiales que son atraídos por la aplicación de un campo magnético, por ejemplo: ilenita, hematita, pirrotita.
- Ferromagnéticos: Son materiales que experimentan alto paramagnetismo ante la aplicación de un campo magnético y retienen algún magnetismo cuando se alejan del campo (remanencia), alguno de ellos el hierro y la magnetita.
- Diamagnéticos: Son materiales repelidos por el campo magnético. Por ejemplo el cuarzo, feldespatos y dolomitas. (Pávez, 2005)

1.3.1.1. Principios de la separación magnética

La selectividad de la de esta técnica de separación, se basa en el balance de las fuerzas que interactúan sobre cada una de las partículas, estas son:

1. Fuerza magnéticas
2. Fuerzas gravitacional: a) Fuerza centrifugas b) Fuerza de fricción e inercia.
3. Fuerzas de atracción y repulsión.

La magnetización conocida también como imantación o imanación es un momento magnético dipolar por unidad de volumen. La magnetización se expresa en $[\text{Amp} \cdot \text{m}^2]$ o en tesla. En la mayoría de materiales, la magnetización aparece cuando se aplica un campo magnético a un cuerpo. En unos pocos materiales, principalmente en los ferromagnéticos, los valores de imantación pueden ser altos incluso en ausencia de campo magnético aplicado. (González y Bellver, 1999).

La imantación de una sustancia es el momento magnético que posee por unidad de volumen, cualquier sustancia sea cual sea su naturaleza puede imanarse al someterse a la acción de un campo magnético exterior suficientemente intenso, aunque la mayoría de los casos la imantación es insignificante. La susceptibilidad magnética es un coeficiente adimensional característico de la sustancia, dado por la ecuación [1.1.] (Sanchis, 1999).

$$J = \chi H \quad [1.1]$$

Donde:

J : intensidad de magnetización (vector); [gauss]; [oersted]; [emu/cm]; [A/m]

χ : susceptibilidad magnética

H : Campo magnético aplicado (vector); [gauss]; [oersted]; [emu/cm]; [A/m]

La relación entre la magnetización y el campo magnético aplicado se ilustra en la Figura 1.15, para minerales típicos ferromagnéticos, paramagnéticos y diamagnéticos.

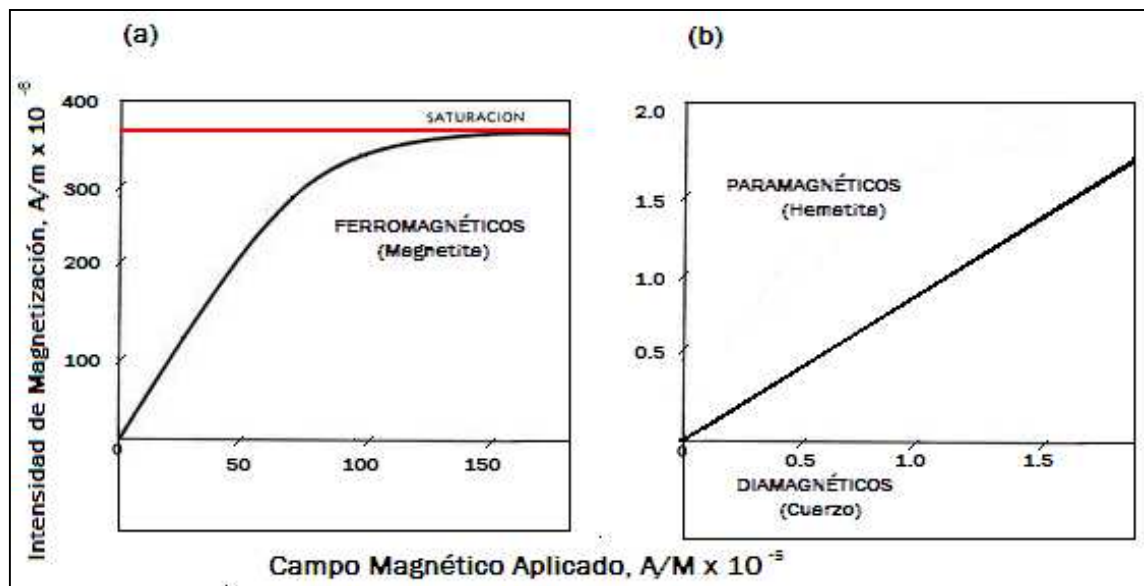


Figura 1.15. Curvas típicas de magnetización: a) Minerales ferromagnéticos b) Minerales paramagnéticos y diamagnéticos (Kelly y Spottiswood, 1990)

La pendiente de la curva de magnetización es la susceptibilidad magnética χ , se define como una pequeña constante positiva para materiales paramagnéticos y para los diamagnéticos y variable para los ferromagnéticos. La susceptibilidad magnética específica (χ_s) es la relación entre la susceptibilidad magnética (χ) y la densidad del material (ρ), como se muestra en la ecuación [1.2.]

$$\chi_s = \frac{\chi}{\rho} \quad [1.2.]$$

En un campo magnético aplicado la magnitud de ferromagnético cambia hasta que alcanza la magnetización de saturación. Si baja el campo magnético aplicado baja la magnetización pero no regresa a su valor original a tal proceso reversible se le llama histéresis. A la magnetización residual del material se la llama remanencia magnética. (Walker y King, 2007). En la tabla 1.6, se muestra la susceptibilidad magnética de algunos minerales

Tabla 1.6. Susceptibilidad magnética de varios minerales

Mineral	Susceptibilidad magnética (χ)*10 ⁻⁶	Susceptibilidad magnética específica (χ_s)*10 ⁻⁶ [cm ³ /g]	Magnetismo
Hierro (Fe)	80.000 – 100.000		Paramagnético
Cobre (Cu)		1,08	Diamagnético
Zinc (Zn)		1,8	Diamagnético

(Sanchis, 1999)

1.3.1.2. Procesos de separación magnética

Dada la influencia de la susceptibilidad magnética en la magnitud de las fuerzas que interactúan sobre cada una de las partículas a separar, se han desarrollado dos procesos de separación magnética, los cuales a su vez pueden ser llevados a cabo bajo diferentes condiciones (seco o en húmedo) a alta o baja velocidad, con el fin de promover la acción de algunos de los tipos de fuerzas sobre cada una de las partículas. (Walker y King, 2007)

- **Separación de baja intensidad**

Es un proceso utilizado para separar materiales ferromagnéticos o paramagnéticos de los diamagnéticos. Dado que la fuerza de magnetización que produce sobre cada una de las especies magnéticas (ferromagnéticas o paramagnéticas) es tan alta, se requiere que sobre las partículas actúen fuerzas como las hidrodinámica y la fuerza centrífuga, adicional a la fuerza de gravedad, con el fin de obtener un proceso suficientemente selectivo. Generalmente el proceso se realiza en medio húmedo y en equipos de tambor rotatorio. La intensidad de campo magnético (a 5 cm de la superficie del tambor) generalmente es de 0.05 [T]. (Chernicoff, 2001)

El mecanismo de operación de la separación magnética de baja intensidad, es descrito en la Figura 1.16.

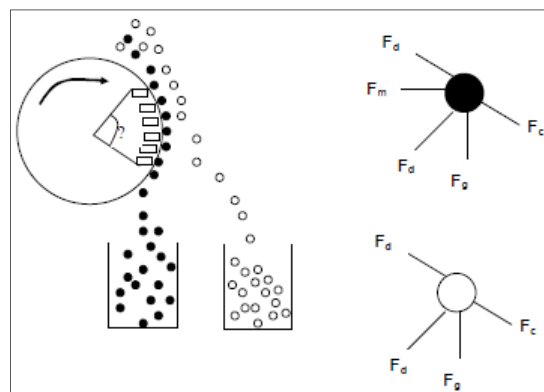


Figura 1.16. Mecanismo de operación de la separación magnética de baja intensidad (Chernicoff, 2001)

- **Separación de alta intensidad**

Este proceso generalmente se utiliza para separar especies paramagnéticas de diamagnéticas. Dado que la fuerza magnética que experimentan las partículas paramagnéticas es débil, este proceso suele realizarse en seco y en equipos no rotativos, con el fin de evitar las fuerzas hidrodinámicas y fuerza centrífuga, sin embargo cuando la especie magnética experimenta un paramagnetismo alto el

proceso puede llevarse a cabo en medio húmedo. La intensidad de campo (a 5 cm de la superficie del tambor) generalmente es de 2 T. (Chernicoff, 2001)

1.3.1.3. Equipos de separación magnética

Los separadores magnéticos pueden ser de tipo electroimán o imanes permanentes. Los electroimanes están dotados de energía con corriente directa, mientras que los imanes permanentes no requieren de energía exterior. En los separadores magnéticos se deben incorporar medidas necesarias para regular la intensidad de campo magnético y así permitir el tratamiento de varios tipos de materiales. Los equipos mencionados a continuación son los más conocidos. [Chernicoff, 2001; Alliende, 1996].

- **Separadores magnéticos por vía húmeda:** Los siguientes separadores magnéticos por vía húmeda son los más usados:
 - *Separadores de tambor por vía húmeda de baja intensidad*

Son los equipos usados comúnmente, son utilizados en la concentración de minerales de hierro ferromagnéticos y los separadores de alta intensidad se aplican en la separación de minerales débilmente magnéticos. Constan de un tambor rotatorio no magnético que contiene imanes estacionarios de polaridad alternada. En el mercado están disponibles los separadores de baja intensidad y los de alta intensidad. Las unidades de baja intensidad son fabricados con imanes permanentes y se recomienda para separar minerales fuertemente magnéticos como la magnetita, mientras que los equipos de alto gradiente son usados para minerales débilmente magnéticos contaminantes de minas de cobres o para la concentración de minerales magnéticos como la hematita. (Bermúdez, 2006). El principio de separación es el levantamiento. Los magnetos levantan las partículas magnéticas y las fijan al tambor, las transportan fuera de campo y dejan el resto en el compartimiento de las colas.

Un esquema del separador de tambor por vía húmeda, es el representado en la Figura 1.17.

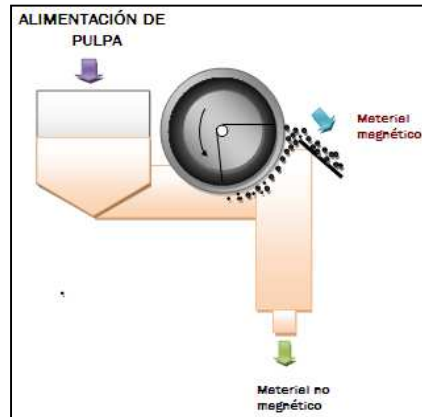


Figura 1.17. Separador de tambor por vía húmeda
(Bermúdez, 2006)

o *Separador de tambor tipo concurrente*

Este equipo se caracteriza porque el concentrado se lleva hacia adelante por el tambor y pasa a través de una abertura donde se comprime y desagua antes de dejar el separador. Este diseño es más efectivo para producir un concentrado magnético extremadamente limpio a partir de materiales relativamente gruesos. Se usa ampliamente en los sistemas de recuperación de medios densos. (Brewis, 2000)

o *Separador magnético tipo contrarrotación*

Se caracteriza porque la alimentación fluye en dirección opuesta a la rotación. Se usa en operaciones primarias, donde ocasionalmente se deben manejar variaciones en la alimentación. Este equipo se caracteriza porque el concentrado se lleva.

o *Separador magnético de alta intensidad en húmedo*

La separación difiere de los otros tipos mencionados anteriormente. El mineral generalmente fluye a través de una matriz de material ferromagnético formado que ha sido magnetizado por un campo magnético producido externamente. Algunos tipos representativos de material matriz son: platos ranurados,

esferas de acero y lana de acero inoxidable. Estos separadores son muy importantes desde el punto de vista económico y tecnológico, pues la posibilidad de tratar grandes volúmenes de materiales débilmente magnéticos.

- **Separadores magnéticos por vía seca**

- *Separadores magnéticos de banda transversal de alta intensidad*

El separador magnético de banda transversa atrae al material magnético y los quita de la cinta de alimentación descargándolos en un lado. La concentración es por elevación directa y el producto magnético es limpio y libre de materiales no magnéticos. El equipo es principalmente utilizado para la recuperación de minerales finos no magnéticos desde relaves magnéticos, concentración de minerales no magnéticos a partir de minerales magnéticos. En la figura 1.18, se muestra el esquema de este equipo.

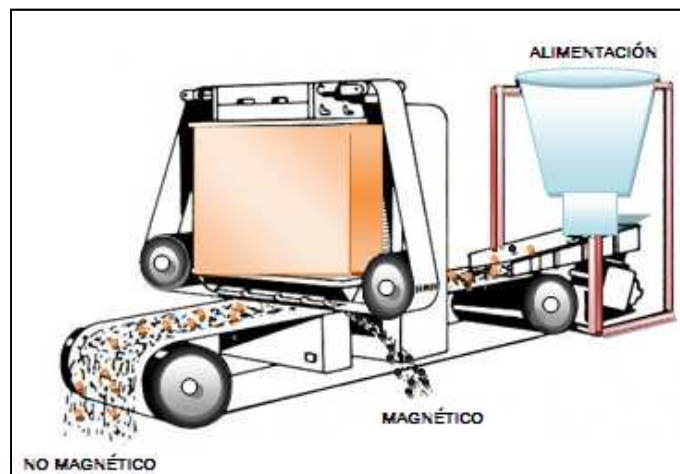


Figura 1.18. Separador magnético de banda transversal de alta intensidad
(Brewis, 2000)

- *Separador magnético de rodillo de alta intensidad*

Este equipo es usado tanto en operaciones de purificación como de concentración. Pueden ser aplicados en la concentración de minerales pesados tales como ilmenita, monacita y granada a partir de arenas de playa,

remoción de cromita y pirrotita en concentrados diamantíferos o en concentración misma de cromita, wolframita, titanio, rutilo y manganeso. (Brewis, 2000). En la figura 1.19, se muestra el esquema de un separador magnético de rodillo inducido, de tres etapas.

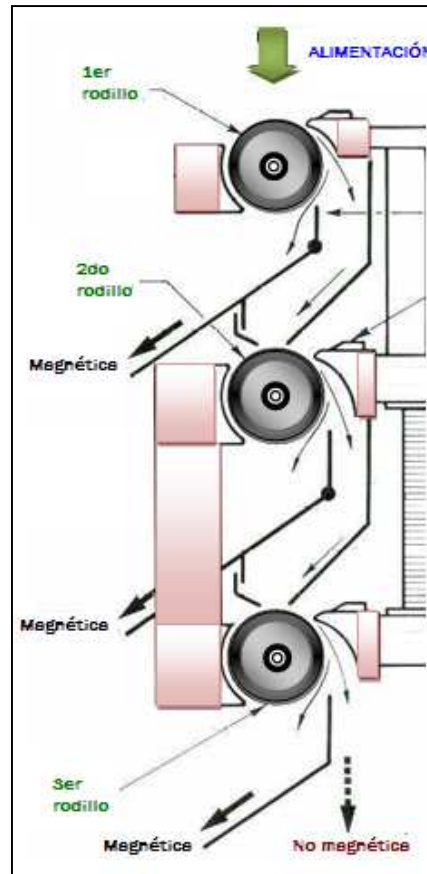


Figura 1.19. Esquema de un separador magnético de rodillo inducido de tres etapas (Brewis, 2000)

o *Separador magnético de tambor de baja, mediana y alta intensidad*

La base de operación de este tipo de separadores es el uso de la fuerza magnética y la fuerza de gravedad. Son empleados para la concentración de minas de hierro magnetíticos, purificación de escorias finamente molida, arenas de fundición y materiales en la industria del cemento. Estos aparatos son muy eficientes para la separación de materiales ya clasificados en rangos granulométricos más estrechos, separan materiales tamaños de partícula gruesos y muy finos. (Gaspar, 1998).

- **Separadores magnéticos por corriente de Foucault**

Es uno de los equipo de separación magnética más utilizados en el mundo hoy en día. Este separador es avanzado y capaz de separar residuos domésticos e industriales en tres contenedores individuales: material no-ferroso, material ferroso y material no metálico. Es muy común su utilización en el mercado de la clasificación de latas, ya que permite separar el aluminio del acero. Según la aplicación hay dos tipos de separadores disponibles: un rotor de elevada resistencia para separaciones especializadas y un rotor estándar para separaciones menos complejas como lo es la separación de latas. (Tipler y Mosca, 2005).

El principio de funcionamiento de este dispositivo se ilustra en la figura 1.20 y se basa en un rotor que gira a alta velocidad dentro de un tambor no metálico más lento que se encuentra rodeado por una cinta transportadora especial que transporta el producto que se va a separar hasta el campo de corriente de Foucault. Este campo produce entonces la levitación del material no ferroso (como el aluminio), dejando que el material no metálico o inerte (como el plástico) caiga libremente por el extremo y que el material ferroso (como el acero) siga circulando por la cinta hasta que sobrepase el rotor. De esta manera quedan clasificados los diferentes materiales en tres compartimentos diferentes a través de una única selección. (Pérez *et al.*, 2003).

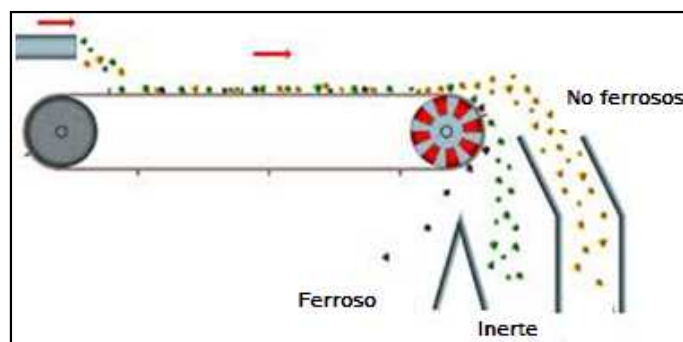


Figura 1.20. Principio de funcionamiento de separador de corrientes de Foucault
(Pérez *et al.*, 2003)

1.3.2. SEPARACIÓN POR TAMIZADO

La separación por tamizado es un método físico para separar partículas sólidas de acuerdo a su tamaño. Esta operación depende la cantidad de partículas alimentadas, frecuencia de vibración y el tiempo de tamizado. El tamizado puede realizarse en seco (material en polvo) o en húmedo, se efectúa con adición de agua. [Orozco, 2005; Seoáñez, 2000].

La separación por tamaño de materiales es una de las opciones más usadas a nivel industrial. Estos equipos separan mediante mallas sostenidos en bandejas al material de tamaño superior a la abertura de la malla (sobre tamaño) de aquel de tamaño inferior a la misma (bajo tamaño). [Ponce *et al.*, 2003 y Cobba, 2008].

Las principales funciones del harneo en el procesamiento de minerales son:

- Evitar la entrada del bajo tamaño a los chancadores, con el fin de incrementar su capacidad y eficiencia.
- Evitar que el sobretamaño pase a una próxima etapa de conminución.
- Preparar una alimentación, en un rango granulométrico estrecho, para algún proceso de concentración posterior.
- Generar un producto final de granulometría estricta, en aquellos casos donde el tamaño es parte importante de la especificación del producto

En general los procesos de clasificación son procesos probabilísticos, es decir, dependen de una conjugación de efectos de "n" variables para poder efectuarse. En el caso del tamiz, se pueden mencionar: Tamaño de la partícula, forma de la partícula, abertura disponible, enfrentar la superficie, humedad del material y densidad aparente. (Ponce *et al.*, 2003)

La probabilidad de separación de una partícula, es una función de la relación entre su tamaño y la separación de la malla. Cuanto mayor sea la diferencia de tamaño, mayor será la probabilidad que las partículas pasen o sean rechazadas.

El efecto de la forma de la partícula es muy importante en el "tamaño crítico" ya que este corresponde a un tamaño muy cercano al tamaño de las aberturas. La

probabilidad de que éstas partículas sean clasificadas como sobretamaño o bajotamaño dependerá principalmente de que la partícula se presenta a la abertura en la orientación adecuada. (Ponce *et al.*, 2003)

Una propiedad importante de cálculo del equipo de tamizado es la capacidad, es recomendable que el largo sea el doble que el ancho. El área del tamiz depende de las características del material y de las características propias del tamiz y se calcula mediante un método empírico para la selección de harnero, una vez determinado el flujo del harnero en toneladas cortas / hora, la fórmula [1.3], es básica para calcular el área del harnero. (Nicoli, 1999).

$$\text{Área [ft}^2\text{]} = \frac{\text{Alimentación-Sobretamaño}}{a*b*c*d*e*F} \quad [1.3]$$

Donde

Sobretamaño: es el rechazo

- a*: corrección por la forma de las aberturas.
- b*: representa el porcentaje de alimentación al deck que es la mitad del tamaño de la abertura de la superficie de harneado.
- c*: representa el factor de corrección obtenido para una eficiencia del tamiz del 94%, con un valor de 1.
- d*: corrección por el material fino a alimentar
- e*: corrección por la posición del tamiz en el sistema.

Los factores de corrección a, b, c, d, e y f, son sacados de tablas, de acuerdo a las características del material a tratar. [Ponce *et al.*, 2003 y Cobba, 2008].

Otros fabricantes, por ejemplo la Asociación de Fabricantes de Harneros Vibratorios, VSMA, emplean formulaciones parecidas, además de las tablas o gráficas para seleccionar los factores. La profundidad del lecho es importante y se determina de acuerdo a la ecuación [1.4]. Debe cumplirse que el espesor del lecho sea menor que cuatro veces la abertura del tamiz (Ponce *et al.*, 2003)

$$ELD = \frac{O^4 * D}{5V * W}$$

Donde:

ELD = espesor del lecho del material en la descarga

O = material con sobre tamaño [toneladas cortas/hora]

D = densidad [toneladas cortas/pie³]

V = velocidad del material sobre el harnero [pies/minuto]

W = ancho de la superficie de cribado [pies]

La eficiencia de un tamiz está determinado por el grado de perfección de la separación del material en dos fracciones: material grueso y material fino. Si se considera que el sobre tamaño es el producto, el harnero debería ser capaz de sacar todo el material de tamaño menor a la abertura, pero ningún equipo es comercialmente capaz de hacer esto. La eficiencia de material removido de bajo tamaño en %, sería 100 menos el % de bajo tamaño contenido en el que sale junto al de sobre tamaño. La eficiencia sobre tamaño es % de sobre tamaño en la alimentación por 100 /(%que pasa a la descarga del deck). (Ponce *et al.*, 2003)

El tamiz vibratorio es uno de los equipos más usados en lo que se refiere a tamización, por lo que se ocupa para separar terrones, grumos e impurezas de la materia prima en operaciones de transporte por vacío de polvos.

Los principios de separación por tamaño de material, para tamices vibratorios, son básicamente los mismos en cualquier aplicación. El material a ser cribado, cuando es lanzado sobre la caja de alimentación o directamente sobre la malla de cribado, pierde su componente de velocidad vertical y cambia la dirección de su movimiento. Bajo el efecto de la vibración, la capa de material tiende a desarrollar un estado fluido.

- **Estratificación**

Este es el proceso en el que por el efecto del movimiento vibratorio, las partículas gruesas suben a la parte superior de la capa de material y las más pequeñas buscan su camino hacia la capa inferior de la capa a través de los espacios

creados entre las partículas gruesas. Los factores que afectan la estratificación son:

- o Velocidad del flujo de material: es función del espesor de la capa, características de la carrera, e inclinación de la criba.
- o Características de la carrera: amplitud, dirección, rotación, tipo de movimiento y frecuencia.
- o Humedad superficial de las partículas: un alto contenido de humedad dificulta la estratificación. (Bearman, 2006)

En la figura 1.21, se representa un esquema del proceso de estratificación producido durante el tamizado.

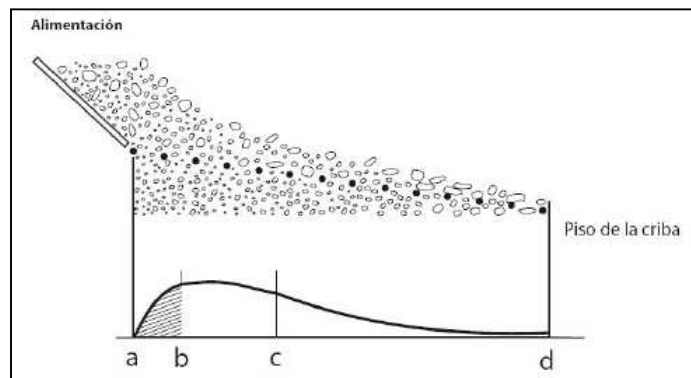


Figura 1.21. Representación del proceso de estratificación (Bearman, 2006)

En el proceso, existen tres zonas muy visibles: la zona (a-b), representa la estratificación junto a la extremidad de alimentación, la (b-c), zona donde el cribado está saturado y la (c-d) existe separación por tentativas repetidas.

- **Movimiento de vibración**

El movimiento de vibración se produce a través de mecanismos vibrantes basados en masas excéntricas con amplitud de 1,5 a 5 [mm] operando dentro de un rango de 700 a 1000 RPM. (Bearman, 2006)

Para una buena calidad de separación, se necesita una buena relación entre amplitud y frecuencia. Es deseable que cuanto el material se traslada sobre la

criba las partículas no caigan en la misma abertura al mismo tiempo y que no salten varias aberturas. Por eso, se debe tener en cuenta: aberturas mayores: mayor amplitud-menor velocidad, aberturas menores: menor amplitud-mayor velocidad. En la figura 1.22, podemos apreciar los distintos tipos de cribado

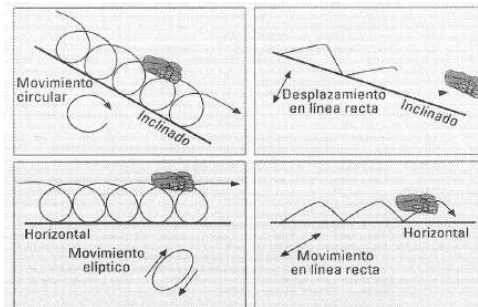


Figura 1.22. Tipos de cribado

Para tamiz seco la selección del vibrador debe ser de dos o cuatro rodamientos (golpe positivo), ambos tienen un buen comportamiento pero la unidad de cuatro golpe a dos veces la amplitud de oscilación. La dirección de los vibradores puede ser a favor o contra flujo del material. Los proveedores recomiendan un la vibración respecto del tamiz. También los fabricantes proporcionan tablas donde recomiendan la longitud del golpe en pulgadas en función del rango de pendiente del deck; la velocidad nominal en rpm del vibrador y el rango de abertura del tamiz, en malla o pulgadas. El sistema de vibración, es el corazón del equipo y genera la fuerza de excitación que da el movimiento oscilatorio. La fuerza de excitación es proporcionada por los contrapesos y es igual a la masa excéntrica por el radio de excentricidad proporcionada por la velocidad al cuadrado. En modelos horizontales se prefiere el movimiento lineal y en los inclinados el elíptico o circular. (Ponce *et al.*, 2003)

1.3.3. FUSIÓN

El ensayo al fuego es un proceso físico que consiste en el cambio de estado de un cuerpo sólido, del estado sólido a líquido por acción del calor. Los cuerpos sólidos se derriten y licuan para lograr la fundición. Cuando la sustancia se encuentra a su punto de fusión, el calor que se suministra es absorbido por la

sustancia durante su transformación y no produce variación de su temperatura, este calor adicional se conoce como calor de fusión. Este proceso requiere cuidado, precisión y técnica. (Groover, 1997).

El punto de fusión de una sustancia es la temperatura a la cual la materia cambia su estado sólido a líquido. Esta temperatura es relativamente insensible a la presión. El punto de fusión de un elemento puro es siempre más alto que el de una impura. Cuanto más elementos tenga una material más bajo es el punto de fusión. Los materiales que se introducen el horno son el metal base, fundentes y formadores de escoria. (Rodríguez *et al.*, 2006)

1.3.3.1. Agentes Fundentes

Los agentes fundentes son productos químicos utilizados en fusión de minerales, para eliminar gases disueltos e impurezas. Algunas de las funciones principales de estos agentes son: disminuir el punto de fusión, eliminar parte de la escoria del propio proceso de fusión, disminuir la temperatura de fusión o de formación de sustancias de alto punto de fusión para facilitar el proceso, reaccionar con ellos y permitir la extracción de los componentes nocivos o indeseables presentes en las materias primas durante la fundición de metales, disolver las capas de óxidos en las superficies metálicas y posteriormente evitar su formación durante la soldadura y formar una atmósfera protectora inerte para evitar la formación de compuestos químicos indeseables en las superficies fundidas de los metales u otras sustancias en el proceso de soldadura. (Stephens y Meyers, 2006).

La elección del fundente es tan importante como la elección del material de aporte. Utilizar un fundente incorrecto o una técnica de aplicación pobre, puede tener un efecto contraproducente en la calidad de la fusión. Cuando el material de aporte funde, desplaza al fundente ya que la atracción entre el metal base y el de aportación es mayor que entre el fundente y el metal base. Si la superficie del material a altas temperaturas tiende a oxidarse debido a la falta de fundente o a un fundente inadecuado, el fundente saturado de óxidos aumenta su viscosidad y

no puede ser completamente desplazado por el material de aporte. (Kalpakjian y Schmid, 2002).

Usualmente, la adición de los agentes fundentes se realiza de manera manual. La mayor parte de estos compuestos se aplican en la superficie del baño de latón y se agitan en la mezcla, sin embargo, existen casos donde es más efectivo sumergir un reactivo hasta el fondo del metal fundido a través de una campana perforada, limpia y precalentada. También, se pueden inyectar los reactivos en forma de polvo a través de una corriente de gas inerte. A continuación se indican los fundentes más utilizados y conocidos:

- **Fundentes de Cobertura**

Este tipo de fundentes crea una barrera líquida entre la atmósfera del horno (las flamas) y el metal fundido. Esta barrera protege al metal líquido de la oxidación y ayuda a evitar la absorción de hidrógeno. Además, estos reactivos se encargan de mejorar la aglomeración de las gotas del metal formadas durante la fundición. Una de sus características es su temperatura de fusión que oscila entre los 420 a 600 °C. En el mercado se encuentra fundentes líquido- sólido, que forman una buena barrera de protección con la atmósfera de los hornos con poca interacción química con los refractarios de los hornos. (Kalpakjian y Schmid, 2002)

Generalmente, los fundentes de cobertura empleados para cubrir los metales no ferrosos y sus aleaciones, son las sales de cloro como el cloruro de potasio (KCl), cloruro de sodio (NaCl), cloruro de magnesio (MgCl₂), etc. Estos compuestos tienen la ventaja de que pueden trabajar eficientemente a condiciones altamente oxidantes ($T > 775$ °C). (Kopeliovich, 2009)

- **Fundentes de Escoreo**

Los fundentes de escoreo sirven para retirar la escoria del metal fundido. Esto se lleva a cabo mediante la exotermicidad controlada del fundente, el calor que se genera mejora la "mojabilidad" de la escoria y se produce un efecto de

coalescencia que hace que las pequeñas gotas de metal escurran y formen gotas más grandes que fácilmente se separan de la escoria para integrarse al metal base. Es importante en estos fundentes que la exotermicidad no sea excesiva ya que parte de esta reacción se lleva a efecto en un medio oxidante que en exceso puede oxidar las gotas de metal que queremos recuperar ó incluso oxidar metal de la interfase con la escoria. (Groover, 1997)

- **Fundentes de Limpieza**

Los fundentes de limpieza tiene como objetivo principal el de ayudar a eliminar los óxidos del metal un fundente diseñado específicamente para la limpieza del metal promueve una escoria ligeramente menos seca que un fundente de escoreo ya que su función es reaccionar en el seno del metal y no tanto en la escoria que se encuentra en la superficie. Todos los fundentes deben ser agitados enérgicamente con la escoria ó con el metal para que se establezca un contacto íntimo y se lleven a cabo las reacciones buscadas y los efectos deseados, bien sea en la escoria ó en el metal, por lo que se recomienda contar con las herramientas necesaria para llevar a cabo la agitación del fundente al momento de la adición. (Houldcroft, 1990)

- **Fundentes de limpieza de paredes**

Estos fundentes están diseñados para ablandar y ayudar en la eliminación de las aglomeraciones de óxidos sobre las paredes de los hornos que tienen a reducir la capacidad de los hornos y “ensuciar”, dada la gran exotermicidad de estos productos no se recomienda agregarlos a la escoria del metal. Es muy importante agregar el fundente de limpieza de paredes con equipo de protección adecuado pues el error más común en la limpieza de paredes es agregar poco fundente y no escoriar lo suficiente, lo que provoca que queden muchos óxidos en el seno del metal, y estos se incrementaran con las fusiones subsecuentes. [Stephens y Meyers, 2006; Kalpakjian y Schmid, 2002].

- **Fundentes especiales**

Los fundentes especiales, suelen ser inyectados al metal para diversos propósitos. El ejemplo más ilustrativo de este tipo de aplicaciones son los equipos de inyección de fundente que cuentan hasta con tres depósitos de fundente con los que se lleva a cabo una limpieza profunda del metal, después una modificación de la aleación y por último una refinación de grano, todo ello al inyectar fundente durante el periodo de desgasificado. (Kalpakjian y Schmid, 2002)

En la Tabla 1.7 se muestran los tipos de fundente y el metal al que ayudan para su fundición:

Tabla 1.7. Tipos de agentes fundentes

METAL	TIPO DE FUNDENTE	EJEMPLO
Aleaciones de aluminio	Fundentes de cobertura	Cloruros, fluoruros
Aluminio	Fundentes antioxidantes	Cloruros, fluoruros y boratos de aluminio, de calcio, magnesio, potasio y sodio.
Magnesio	Fundentes escorificantes	Composición de cloruro de magnesio, cloruro de potasio, cloruro de bario y fluoruro de calcio.
Aleaciones de cobre	Fundentes oxidantes	Óxido cúprico, bióxido de manganeso.
Bórax, vidrio	Fundentes de cobertura neutra	Bórax, ácido bórico o vidrio
Grafito o carbón vegetal	Fundentes reductores	Grafito o carbón vegetal
Aleaciones de zinc	Fundentes típicos	Cloruros de zinc, de potasio y de sodio
Hierro	Fundentes típicos	Carbonato de sodio, Fluoruro de calcio

(Kalpakjian y Schmid, 2002)

1.3.3.2. Hornos de fusión

Los hornos de fusión que comúnmente se utilizan en las fundiciones son los hornos de arco eléctrico, los hornos de inducción, los hornos de crisol y los cubilotes.

- **Hornos de arco eléctrico**

Estos hornos se utilizan ampliamente en la fundición de metales y en los últimos años han aparecido nuevos tipos y perfeccionados. Tienen ventajas tales como una elevada rapidez de fusión y por tanto una elevada tasa de producción, mucha menos contaminación que otros tipos de hornos, y la capacidad de conservar el metal fundido (conservarlo a una temperatura constante durante un período de tiempo) para efectos de aleación. (Amaya *et al.*, 2006).

- **Hornos de inducción**

Este tipo de hornos son especialmente útiles en fundidoras más pequeñas y producen también fusiones más pequeñas de composición controlada. Existen dos tipos básicos.

- *Horno de inducción sin núcleo:* La capacidad de estos hornos puede variar desde fundir metales preciosos o trabajos de laboratorio. Consiste de un crisol totalmente rodeado de una bobina de cobre enfriada por agua a través del cual pasa la corriente de alta frecuencia. Dado que se presenta una fuerte acción de agitación electromagnética durante la calefacción por inducción, este tipo de hornos tiene excelentes características de mezcla para aleaciones y para agregar nuevas cargas de metal.
- *Horno de núcleo o canal:* son el otro tipo de horno de inducción, utilizan baja frecuencia (tan baja como 60 Hz) y tiene una bobina que sólo rodea una pequeña porción de la unidad. Se utiliza comúnmente en fundidoras no ferrosas como el aluminio y el latón y para fundición de hierro. Es particularmente adecuado para sobrecalentar, mantenimiento, y duplexado (uso de dos hornos para, por ejemplo fundir el metal en un horno y transferirlo al otro). (Navarro, 2007)

- **Horno de crisol**

El horno de crisol es usado para fundir metales, se emplea todavía en las fundidoras modernas debido a su costo inicial barato y a que metal se funde fuera del contacto con el combustible. Se calienta con el uso de diversos combustibles, como gases comerciales, petróleo combustible y combustible fósil, así como electricidad. (Kalpakjian y Schmid, 2002). Pueden ser estacionarios, inclinables

- *Hornos de crisol estacionarios*: Son adecuados para extraer pequeñas cantidades de metal a intervalos frecuente y se emplean como hornos de espera para mantener el metal líquido. El rendimiento térmico del horno es bajo y lo es aún más cuando se trabaja a temperaturas altas, aun así es una verdadera unidad de fusión, no tiene gran capacidad pero es útil para gran variedad de trabajos. (Nápoles, 2000). La representación de este tipo de horno, se encuentra en la Figura 1.23.

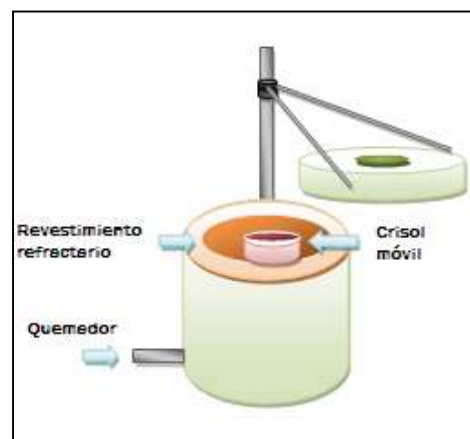


Figura 1.23. Horno de crisol estacionario
(Nápoles, 2000)

- *Hornos de crisol inclinables o móviles*: Estas unidades son similares al horno de crisol estacionario, la diferencia es que la estructura total del horno puede inclinarse alrededor de un eje horizontal para efectuar la colada del material fundido sin tener que extraer el crisol mediante pinzas. Usan como combustible coque, gas o aceite, el crisol es de acero suave y el horno tiene

un revestimiento de materiales refractarios. (Hufnagel., 1992). En la figura 1.24, se ilustra la representación de un horno de crisol estacionario.

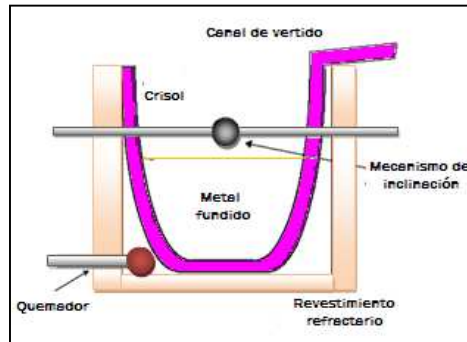


Figura 1.24. Horno de crisol móvil
(Hufnagel., 1992)

- **Cubilotes**

El cubilote se emplea casi exclusivamente para la producción de fundición de hierro, pero también para fundición de cobre si necesitan grandes cantidades de este metal. No sirven para la fundición de latón o bronce porque se produce una oxidación excesiva del zinc o del estaño. Son en esencia recipientes de acero verticales recubiertos de refractarios cargados con capas alternadas de metal, coque fundente. (Parera, 1991). En la figura 1.13, se presenta un esquema del funcionamiento del horno cubilote.

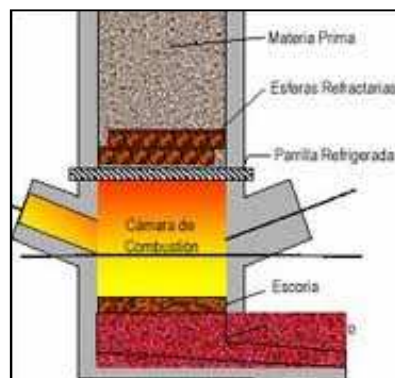


Figura 1.25. Esquema de funcionamiento de un horno cubilote, a gas natural
(Parera, 1991)

- **Horno de tambor rotatorio**

Son hornos cilíndricos de trabajo continuo, calentados por combustible. Esta unidad gira lentamente en torno a un eje horizontal y son idóneos para la fusión de virutas, limaduras y chatarra. Tienen capacidad de 5 a 2 toneladas por lo que son ampliamente en las industrias dedicadas a la fundición. Una de sus principales ventajas es la utilización eficiente del calor por tanto presentan elevado rendimiento de fusión, pues actúa de forma favorable en la transmisión de calor que se realiza al girar el tambor, desde el revestimiento del horno al metal, y es devuelto por convección. (Hufnagel, 1992)

La selección del horno requiere tomar en consideración varios factores que pueden influir de manera significativa la calidad de las fundiciones, así como la economía de las operaciones de fundición. La selección de un horno en general depende de los siguientes factores:

- Consideraciones económicas, como costo inicial y costos de operación y mantenimiento.
- La composición y el punto de fusión de la aleación a fundir, así como la facilidad para controlar sus características químicas.
- El control de la atmósfera del horno para evitar contaminación del metal.
- La capacidad y la rapidez de fusión requeridas.
- Consideraciones de tipo ecológico como contaminación del aire y ruido.
- Suministro de energía y su disponibilidad así como el costo de combustible.
- Facilidad de sobrecalentamiento del metal.
- Tipo de material de carga que es posible utilizar. (Kalpaklian y Schmid, 2002)

1.3.3.3. Agitación en la fusión

La agitación es un parámetro importante en la fusión, pues, dicho mecanismo ayuda a que los fundentes establezca un contacto íntimo con la escoria o con el

metal, para que se y se lleven a cabo las reacciones buscadas y los efectos deseados, bien sea en la escoria ó en el metal. (Kalpakjian y Schmid, 2002)

El método de la figura 1.26 (a), consiste en un lecho de fusión en el que se agita mecánicamente el metal líquido durante el proceso de enfriamiento, utiliza cámaras de vacío, o en atmósfera inerte para reducir el aire atrapado. La figura 1.26 (b), indica el método en el que se obtiene fácilmente una elevada cizalladura, se disminuye la presencia de aire atrapado mediante la agitación bajo la superficie del metal y la velocidad de enfriamiento es elevada, para lograr una fina estructura de grano. Y en la figura 1.26 (c), se ilustra un método de agitación electromagnética, este proceso permiten la producción a gran escala, utiliza parámetros tecnológicos bien establecidos y aplicables a metales de elevada temperatura de fusión. (Silva y Rodríguez, 2005)

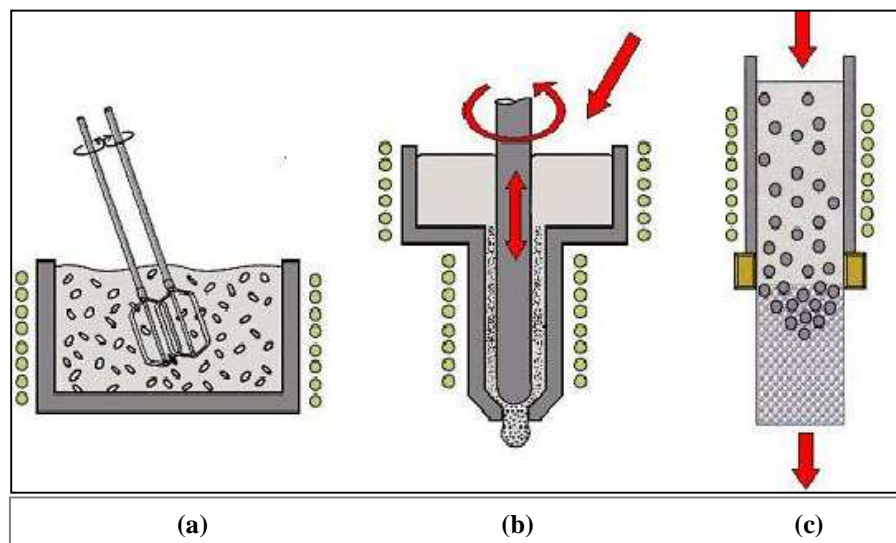


Figura 1.26. Mecanismo de agitación mecánica para la fusión
(Silva y Rodríguez, 2005)

2. PARTE EXPERIMENTAL

En el presente trabajo se buscó diferentes técnicas de purificación para desechos de latón, provenientes de la fabricación de piezas de grifería, con el propósito de obtener latón comercial.

Los residuos de latón utilizados en este estudio, se producen por los procesos de acabado y pulido de piezas.

El proceso de acabado de piezas es realizado por medio del granallado que es un tratamiento mecánico superficial por impacto a altas velocidades con microesferas de acero.

Por otra parte el proceso de pulido de piezas es una técnica que elimina irregularidades superficiales, mediante una pulidora de paño, esto genera polvillo de latón contaminado con fibras de paño.

Los residuos de latón con impurezas metálicas de hierro y latón contaminado con fibras de paño se caracterizaron, a nivel físico y químico.

A continuación, las muestras recibieron tratamientos preliminares para eliminar el contenido de hierro, componentes no metálicos e impurezas. La muestra del proceso de acabado se sometió a un proceso de separación magnética y la muestra del proceso de pulido se sometió a un proceso de separación física por tamizado.

Las muestras son fundidas posteriormente. Para analizar la influencia del tipo de horno empleado se usaron, horno de crisol y mufla eléctrica. Una vez seleccionado el horno de trabajo, se efectuaron ensayos de fusión para cada material. Se usó distintas sales de cloro (KCl, NaCl, CaCl₂, ZnCl₂, NH₄Cl), con el fin de determinar cuál de estas permite la mejor recuperación de latón.

Se definió los mejores parámetros de operación para la recuperación de latón para el proceso de fusión en presencia de las sales de cloro. Los parámetros

que se definieron en el presente trabajo para una temperatura de 1000 °C, fueron: la carga de sales fundentes respecto a la carga de materia prima, tiempo de fusión y aplicación de homogenización.

En la figura 2.1, se presenta un diagrama con la secuencia de las pruebas realizadas a cada tipo de residuo de la industria de la grifería, para la recuperación de latón.

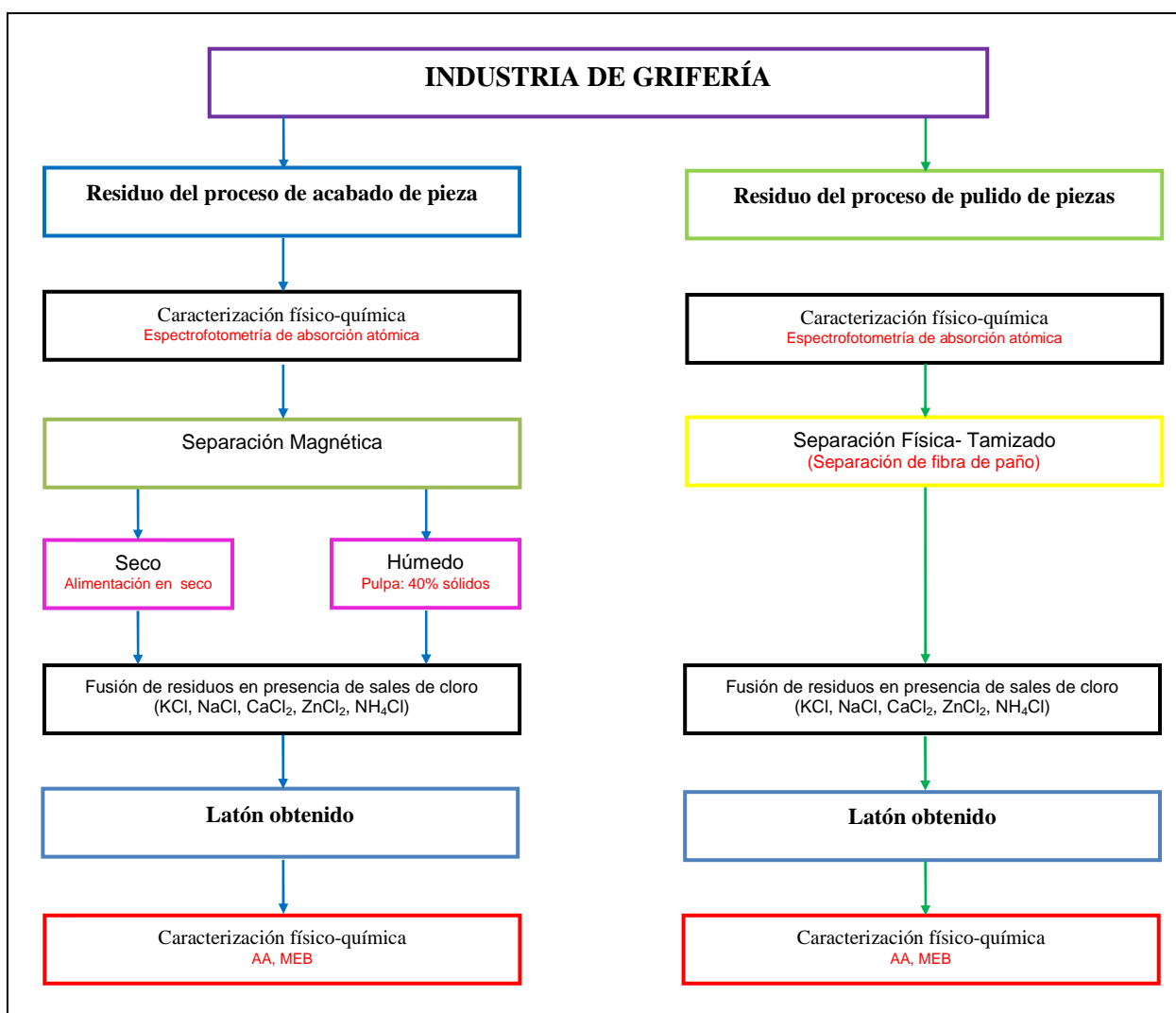


Figura 2.1. Metodología para la recuperación de latón a partir de desechos de la industria de la grifería

AA = Absorción atómica

MEB = Microscopía electrónica de barrido

2.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE LOS RESIDUOS DE LATÓN DE LA INDUSTRIA DE LA GRIFERÍA

2.1.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE RESIDUOS DE LATÓN

Para determinar las propiedades físicas de los residuos de proceso de acabado y proceso de pulido de piezas se realizaron ensayos de granulometría, densidad con base a metodologías específicas, como se indica a continuación:

2.1.1.1. Determinación del tamaño de partícula para los residuos de latón

Para determinar el tamaño de partícula de los residuos de latón proveniente del proceso de acabado y del proceso de pulido de piezas, los residuos fueron sometidos a separación mecánica por medio de una serie de tamices Tyler y un sistema de agitación de tamices Rot-Tap, con capacidad para 7 tamices y un recipiente que actúa de fondo. Este sistema se caracteriza por presentar dos tipos de agitación, de centrífuga y de golpe vertical, como su nombre lo indica. Se cargó el sistema de tamizado con 250 g de material.

A continuación se describe el proceso seguido para el desarrollo de este análisis:

- Se hizo pasar la muestra por la malla #400, con el fin de determinar si requería un deslamado previo.
- Para es deslamado, se utilizó las mallas #325 y 400, se puso la muestra en el primer tamiz, simultáneamente se colocó agua y se hizo que pase todo el material por las dos mallas. Se recogió la muestra y se secó el material en estufa a 40 °C.
- En el tamiz superior de la serie se colocó la muestra proveniente del proceso de deslamado (P_1), se dejó actuar por 15 min. Se determinó el peso retenido en cada una de las mallas de la serie de tamices mediante una balanza Mettler con capacidad máxima de 10 kg y precisión de 0,1 g. Con los pesos obtenidos,

se determinó en cada tamiz el porcentaje retenido acumulado y a su vez el porcentaje pasado acumulado. Con este último dato, se graficó la curva granulométrica y se determinó el d80 del material.

Las mallas empleadas para el tamizado se detallan a continuación en la tabla 2.1

Tabla 2.1. Tamices empleados para la realización del ensayo granulométrico del residuo de latón del proceso de acabado de piezas

Malla [#] Tyler	Abertura [μm]
40	425
50	300
60	250
70	212
80	180
100	150
150	106
200	75
270	53
325	45
400	38
Fondo	-

2.1.1.2. Determinación de la densidad aparente de los residuos de latón

Se taró una probeta de 50 mL, se colocó una cierta cantidad de material (g) hasta completar un determinado volumen (mL) y se registró su peso.

Para calcular su valor se dividió el peso del material contenido en la probeta para el volumen alcanzado.

2.1.1.3. Determinación de densidad real de los residuos de latón

Para determinar la densidad real de las muestras se empleó el método del picnómetro (Norma INEN NTE 0856:1983), como se indica a continuación:

- Se pesó el picnómetro limpio y seco (P_0), en una balanza analítica (SARTORIUS TE1245), de precisión 0,0001 g.
- Se colocó un gramo de muestra y se anotó el peso (P_1).
- Se pesó el picnómetro más la muestra y más agua (P_2)
- Se pesó el picnómetro más agua sin muestra (P_3)
- Finalmente se determinó la densidad de las muestras, por medio de la siguiente fórmula (g/mL).

$$d = \frac{1}{1 + \left(\frac{W_{p+a} - W_{p+a+m}}{W_{p+m} + W_p} \right)}$$

[2.1]

Donde:

W_p = Peso del picnómetro

W_{p+m} = Peso del picnómetro + muestra

W_{p+a} = Peso del picnómetro + agua

W_{p+a+m} = Peso del picnómetro + agua + muestra

2.1.1.4. Caracterización por microscopía óptica de los residuos de latón

Los dos residuos, se analizaron mediante microscopía óptica con luz reflejada, de la forma indicada a continuación:

- Se tomó aproximadamente 10 g de cada muestra y se colocó en un microscopio petrográfico Leica, con 100 aumentos y en un binocular Olympus SD30 con 10 aumentos.
- Se observaron propiedades de la muestras como tamaño promedio de las partículas, presencia de materiales no metálicos, color y características microscópicas de cada residuo.

2.1.1.5. Caracterización por microscopía electrónica de los residuos de latón

Los residuos de latón del proceso de acabado y pulido de piezas se analizaron

por medio de microscopía electrónica de barrido, mediante un equipo Tescan con analizador Rayos X Quantax. Se tomó aproximadamente 0,1g de las muestras, se colocaron en la cámara del microscopio y se realizó el análisis químico semicuantitativo elemental mediante el programa Espirit 1.8 (Broker). Figura 2.2.



Figura 2.2. Fotografía del Microscopio electrónica de barrido, TESCAN, empleado en el análisis de elementos

2.1.2. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LOS RESIDUOS DE LATÓN

2.1.2.1. Determinación del pH de los residuos de latón

Para determinar el pH se preparó una pulpa al 40% de sólidos se introdujo el pHmetro marca 720 WTW en cada una de las muestras en pulpa y se esperó que los valores se estabilizaran hasta obtener el valor real correspondiente las muestras.

2.1.2.2. Determinación de la concentración de metales pesados en los desechos de latón

Para la determinación de los metales pesados (cobre, cromo, hierro, plomo, zinc, manganeso, estaño, níquel, silicio) presentes en los desechos, se empleó un

equipo de Espectrofotometría de Absorción Atómica, modelo AAnalyst 300, PERKIN ELMER, mostrado en la figura 2.3.



Figura 2.3. Fotografía del espectrofotómetro de absorción atómica, AAnalyst 300

Los niveles mínimos de detección para cada metal analizado en el equipo de absorción atómica, se presentan a continuación en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Niveles mínimos detección de metales pesados por Absorción Atómica

Metal	Limite de detección [mg/L]
Aluminio [Al]	0,1
Magnesio [Mg]	0,01
Cobre [Cu]	0,01
Hierro [Fe]	0,01
Plomo [Pb]	0,1
Zinc [Zn]	0,01
Estaño [Sn]	0,1
Silicio [Si]	0,1

*Fuente: Manual del equipo Perkin Elmer

Los cationes de cobre, hierro, magnesio, cromo, zinc, manganeso, plomo y níquel se analizan mediante el método de llama de aire / acetileno, mientras que los cationes de aluminio, silicio y estaño se analizan por el método de llama de óxido nitroso / acetileno.

Previamente se realizó una disgregación ácida de cada tipo de desecho, para

lo cual se realizó el siguiente procedimiento:

- Se pesó 1 gramo de cada muestra en un vaso de precipitación.
- Se añadió al reactor 2 mL de ácido clorhídrico analítico y 4 mL de ácido nítrico analítico, se cubrió con una luna de reloj y se trabajó en la sorbona.
- Se sometió la muestra conjuntamente con los ácidos a calentamiento a una temperatura de 35 °C hasta que la muestra se disolvió por completo.
- Se tomó la solución y se aforó a 1000 mL con agua destilada.
- La solución aforada y se analizó mediante absorción atómica.

2.1.2.3. Caracterización de los residuos de latón mediante difracción de rayos X

Para determinar los materiales presentes en los residuos de acabado y pulido de piezas, se analizó por medio difracción de rayos X. Para la determinación de los compuestos químicos presentes en las muestras del proceso de acabado y pulido de piezas de latón, se usó un equipo de Difracción de Rayos X, modelo D8 ADVANCE, BRUKER axs y los programas EVA y TOPAS (Bruker).

Para el este análisis, se tomó una muestra de 2 g de cada unos de los residuos y se colocó en un portaobjetos, se procura que la muestra sea dispersada homogéneamente.

2.2. ENSAYOS DE SEPARACIÓN MAGNÉTICA DE RESIDUOS DE LATÓN DEL PROCESO DE ACABADO

2.2.1. MÉTODO DE SEPARACIÓN MAGNÉTICA EN SECO

Este ensayo permite la separación del hierro de la muestra de residuo de granallado. Se utilizó para análisis a nivel de laboratorio un separador magnético de tambor inducido de alta intensidad marca CARPCO, modelo MIH(13) 111-5 y

una capacidad de 2 kg/hora, en donde se procesa material seco para separar materiales ferromagnéticos y paramagnéticos.

El principio de operación del equipo se basa en las fuerzas magnéticas y de gravedad, tal como se muestra en la Figura 2.4.

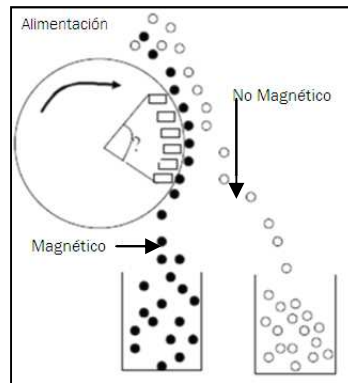


Figura 2.4. Principio de operación del separador magnético de tambor inducido de alta intensidad marca CARPCO
(Chernicoff, 2001)

Las características del equipo son: una tolva de alimentación vibratoria, un tambor magnético que trabaja de 0-300 rpm, un rectificador y una bobina enfriada por aire que es utilizada por la corriente de entrada de la bobina que es continua variable (0-3 Amp) y permite ajustar el campo magnético, hasta 20 Kgauss. Como se muestra en la figura 2.5.

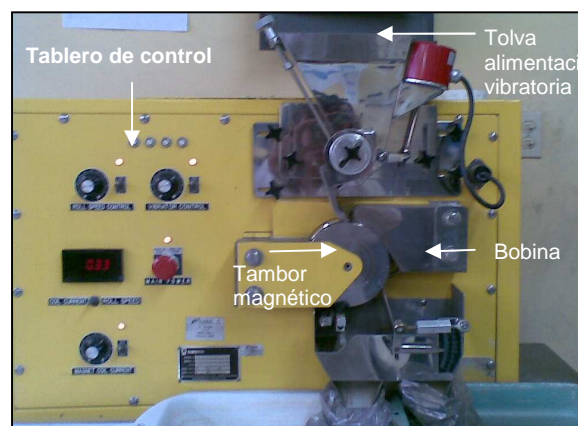


Figura 2.5. Separador Magnético de tambor inducido de alta intensidad
(LABORATORIO DE CERÁMICA EPN, 2009)

Las condiciones operatorias del equipo se mantienen constantes y se muestran en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Condiciones operatorias utilizadas para la separación magnética*

Características	Magnitud
Velocidad de giro del tambor	4 rpm
Vibración de tolva	22%
Abertura de separación de polos	3mm
Tamaño de partícula alimentado	<3mm

*Carpco Division, 1999

Se efectuó separaciones sucesivas del material seco, con menor campo magnético después de cada separación hasta que el equipo lo permita.

En la figura 2.5, se indica el procedimiento seguido para efectuar la separación magnética en seco y a continuación se la describe:

- Se cargó 600 kg del material a la tolva de alimentación.
- Se encendió el circuito magnético previamente ajustado y se dejó estabilizar por 10 segundos.
- Se encendió el tambor magnético a 3 r.p.m.
- Se inicio la vibración de a tolva (6%), que permitió que el material caiga uniformemente sobre el tambor que gira y transporta el material hasta la zona de separación, produce una fuerza centrífuga que liberará los materiales no magnéticos; los magnéticos se retiraron mediante cepillos que limpian el tambor.
- Se recogió el material magnético y no magnético, el último se vuelve a procesar bajo las mismas condiciones pero a una intensidad de campo menor. Se simuló de esta forma la operación de un separador magnético de etapas.
- Todos los pasos se repiten hasta obtener una fracción magnética acumulada (retenido acumulado) mayor al 95%.

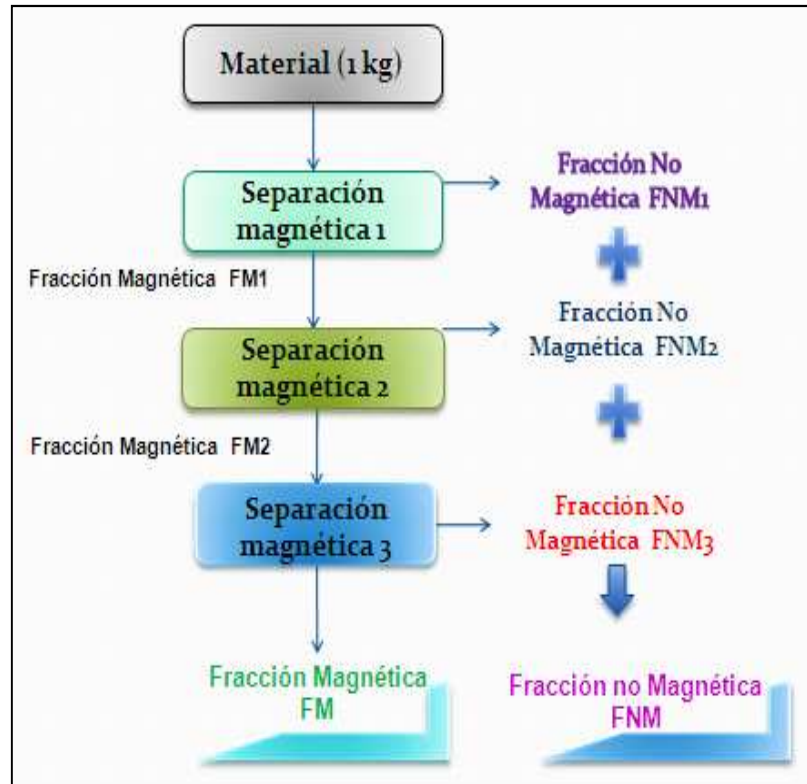


Figura 2.6. Esquema de la separación magnética realizada con un separador magnético de tambor inducido de alta intensidad

2.2.2. MÉTODO POR SEPARACIÓN MAGNÉTICA EN HÚMEDO

Para el proceso de separación magnética a escala piloto, se utilizó un separador magnético de tambor húmedo (WPD), con un imán permanente de cerámica (multipolos) en donde se procesa material húmedo (20% sólidos) para separar materiales ferromagnéticos y paramagnéticos. Por medio de este tratamiento se desea hacer la separación del hierro remanente en la muestra de residuo de granallado. El equipo tiene las siguientes características: una tolva alimentadora, cilíndrico, transmisión de cadena, reductor de revoluciones 43 rpm vel-tambor. Incluye un motor 1/3 HP, fase simple, 220 voltios, 60 Hz TEFC y un tambor con un imán permanente de cerámica de 15" de diámetro y 9" de ancho (multipolos). Con base de soporte. Tiene una capacidad de 1 ton/h si la alimentación es de 15 kg/min, 20% sólidos. En la figura 2.7, se ilustra el equipo utilizado para este método.

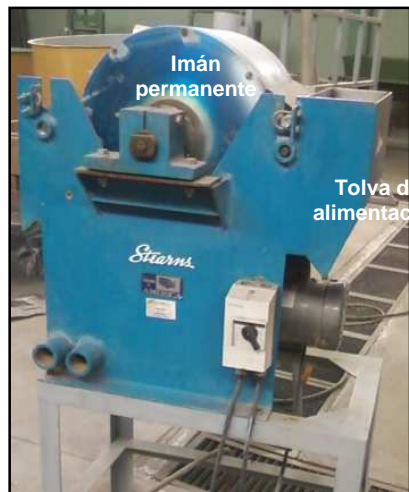


Figura 2.7. Separador Magnético de tambor húmedo (WPD)
(DEMEX EPN, 2009)

El principio de operación del equipo se basa en las fuerzas magnéticas y de gravedad (sección 1.3.1.1.), tal como se muestra en la Figura 2.8.

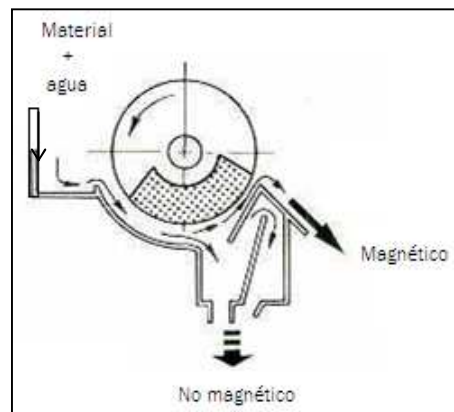


Figura 2.8. Principio de operación del separador magnético de tambor húmedo (WPD)
de tambor inducido de alta intensidad marca CARPCO
(Brewis, 2000)

El esquema de la separación magnética que se muestra en la Figura 2.9. Para realizar la separación magnética en húmedo se realizó el siguiente procedimiento:

- Se cargó 4 kg del material a la tolva de alimentación.
- Se encendió el tambor magnético. El tambor debe girar en la misma dirección en la cual la alimentación es introducida en la máquina.

- Se prendió y reguló el spray de agua de acuerdo a su material. La cantidad de agua utilizada fue la suficiente para limpiar el tambor.
- Se abrió la alimentación de agua al tambor magnético.
- Se inició la entrada de agua a la tolva de alimentación, hasta formar una pulpa de 20% de sólidos con el material. Esto permite que el material caiga uniformemente sobre el tambor que gira y transporta el material hasta la zona de separación, produce una fuerza centrífuga que liberará los materiales no magnéticos; los magnéticos fueron retirados mediante el agua que limpian el tambor.
- La máquina produjo dos descargas: 1) fracción no magnética y 2) concentrado magnético.
- El material no magnético, se reprocesó bajo las mismas condiciones. Se simula de esta forma la operación de un separador magnético de etapas.
- Se realizó separaciones sucesivas del material húmedo, a las mismas condiciones para obtener un material con menores contenidos de hierro.
- Se filtraron las fracciones obtenidas se secaron a temperatura ambiente 24 horas.

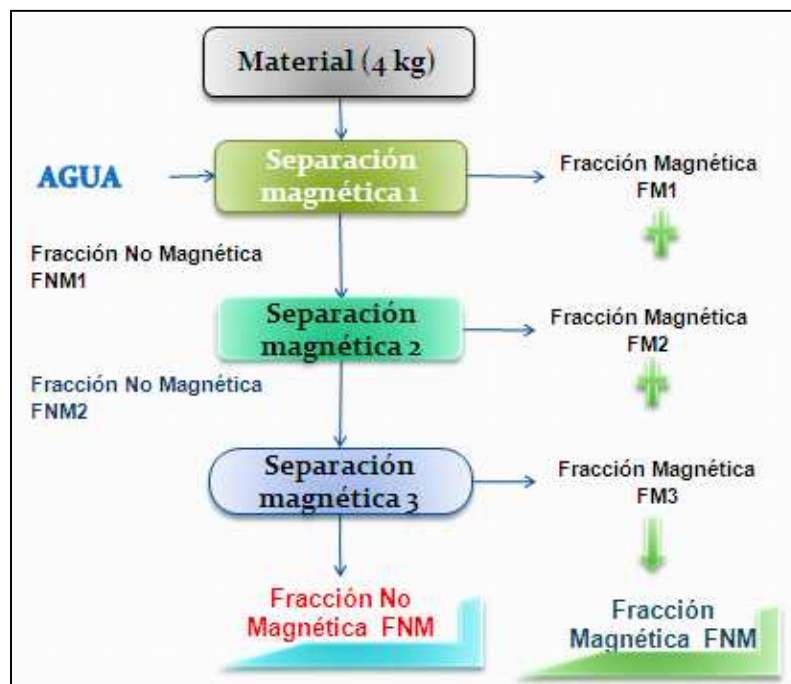


Figura 2.9. Esquema de la separación magnética realizada con un separador magnético de tambor inducido de alta intensidad

2.2.3. CARACTERIZACIÓN DE RESIDUO DE LATÓN DEL PROCESO DE ACABADO PRETRATADO CON SEPARACIÓN MAGNÉTICA

Se determinó el porcentaje de elementos presentes en las fracciones obtenidas en la separación magnética, mediante un análisis por espectroscopia de absorción atómica, como ya se describió en la sección 2.1.2.2.

2.3. ENSAYOS DE CLASIFICACIÓN POR TAMAÑO DE PARTÍCULA DE RESIDUOS DE LATÓN DEL PULIDO

El proceso de separación de residuo no metálico (esponja, limallas de hierro) se hizo por la diferencia de tamaño de partícula entre el polvillo de latón y el residuo no metálico.

Se realizó una separación mecánica por medio de una serie de tamices por medio de una serie de tamices compuestos por mallas estándar. (Tabla 2.1.). Para la Para esto se procedió de la siguiente manera:

- Se pesaron aproximadamente, 250 gramos del residuo del proceso de pulido.
- Se colocó en el tamiz superior la muestra pesada.
- Se dejó actuar por 15 min el sistema con la serie de tamices.
- Se pesaron las fracciones retenidas en cada tamiz y se observó hasta que malla el material no magnético se retuvo.

En la figura 2.10, se muestra el equipo usado para la separación por medios mediante diferencia de tamaños.



Figura 2.10. Serie de tamices utilizados para la separación por tamaño de partícula

Se realizó una prueba de tamizado con malla estándar #200, mediante el siguiente proceso:

- Se peso 250 g de muestra, se puso en el tamiz y se dejó actuar por 15 min.
- Se pesaron y registraron los pesos de los materiales.

2.4. ENSAYOS DE FUSIÓN DE LOS RESIDUOS DE LATÓN PRETRATADOS

Una vez pretratados los dos residuos mediante separación magnética seca, separación magnética húmeda y separación física por tamizado, se estudió el proceso de fusión para los residuos, con el fin de disminuir las concentraciones del hierro a concentraciones menor que el 1%.

2.4.1. ENSAYO DE FUSIÓN CON CARGA FUNDENTE ESTÁNDAR PARA LOS DESECHOS INDUSTRIALES DE LATÓN

Para los ensayos de fusión se usaron las muestras con menor contenido de hierro y de materiales no magnéticos como fibra de paño.

Después de estudios preliminares, se ha determinado que para procesar este tipo de material, es necesario trabajar con valores cercanos al punto peritético, con la composición ternaria que se aprecia en la tabla 2.4.

Tabla 2.4. Carga fundente estándar usada para la fusión de desechos industriales

Material	Cantidad de material [g]
Muestra	30
Bórax	30
Carbonato de Sodio	40
Sílice	20

Las características de los reactivos usados en la fundición de latón, se describen brevemente a continuación:

- **Bórax:** Es el borato de sodio, funde a 743 °C, lo cual disminuye el punto de fusión para toda la carga. Cuando se funde es muy viscoso, pero a mayor temperatura se convierte en un ácido fluido fuerte, el cual disuelve y capta a todos los óxidos metálicos (tanto ácidos como básico). En grandes cantidades, forma una escoria dura y poco homogénea, pero un exceso del reactivo puede dificultar la separación de fases, debido a la reducción del coeficiente de expansión de la escoria y su acción de impedir cristalización. (Grimwade, 2000)
- **Carbonato de sodio:** El carbonato de sodio (Na_2CO_3), es un fundente básico cuya temperatura de fusión es de 852 °C. En presencia de sílice, forma silicatos complejos. Además, debido a la facilidad natural para formar sulfatos alcalinos, actúa como desulfurizante y un agente oxidante. El uso de Na_2CO_3 , proporciona transparencia a la escoria, pero en cantidades excesivas origina escorias pegajosas e higroscópicas que son difíciles de remover en el metal fundido. (Imris, 2000)
- **Sílice:** El dióxido de silicio (SiO_2) funde a 1750 °C y es el fundente ácido más fuerte y disponible que se tiene. Se combina con óxidos metálicos para formar

cadenas de silicatos estables. Las escorias con altos contenidos de sílice, son extremadamente viscosas y retienen metales en suspensión. Cuando el dióxido de silicio se mezcla con bórax, se forman cadenas borosilicatadas. La relación en peso de bórax a sílice, generalmente no debe ser menor de 2:1. Estas escoria borosilicatadas no solo tendrán una alta solubilidad para óxidos metálicos base, sino que ofrecen buena fluidez en el fundido. (Palacios, 1999)

Para este ensayo de fusión, se efectuó el siguiente procedimiento:

- Se pesó los materiales descritos en la tabla 2.5. y se homogenizó.
- Se colocó en un crisol cerámico.
- Se introdujo en el horno de crisol a gas, con una capacidad para cargar crisoles número 5 y con 50 g de muestra por crisol y se fundieron las muestras aproximadamente a 1000 °C, por una hora. El horno de crisol funciona a través de la combustión de gas licuado de petróleo (GLP) en una cámara de material refractario, donde se alimenta el aire necesario para la combustión por medio de un ventilador. El horno trabaja a una temperatura aproximada de 1000 °C. La cámara de combustión tiene 25,4 cm de altura, 22,1 cm de diámetro y el espesor de la capa de material refractario es de 15,2 cm. (Figura 2.11.)
- Se extrajo el crisol del horno y se colocó su contenido en una lingotera metálica, de modo que la escoria de la fusión sea retenida en cada crisol.
- Se analizó la recuperación del latón de acuerdo a una relación gravimétrica entre la cantidad de materia prima inicial y la cantidad de material recuperado (Ecuación 2.2.) y se analizó el contenido de elementos por espectroscopia de absorción atómica y microscopia electrónica de barrido.

$$\% \text{Recuperación} = \frac{\text{Peso metal fundido recuperado}}{\text{Peso cargado al crisol}} \times 100 \quad [2.2]$$

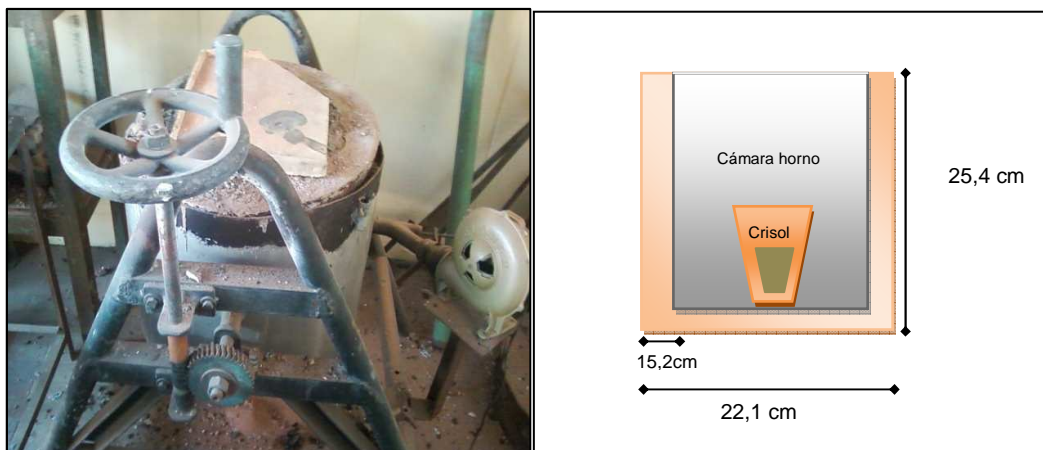


Figura 2.11. Fotografía horno de crisol a gas, empleado en la fusión y sus dimensiones

2.4.2. IDENTIFICACIÓN DE SALES DE CLORO PARA EL PROCESO DE FUSIÓN DE DESECHOS INDUSTRIALES DE LATÓN

Se efectuaron ensayos de fusión con la adición de sales de cloro como carga fundente, sección 1.3.3.1.

La función de las sales de cloro es evitar la oxidación del zinc, esto forma una barrera entre el oxígeno del ambiente y el zinc al fundirse, por lo que se debe tomar en cuenta el punto de fusión de cada sal empleada. En la tabla 2.5, se detallan los puntos de fusión de cada sal de cloro que se usó en estos ensayos:

Tabla 2.5. Temperaturas de fusión de las sales de cloro empleadas en el proceso de fusión de desechos de latón

Sal de cloro	Temperatura de fusión °C
Cloruro de sodio (NaCl)	801
Cloruro de potasio (KCl)	776
Cloruro de calcio (CaCl ₂)	772
Cloruro de zinc (ZnCl ₂)	420
Cloruro de amonio (NH ₄ Cl)	338

(Utigard *et al*, 1998)

Con base a las temperaturas descritas en la tabla 2.6, se realizaron ensayos de fusión para los dos desechos a una temperatura de 1000 °C, debido a que el

cobre tienen un punto de fusión mayor a esta temperatura. Se empleó una mufla eléctrica, modelo M BF51800, LINDBERG/BLUE, funciona a través de electricidad, por calentamiento de níquelinas que se encuentran recubiertas de un aislamiento refractario. Presenta un control automático de temperatura, lo cual permite fijar este parámetro al interior de la mufla. El horno puede trabajar hasta una temperatura de 1100 °C. La mufla presenta una cámara de calentamiento con 30,5 centímetros de altura, 30,5 centímetros de ancho y 45,7 centímetros de profundidad. En la figura 2.13, se muestra el esquema del horno.

Se realizó dos tipos de pruebas para cada sal de cloro:

1. Homogenización de la sal con la muestra
2. Adición de una capa de sal sobre la muestra.

En la figura 2.12, se ilustra los dos tipos de ensayos efectuados para la fusión de latón en presencia de sales de cloro.

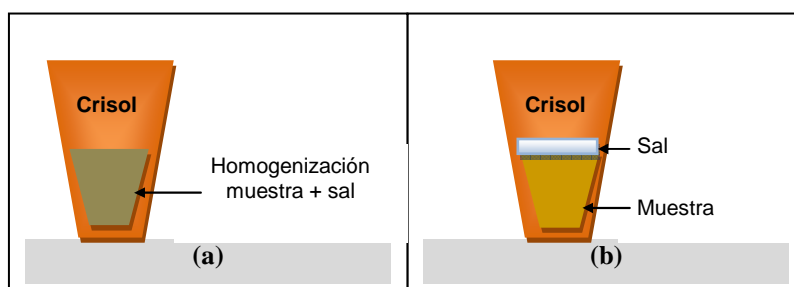


Figura 2.12. Ensayos de fusión de latón en presencia de sales de cloro
(a) Homogenización de sal+muestra (b) Capa de sal en muestra

La recuperación se analizó de acuerdo a una relación gravimétrica entre la cantidad de material recuperado y la cantidad de materia prima inicial. Se inicia con 15 g de sal, debido a que estudios similares recomiendan esta carga de sal, para tratar de que sea una cantidad adecuada para la prueba.

En la tabla 2.6, se detalla las cantidades de material y de sal empleadas para los ensayos de fusión:

Tabla 2.6. Cantidades de material y de sales de cloro para los ensayos de fusión para selección de sales fundentes

Materia Prima	Cantidad de materia prima [g]	Cantidad de sal de cloro [g]
Residuo del proceso de acabado	50	15
Residuo del proceso de pulido	50	15

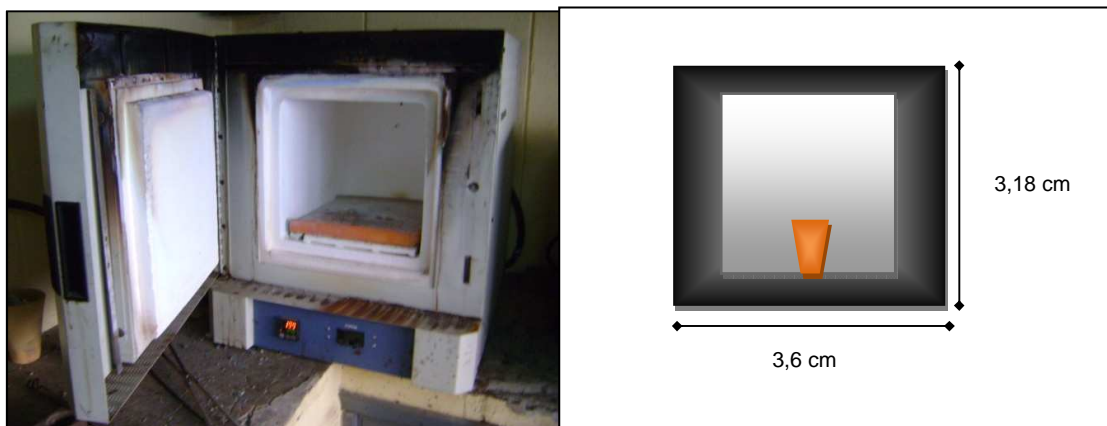


Figura 2.13. Fotografía horno tubular, F21100, empleado en la fusión de desechos industriales y electrónicos

2.4.3. DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN PARA LA FUSIÓN DE DESECHOS DE LATÓN EN PRESENCIA DE SALES DE CLORO

Una vez determinadas las sales que permiten obtener la mejor recuperación de latón a partir de material pretratado, se procedió a la definición de parámetros de operación para el proceso de fusión de residuos de latón (Figura 2.14), como:

- Carga de sales fundentes respecto a la carga de desechos de latón
- Tiempo de fusión
- Temperatura de operación
- Aplicación de homogenización para la obtención de latón comercial fundido.

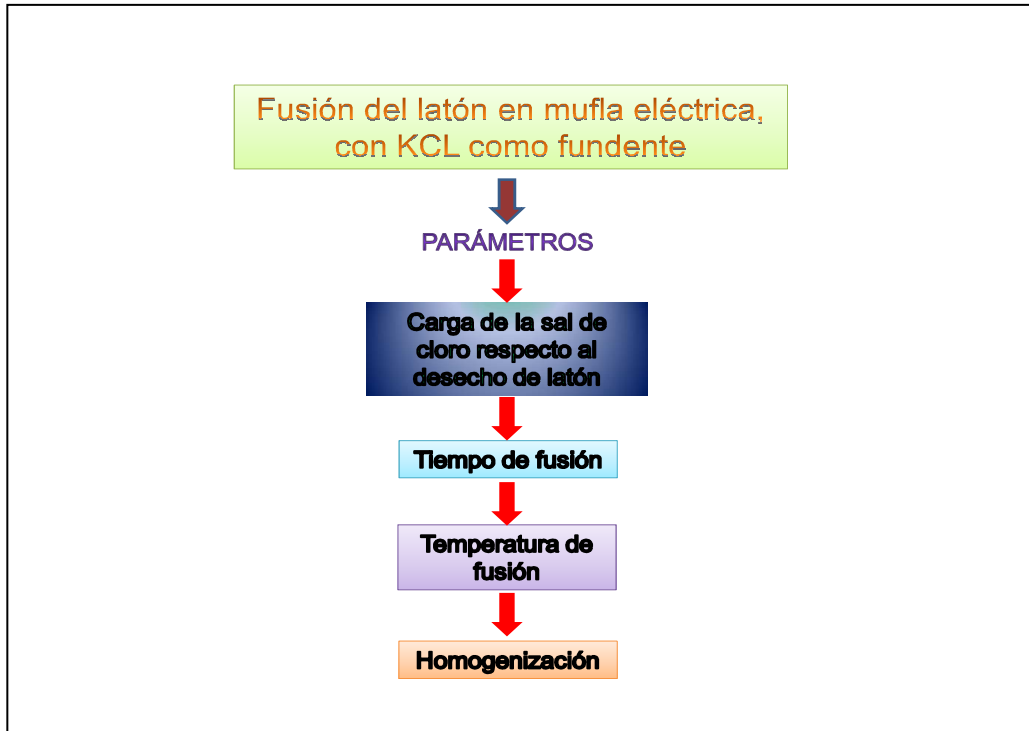


Figura 2.14. Esquema de los parámetros determinados, para la fusión de latón, en una mufla eléctrica y en presencia de KCl

2.4.3.1. Definición de carga de sales fundentes respecto a la carga de material pretratado para el proceso de fusión

El siguiente parámetro que se definió fue la cantidad de sal fundente añadida, respecto a la cantidad de material pretratado que se someterá al proceso de fusión.

Para definir este punto se fundió el material en una mufla eléctrica a 1000 °C, por una hora. Se varió la cantidad de sal de cloro y se mantuvo constante la cantidad de material pretratado., en la Tabla 2.7, se muestran las condiciones de trabajo.

Tabla 2.7. Condiciones de trabajo para cada material en la definición de la carga de sales fundentes respecto a la carga material pretratado

Prueba	Peso del Material [g]	Peso de Sal de Cloro [g]	Porcentaje de sal de cloro respecto a la muestra de latón pretratado [%]
1	50	5	10
2	50	8	16
3	50	10	20
4	50	15	30
5	50	20	40

2.4.3.2. Definición del tiempo de operación para el proceso de fusión de material pretratado en presencia de sales de cloro

La siguiente variable fue el tiempo de fusión de desechos en presencia de sales de cloro para cada tipo de material. Para la definición de este parámetro, se hizo la fundición de 50 [g] de material de latón pretratado con 15 [g] (30 %) de KCl en capa, en una mufla eléctrica a 1000 °C

La determinación del tiempo de fusión adecuado para el proceso se determinó mediante ensayos de fusión donde se varió el tiempo, en cada ensayo se analizó la recuperación de latón de acuerdo a una relación gravimétrica entre la cantidad de material recuperado y la cantidad de materia prima inicial. Los tiempos de operación empleados para los ensayos realizados en la definición del tiempo de fusión de desechos, se detallan en la tabla 2.8.

Tabla 2.8. Variación del tiempo de operación para el proceso de fusión de desechos de aluminio en presencia de sales de cloro

Ensayo de Fusión	Tiempo para el proceso de fusión de desechos de latón en presencia de sales de cloro [h]
1	0,25
2	0,50
3	0,75
4	1,00

2.4.3.3. Análisis de la implementación de agitación para el proceso de fusión de muestras pretratadas en presencia de sales de cloro

Se procedió a replicar los ensayos efectuados, desde la sección 2.4.3.1 hasta la sección 2.4.3.3.

Para la definir la carga de mezcla de sales fundentes respecto a la cantidad de materia prima y el tiempo de operación, a las mismas condiciones de operación con la diferencia de que a cada ensayo realizado se aplicó agitación mecánica.

La agitación se aplicó la mitad del proceso de fusión y al final del proceso de fusión con el uso de una vara de madera o una de acero, durante 1 minuto.

Cabe mencionar que la aplicación de la agitación en el proceso, aumenta la velocidad de fundición del latón, por lo que el tiempo de fundición disminuye. En la figura 2.15, se indica el mecanismo de agitación manual efectuado en la fusión de residuos de latón pretratado.

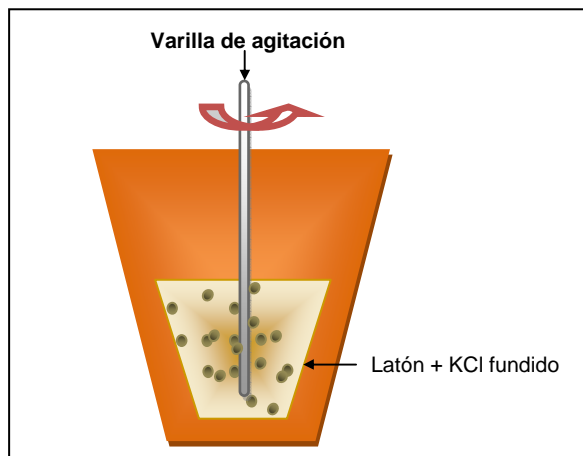


Figura 2.15. Mecanismo de agitación realizado en la fundición de desechos de latón pretratado

2.5. CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS DE LATÓN PURIFICADO

2.5.1. CARACTERIZACIÓN POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO DE RESIDUOS DE LATÓN PURIFICADOS

Los residuos de latón purificado, se analizaron por medio de microscopía electrónica de barrido mediante un equipo Tescan con analizador Rayos X Quantax.

La muestra de latón resultante se cortó con una sierra con el fin de conseguir una sección recta, la misma que se pulió hasta obtener una sección pulida. La limpieza de la muestra se realizó con 5 mL de alcohol isopropílico y el equipo de ultrasonido durante 3 min.

La muestra se colocó en la cámara del microscopio y se procedió a realizar el análisis de microscopía, con el fin de observar la estructura de la escoria, , análisis químico del material y posición de elementos para ver si aleación formada es buena.

2.5.2. CARACTERIZACIÓN POR ESPECTROSCOPIA DE ABSORCIÓN ATÓMICA DE RESIDUOS DE LATÓN PURIFICADOS

Para la determinación de los metales pesados (cobre, cromo, hierro, plomo, zinc, manganeso, estaño, níquel, silicio) presentes en los desechos, se empleó un equipo de Espectrofotometría de Absorción Atómica, modelo AAnalyst 300, PERKIN ELMER.

Se debe realizó previamente una disgregación ácida de cada tipo de desecho, para lo cual se realizó el siguiente procedimiento:

- Se obtuvieron limallas del latón purificado con la ayuda de un taladro.

- Se pesó 1000 miligramos de las limallas de cada muestra en un vaso de precipitación.
- Se añadió al reactor 2 mL de ácido clorhídrico y 4 mL de ácido nítrico, se tapó con una luna de reloj para evitar que los vapores formados por la reacción contaminen al ambiente y se trabajó en la sorbona.
- Se sometió la muestra conjuntamente con los ácidos a calentamiento a temperatura baja hasta que la muestra se disolvió por completo.
- Se tomó la solución y se aforó a 1000 mL con agua destilada.
- Se tomó una alícuota de 35 mL de la solución aforada y se analizó mediante absorción atómica.

2.6. ELABORACIÓN DEL DISEÑO CONCEPTUAL DEL PROCESO DE PURIFICACIÓN DE RESIDUOS INDUSTRIALES DE LATÓN PARA SU RECICLAJE Y SU EVALUACIÓN ECONÓMICA.

El objetivo general de este capítulo es la elaboración del diseño conceptual de una planta de purificación de residuos de latón para su reciclaje. El presente diseño se elaborará a partir de los mejores parámetros experimentales, obtenidos a nivel de laboratorio, durante los ensayos de purificación de residuos.

Para establecer las bases de diseño se caracterizó el latón residual de la industria de la grifería y se estableció el proceso a seguir, se definió las especificaciones de los productos obtenidos y de todas las corrientes de salida que tendría el proceso. Para el desarrollo del diseño conceptual se dio mayor importancia a los criterios de aplicabilidad, funcionamiento, impacto ambiental y a consideraciones económicas, como los costos de inversión

Para realizar la elaboración del diseño conceptual, primero, se elaboró un diagrama de flujo básico que presenta la secuencia de operaciones necesarias

para purificar los residuos de latón de la industria de grifería.

Se calculó de los flujos principales asociados, mediante balances de masa hecho en cada operación unitaria y un balance de masa global, de acuerdo a la ecuación general de conservación de la materia descrita en la siguiente ecuación:

$$S = E + G - C - A \quad [2.3]$$

Donde:

S: salida de materia

E: entrada de materia

G: generación

C: consumo

A: acumulación

Pero como este proceso se da en estado estacionario, ya que no existe reacción química, por lo tanto se utilizó la ecuación:

$$S = E \quad [2.4.]$$

A través de este balance, se obtuvo la cantidad de producto y el residuo obtenido en cada proceso.

Por otro lado, se hizo el balance de energía en el proceso global de producción y en cada operación donde interviene la energía eléctrica, para determinar el consumo diario en la planta, en KWh. Para este cálculo, se requirió conocer el consumo de energía de cada equipo y de la producción. El concepto de balance de energía, es similar al concepto del balance de materia y se expresa de acuerdo a la ecuación:

$$\left[\begin{array}{l} \text{Acumulación} \\ \text{de energía} \\ \text{dentro del} \\ \text{sistema} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{Transferencia} \\ \text{de energía hacia} \\ \text{el sistema por el} \\ \text{límite del mismo} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{Transferencia} \\ \text{de energía del} \\ \text{sistema por el} \\ \text{límite del mismo} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{Generación} \\ \text{de energía} \\ \text{dentro del} \\ \text{sistema} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{Consumo} \\ \text{de energía} \\ \text{dentro del} \\ \text{sistema} \end{array} \right] \quad [2.5]$$

Una vez, que se efectuados los balances de materia y energía en cada proceso y en toda la operación, se determinó la capacidad y el tamaño.

En la separación magnética, se determinó el campo magnético inducido mediante

la fórmula [2.6].

$$B = H + 4\pi J \quad [2.6]$$

Donde:

B: Campo magnético inducido [Gauss].

H: Campo Magnético aplicado [Gauss].

J: Intensidad de magnetización [Gauss].

Este parámetro se definió con el fin de saber si el equipo debía ser de alta o baja intensidad. Se decidió utilizar un separador de baja intensidad, en seco y de banda cruzada, por lo que se calculó la sección transversal del material sobre la banda de acuerdo a la ecuación [2.7], de inmediato se calculó el volumen que ocupa el material en un metro de banda y finalmente por medio de la ecuación [2.6], se obtuvo la capacidad de la banda necesaria para el material.

$$A = \frac{b^2 \cdot \tan(\beta)}{4} \quad [2.7]$$

Donde:

A: área [ft²]

b: ancho de la sección de carga [ft]

β : ángulo de reposo del material [°]

El ángulo de reposo de material, se muestra en la figura 2.16, y se define como el ángulo que se forma entre la superficie de amontonamiento del material con el plano horizontal.

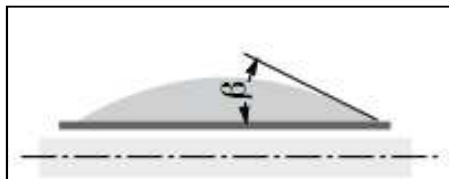


Figura 2.16. Ángulo de reposo para el material

$$Q = 3600 * v * A * \gamma \quad [2.8]$$

Donde

Q : capacidad de transporte [t/h]

v : velocidad [m/s]

A : sección transversal del material sobre la banda [m²]

γ : peso específico [t/m³]

Para la separación física por tamizado, se determinó la capacidad del equipo a través del cálculo del área, con la ecuación [2.9].

$$\text{Área [ft}^2\text{]} = \frac{\text{Alimentación-Sobretamaño}}{a*b*c*d*e*F} \quad [2.9]$$

Donde

Sobretamaño: es el rechazo

a : corrección por la forma de las aberturas.

b : representa el porcentaje de alimentación al deck que es la mitad del tamaño de la abertura de la superficie de harneado.

c : representa el factor de corrección obtenido para una eficiencia del tamiz del 94%, con un valor de 1.

d : corrección por el material fino a alimentar

e : corrección por la posición del tamiz en el sistema.

Los factores a, b, c, d y e, son valores que se encontraron en tablas de acuerdo a las características físicas del material.

Se recompiló la información técnica y se hizo una estimación de la inversión y de los costos de operación de la planta. Esta evaluación económica es generalmente el punto que decide de la factibilidad del proyecto y por lo tanto su construcción. La factibilidad económica se realizó mediante el cálculo del valor actual neto (VAN), mediante las ecuación [2.10] y la tasa interna de retorno (TIR),

$$VAN = -A + \sum_{t=1}^n F_t * (1 + i)^{-t} \quad [2.10]$$

Donde:

VAN: Valor actual neto de la inversión

A: Valor de la inversión inicial

F_t: Valor neto de los distintos flujos de caja. Se trata del valor neto, así cuando en un mismo período se dé flujos positivos y negativos será la diferencia entre ellos.

i: tasa de retorno del período

El TIR, es la tasa de descuento que hace que el de una inversión sea igual a cero.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE RESIDUOS DE LATÓN

Para el desarrollo de esta investigación se emplearon dos tipos de residuos de latón correspondientes a los procesos de acabado y pulido de piezas de la industria de la grifería. Como primer paso se realizó una caracterización de los residuos para determinar las condiciones iniciales y poder establecer el o los procesos a emplear en el tratamiento de estos residuos.

3.1.1. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LOS RESIDUOS DE LATÓN

El análisis granulométrico fue realizado empleando la metodología experimental descrita en la sección 2.1.1.1, de modo que se determinaron los parámetros descritos en la tabla 3.1. Los detalles de este ensayo se hallan en Anexo I.

Tabla 3.1. d_{80} para el residuo de latón del proceso de acabado de piezas

Muestra	Parámetro	Valor	Unidad
Acabado	d_{80}	95	[μm]
Pulido	d_{80}	54	[μm]

El residuo proveniente del proceso de acabado de piezas, presentan un d_{80} de 95 [μm], lo que indica que el 80% del material presenta un tamaño menor o igual a este valor. La importancia de definir este parámetro, es que la oxidación de los metales y sus aleaciones dependen del tamaño de partícula, pues a menor tamaño de partícula la oxidación aumenta. En este caso al tratarse de una granulometría muy fina, este residuo se oxidará con facilidad.

Para el caso del residuo de pulido, el parámetro d_{80} para es de 59 [μm], el tamaño de partícula en este caso la tendencia a oxidarse es mayor que los residuos de

latón proveniente del proceso de acabado, por lo que será más complicado establecer procesos para fundir el material.

3.1.2. DETERMINACIÓN DE DENSIDAD DE RESIDUO DE LATÓN

La determinación de la densidad fue realizada empleando la metodología experimental descrita en la sección 2.1.1.2 y 2.1.1.3, de modo que se determinaron los parámetros descritos en la tabla 3.2. Los detalles de este ensayo se hallan en Anexo I.

Tabla 3.2. Densidad real y aparente, y porosidad para los residuo de latón del proceso de acabado y pulido de piezas

		Residuo de latón	
		Acabado de piezas	Pulido de piezas
Densidad real	[g/mL]	2,80	2,42
Densidad aparente	[g/mL]	2,78	2,31
H	[%]	1	5

Como los residuos cataracterizados, están en polvo la densidad es menor a la del latón original. Esto se debe a que el latón se encuentra en una forma sólida, por lo que los espacios vacíos en la estructura del mismo son menores, mientras que en el caso del polvo, existe mayor cantidad de espacios vacíos en la microestructura del material de latón.

Los residuos de latón del proceso de acabado presentaron una densidad real 2,80 g/mL. La relación entre la densidad aparente y la densidad real fue 0,99. Lo que indica que el 1 % del espacio ocupado por el residuo corresponde a un espacio libre. Por tanto se caracteriza al residuo de latón del proceso de acabado como un material compacto y muy poco poroso, de acuerdo a la ecuación encontrada en el Anexo I.

Para los residuos del pulido de piezas, la densidad real fue de 2,42 g/mL y la

relación entre densidades fue de 0,95. Como se observa este material es menos denso que el del proceso de acabado, por lo tanto posee una mayor porosidad y es mucho menos compacto que el material anterior.

3.1.3. CARACTERIZACIÓN POR MICROSCOPIA ÓPTICA DE LOS RESIDUOS DE LATÓN DEL PROCESO DE PULIDO DE PIEZAS

La microscopía óptica es una herramienta tradicional, muy importante, para el estudio de materiales, en particular, de aleaciones metálicas. A pesar de que es una de las técnicas más antiguas, es la herramienta indicada para el estudio de un amplio espectro de temas vinculados con la metalurgia física, tales como estructuras, productos de transformaciones de fase y estructura de grano. (Castro y Fornaro, 2009).

Los residuos de latón constituyen materiales obtenidos como resultado de procesos superficiales aplicados a las piezas de grifería, para su limpieza y brillo. Por lo que se realizó un análisis de microscopía óptica de luz reflejada, con el propósito de observar la estructura superficial que presenta este residuo usando la metodología descrita en la sección 2.1.1.4.

El objetivo de utilizar los dos equipos, es realizar un análisis óptico de la microestructura de la superficie del residuo de latón con diferentes aumentos, 10 y 100 aumentos respectivamente. Al observar el residuo en el binocular con 10 aumentos, la superficie analizada es más amplia por lo que se aprecian mejor los detalles, mientras que con el microscopio óptico a 100 aumentos, la zona analizada es la décima parte del equipo anterior, por esta razón los detalles más finos son difíciles de observar.

En las figuras 3.1 y 3.2, se presentan las estructuras superficiales de los residuos de latón de los procesos de acabado y pulido de piezas.

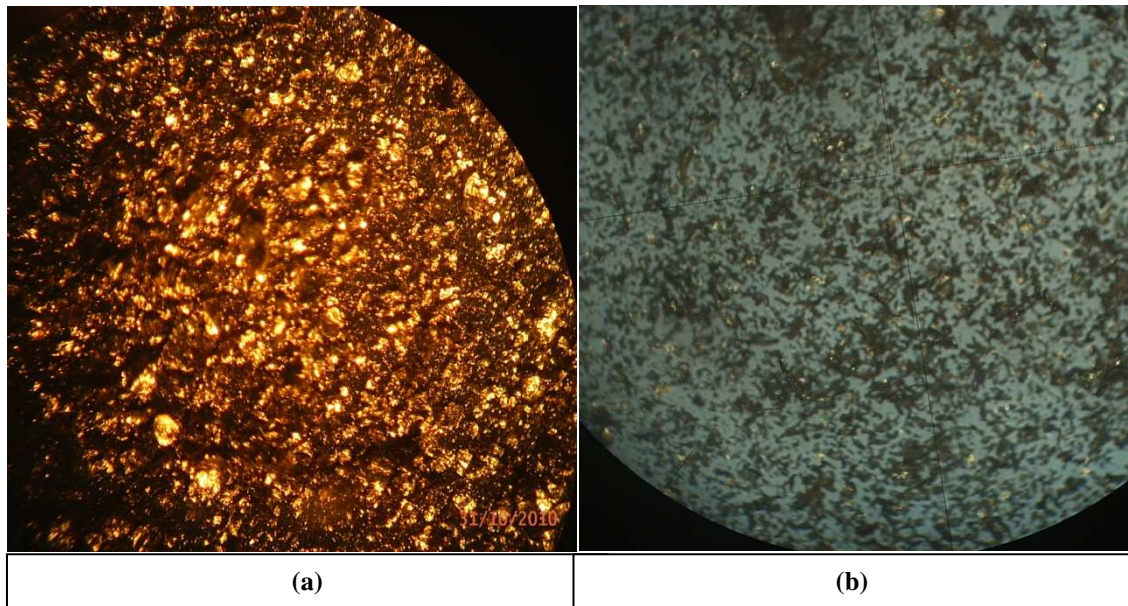


Figura 3.1. Fotografía d la superficie del residuo del proceso de acabado mediante microscopía óptica de luz reflejada (a) 10 aumentos (b) 100 aumentos

En la figura 3.1, se observa la imagen de la microestructura del residuo de latón del proceso de acabado. La figura 3.1 (a) ilustra la imagen dada por el binocular Olympus (10 aumentos), como se observa, este equipo nos proporciona una visualización tridimensional de la muestra, además se observa que el color del material es café con presencia de pequeñas partículas doradas brillantes.

En la figura 3.1 (b), por el microscopio óptico (100 aumentos), el tamaño de grano es menor al observado por el binocular. Los gránulos están de maneta independientes y son de color dorado brillante, no se constata la presencia de impurezas.

La figura 3.2, muestra una fotografía superficial del residuo de latón del proceso de pulido, obtenida mediante microscopía óptica.

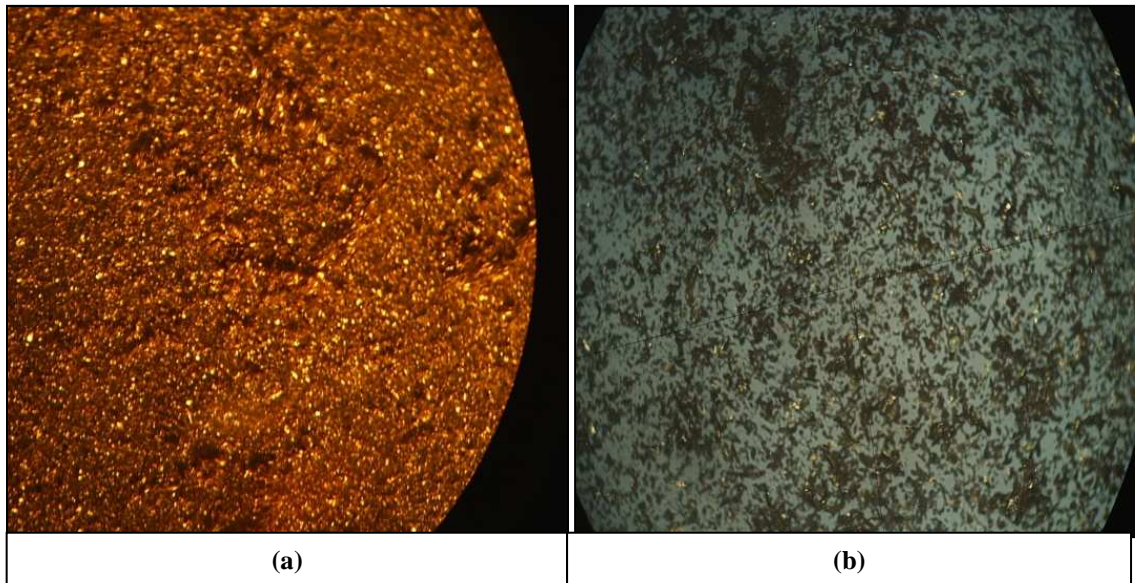


Figura 3.2. Fotografía de la superficie del residuo del proceso de pulido mediante microscopía óptica de luz reflejada (a) 10 aumentos (b) 100 aumentos

En la figura 3.2 (a), es una imagen dada por el binocular, es visible la presencia de partículas brillantes y pequeños aglomeramientos de material, no se constata la presencia de fibras de paño en el residuo.

El microscopio óptico, proporciona la fotografía mostrada en la figura 3.2 (b), el campo visual de trabajo es menor pero en aumento es mayor que el binocular, esto gracias a que el número de aumentos es de 100, al igual que la figura 3.2 (a) no se constata la presencia de fibras de paños y se puede observar gránulos brillantes al igual que en la muestra de acabado de piezas

En la tabla 3.3, se resume las propiedades de los residuos observadas en el microscopio óptico de luz reflejada.

Tabla 3.3. Determinación de propiedades físicas de los residuos de latón, mediante microscopía óptica de luz reflejada

Muestra	Color	Granulometría	Composición [%]	Observaciones
RESIDUO DE LATÓN DEL PROCESO DE ACABADO	Café oscuro en el que se nota la presencia de pequeñas partículas de color dorado brillante. Impurezas de color plomo y blanco.	0.4 cm de largo de limalla metálica. Diámetro impureza 0.4 cm. Diámetro de fibra de impureza 2.4 mm. (Existen además pequeñas fibras con diámetro inferior a los 0.2 mm). Dimensión promedio de un grano metálico 1.68 x 1.50 mm. (Sólo se consideraron los cristales con dimensiones susceptibles a ser medidos por el microscopio empleado). Dimensión promedio de una impureza 2.14x2mm.	98% polvo homogéneo de color café oscuro. 2% de impurezas.	Polvo de apariencia muy homogénea con partes doradas con brillo metálico similar a la escarcha. Las impurezas no son fácilmente detectables. El polvo deja un color plomo al tacto, capaz de manchar el papel. Microscópicamente existen fibras de un diámetro mayor las cuales están muy cercas unas de otras. Las limallas metálicas son casi inexistentes. Pequeños cristales con dimensiones menores a 0.2x0.2 mm. Las impurezas no se pueden distinguir fácilmente y presentan una tonalidad parda similar al óxido. Otras presentan tonalidad negra pero de diferente naturaleza.
RESIDUO DE LATÓN DEL PROCESO DE PULIDO	Amarillo opaco en el que se nota la presencia de pequeñas partículas de color dorado brillante	0.5 cm de largo de limalla metálica. Diámetro de la fibra de paño inferior a 0.2 mm. Diámetro promedio de la mota 0.1 cm. Dimensión promedio de un grano metálico 1.21 x 1.15 mm. (Sólo se consideraron los cristales con dimensiones susceptibles a ser medidos por el microscopio empleado)	100% polvo homogéneo en el que macroscópicamente no se observa distintos componentes.	Polvo de apariencia muy homogénea con partes doradas con brillo metálico similar a la escarcha. Las motas de fibra de paño no son fácilmente detectables. Las motas se distinguen únicamente al tacto. Microscópicamente las fibras de paño se encuentran completamente mezcladas con las limaduras y cristales de latón. Pequeñas limallas metálicas mezcladas con las fibras. En las motas de paño se encuentran alojados pequeños cristales de latón. Pequeños cristales con dimensiones menores a 0.2x0.2 mm. Las impurezas no se pueden distinguir fácilmente y presentan una tonalidad rojiza similar al óxido.

En la tabla 3.3, se resume las propiedades de los residuos observadas en el microscopio óptico de luz reflejada.

Como se puede constatar, el material residual del proceso de acabado de piezas es muy homogéneo y presenta zonas con brillo debido a la presencia de metales. Las impurezas no son fácilmente detectables El residuo de proceso de pulido presenta en su superficie diferentes materiales como: limalla metálica, fibras de paño y cristales de latón. Los contaminantes presentes se encuentran

completamente mezclados con el latón, es decir, los metales de interés se hallan unidos al material contaminante.

3.1.4. CARACTERIZACIÓN POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE LOS RESIDUOS DE LATÓN

La microscopía electrónica de barrido presenta como características más destacadas su elevada resolución y una gran profundidad de campo, lo que permite obtener imágenes de gran magnificación con efecto de relieve (en contraste con las imágenes planas de las microscopía óptica).

Para caracterizar y observar las superficies de los residuos de latón se realizó un análisis mediante microscopía electrónica de barrido, según la metodología descrita en la sección 2.1.1.5. En la figura 3.3, se presenta la estructura superficial del residuo analizado con 100 aumentos y 300 aumentos.

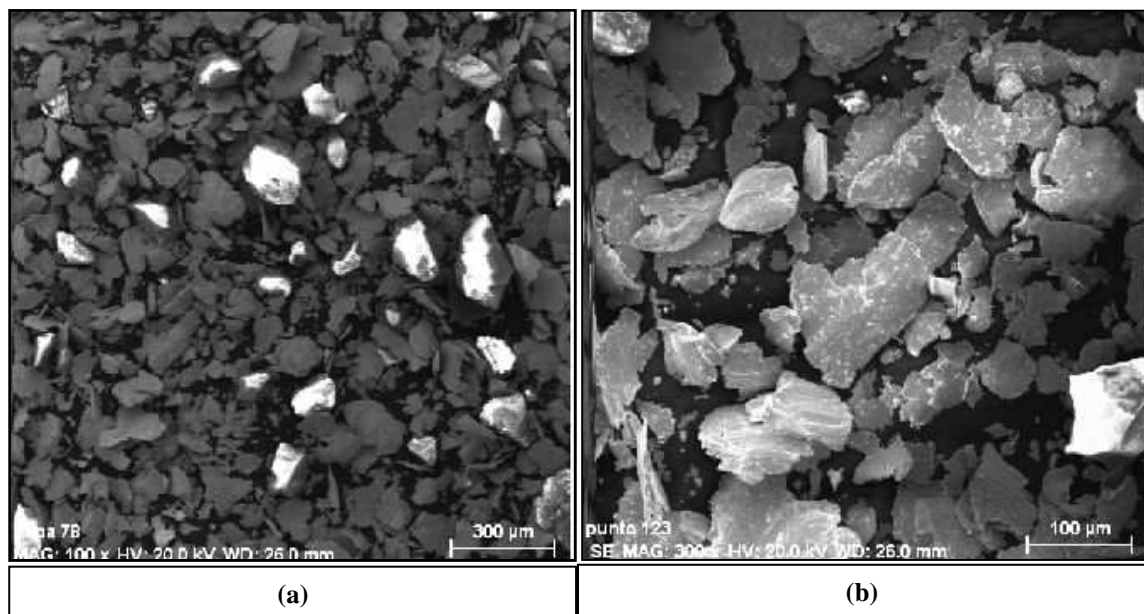


Figura 3.3. Fotografía de la superficie del residuo del proceso de acabado, mediante microscopía electrónica de barrido. (a) 100 aumentos. (b) 300 aumentos

Como se puede evidenciar, la superficie de este residuo está compuesto de partículas muy finas aproximadamente 100 [μm], lo cual se debe al proceso de

granallado al que se someten las piezas de grifería. Este proceso, ocasiona que además de la presencia de cobre y zinc en el residuo, exista la presencia de hierro. Cada metal es una parte individual en la superficie del residuo, de modo que no existe oclusión de los metales de interés.

En la figura 3.3. (a), se puede diferenciar zonas brillantes que corresponden al zinc metálico. El hierro al igual que los otros componentes, se halla en forma de gránulos libres, por tanto pueden ser separados con facilidad del residuo.

En la figura 3.3 (b), se analiza una zona más específica del desecho de latón, de modo que es posible observar claramente como los metales en la superficie se encuentran como partículas independientes, los mismos que presentan diferentes tamaños, debido a que se trata de una aleación que es la mezcla de varios elementos.

Por otro lado los residuos del proceso de pulido, se obtienen como resultado de la operación mecánica de rozamiento entre el agente pulidor (paño) y la pieza. Este residuo contiene virutas muy finas de latón y fibras de paño. Usando la metodología de la sección 2.1.1.5, se realizó un análisis de microscopía electrónica de barrido con el fin de observar la estructura superficial que presenta este material. En figura 3.4, se presentan imágenes de la estructura superficial del residuo de pulido analizado a 100 y 600 aumentos.

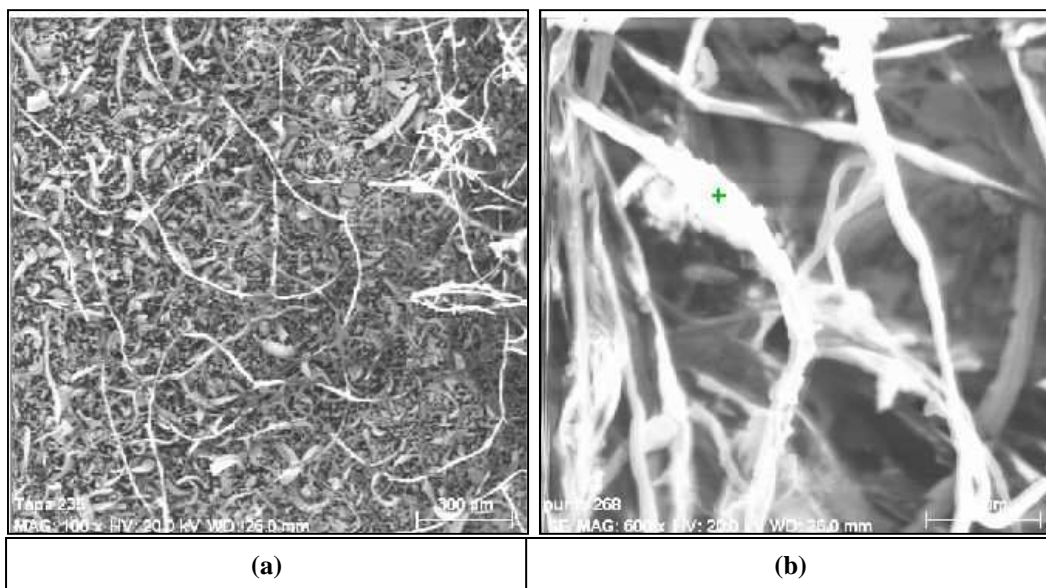


Figura 3.4. Fotografía de la superficie del residuo del proceso de pulido, mediante microscopía electrónica de barrido. (a) 100 aumentos (b) 600 aumentos

Como se puede constatar, la superficie de este tipo de residuo, es muy irregular y heterogénea, lo cual se debe a que existe la presencia de fibras de paño que contaminan al latón.

En la figura 3.2. (a), se puede diferenciar claramente dos zonas, una clara y la otra opaca. La primera corresponde a las fibras de paño, que son las responsables de contaminar al latón. La segunda, es la región donde se encuentra los metales de interés, la cual se encuentra rodeada parcialmente por las fibras, las mismas que dificultan la recuperación del metal.

En la figura 3.2. (b), se analiza las fibras presentes en la estructura del residuo, de modo que es posible observar claramente las incrustaciones de metales atrapados en estas fibras. De esta forma, se puede establecer la necesidad de liberar el latón de las impurezas que lo rodean, con el fin de que sea posible recuperarlo a través de un proceso de reciclaje.

3.2. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LOS RESIDUOS DE LATÓN

3.2.1. DETERMINACIÓN DEL pH DE LOS RESIDUOS DE LATÓN

Para realizar este ensayo, se empleó la metodología experimental descrita en la sección 2.1.2.1. Los detalles de este ensayo se especifican en el Anexo I. En la tabla 3.5, se detalla el valor del pH para los dos tipos de residuos.

Tabla 3.4. Determinación del pH de los residuos de latón

	Residuo de latón	
	Acabado de piezas	Pulido de piezas
pH	10,39	9,85

La determinación del pH de los residuos de latón se lo hizo en una solución con

40% de sólidos. Cuando el latón es combinado con el agua, la tendencia a la oxidación aumenta, pues los metales que lo conforman son muy susceptibles a este ataque. Cuando la velocidad de oxidación es alta, el valor del pH aumenta.

De acuerdo a los análisis químicos realizados a los residuos de latón, se puede constatar que los elementos mayoritario (Cu, Zn), se encuentran en cantidades similares en ambos tipos de residuos, pero la concentración del hierro es de 11,61% para el residuo del proceso de acabado y de 1,14% para el proceso de pulido. Como es evidente, el hierro presente en el material de pulido es casi la décima parte del metal encontrado en el residuo de acabado. Por esta razón, al estar en contacto con el agua la velocidad de oxidación será mayor al igual que su pH.

3.2.2. DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS EN LOS DESECHOS DE LATÓN DE LA INDUSTRIA DE LA GRIFERÍA

La metodología experimental descrita en la sección 2.1.2.2, se empleó para determinar la concentración de metales pesados. Los detalles del presente ensayo se indican en Anexo II.

En la tabla 3.5, se presenta los resultados del contenido metálico de los residuos de latón, determinados por absorción atómica.

Tabla 3.5. Concentración de metales pesados en los desechos de latón de la industria de la grifería

Muestra	Concentración [%]							
	Cu	Zn	Fe	Pb	Al	Si	Sn	Mn
Residuo de latón del proceso de acabado de piezas	47,83	36,64	11,61	1,50	0,30	5,21	0,94	0,03
Residuo de latón del proceso de pulido de piezas	53,84	34,64	1,14	1,40	0,50	0,31	0,52	0,001
Latón comercial*	57-60	35-37	1	2-3,5	0,3	0,3	0,3	0,01

(*Vessa, 2000)

Los residuos de latón, poseen algunas concentraciones de metales, que difieren con el latón comercial, por ejemplo el hierro y el silicio se encuentran en cantidades superiores a las del latón comercial, esto como consecuencia de los procesos de los que provienen estos materiales, y de la disposición de los mismos. El cobre y el zinc, los elementos mayoritarios del latón se hallan, en valores similares a los del latón comercial. Por lo que se refiere al resto de elementos, las cantidades son casi despreciables en todos los casos.

El residuo de latón del proceso de acabado de piezas se encuentra compuesto principalmente de cobre y zinc, con una concentración de 47,83 % y 36,64 % respectivamente, lo cual es lógico, puesto que este material se ha obtenido como producto del tratamiento superficial que se da a las piezas de latón, que es una mezcla de cobre y zinc.

El hierro constituye el principal contaminante de este material, con una concentración de 11,61 %, esto se debe a que el latón original es bombardeado por sinnúmero de microesferas de acero, generando como residuo polvo de latón contaminado con partículas de hierro. Por lo tanto la alta concentración de hierro, ejercerá interferencias durante el proceso de purificación de este residuo. En lo que se refiere al resto de elementos analizados, las concentraciones promedio son bajas, consecuentemente, no ejercerán mayor influencia durante los ensayos.

Al igual que el residuo de latón del proceso de acabado de piezas, el residuo del proceso de pulido tiene un alto contenido de cobre y zinc. Las concentraciones promedio de estos metales son de 53,84 % para el cobre y 34,64 % para el zinc.

En este caso la concentración promedio del hierro es de 1,14 %. Esto implica que no tiene un contenido significativo, por lo que no ejercerá mayor interferencia en la purificación de latón.

Por otro lado, las concentraciones del resto de metales analizados, no presentan mayor influencia durante el reciclaje de la aleación. Estas concentraciones de los metales considerados como impurezas son bajas y similares a los valores

reportados para el residuo de latón del proceso de acabado de piezas.

3.2.3. CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS DE LATÓN DE LA INDUSTRIA DE LA GRIFERÍA MEDIANTE DIFRACCIÓN DE RAYOS X

La difracción de rayos X permite determinar los compuestos y aleaciones presentes en las muestras del proceso de acabado y pulido de piezas de latón, los mismos que se detallan en la tabla 3.6. Para realizar este ensayo, se empleó la metodología descrita en la sección 2.1.2.3.

Tabla 3.6. Análisis de difracción de rayos X de residuos de latón de los procesos de acabado y pulido de piezas

Mineral	Fórmula	Residuo del proceso de acabado	Residuo del proceso de pulido
		Contenido [%]	Contenido [%]
Cobre-Zinc alfa latón	$\text{Cu}_{0,64}\text{Zn}_{0,56}$	58	42
Cobre-Zinc	Cu_5Zn_8	20	45
Cobre-Zinc, latón	(Cu,Zn)	10	10
Quarzo	SiO_2	9	--
Akermanita	$\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{Si}_2\text{O}_7)$	3	3

Como se puede observar en la tabla 3.6, los dos tipos de residuos están compuestos por cobre y zinc principalmente, una pequeña parte está compuesta por impurezas de silicio. En la caracterización química del residuo del proceso de pulido de piezas, mediante absorción atómica, se determinó que la concentración de cobre era de 47,83 % y para el zinc 36,64 % y para el caso del residuo de latón del proceso de pulido era de 53,84 % para el cobre y 34,64 % para el zinc, de modo que la mayor parte de esta aleación se encuentra en forma metálica, mientras que el resto se encuentra en forma de óxidos.

Se puede observar la presencia de silicio en el residuo de latón proveniente del proceso de pulido en forma de óxido, debido a que el almacenaje de este material es a la interperie facilitando su contaminación. El principal contaminante, del material guardado en un lugar no adecuado, son pequeñas partículas de arena,

provenientes del ambiente. Estas partículas tienen como principal componente el óxido de silicio o sílice.

3.2.4. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LAS MUESTRAS DE LATÓN DEL POR MEDIO DEL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO

Otra de las grandes ventajas de la microscopia electrónica de barrido es que al estar integrado con equipos de microanálisis, lo cual permite determinar la naturaleza química de partículas a nivel microscópico.

Para la caracterización química de los residuos de latón, proveniente del proceso de acabado y pulido de piezas de latón, se realizó un análisis químico elemental semicuantitativo, mediante el microscopio electrónico Tescan, como se especificó en la sección 2.1.2.4. En el Anexo III, se detalla el ensayo de MEB para los residuos de latón. En diferentes secciones del residuo se analizaron los siguientes elementos: cobre, oxígeno, hierro, silicio, zinc y plomo. En la figura 3.5, se representa la ubicación global de los elementos para la imagen con 100 aumentos del residuo del proceso de acabado.

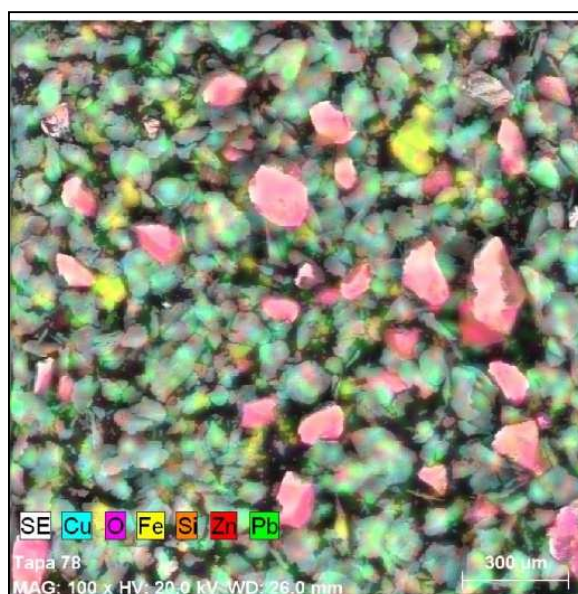


Figura 3.5. Mapeo químico elemental del residuo del proceso de acabado de piezas.

En la figura 3.6, se muestra la ubicación elemental dentro del residuos de latón del proceso de acabado de piezas.

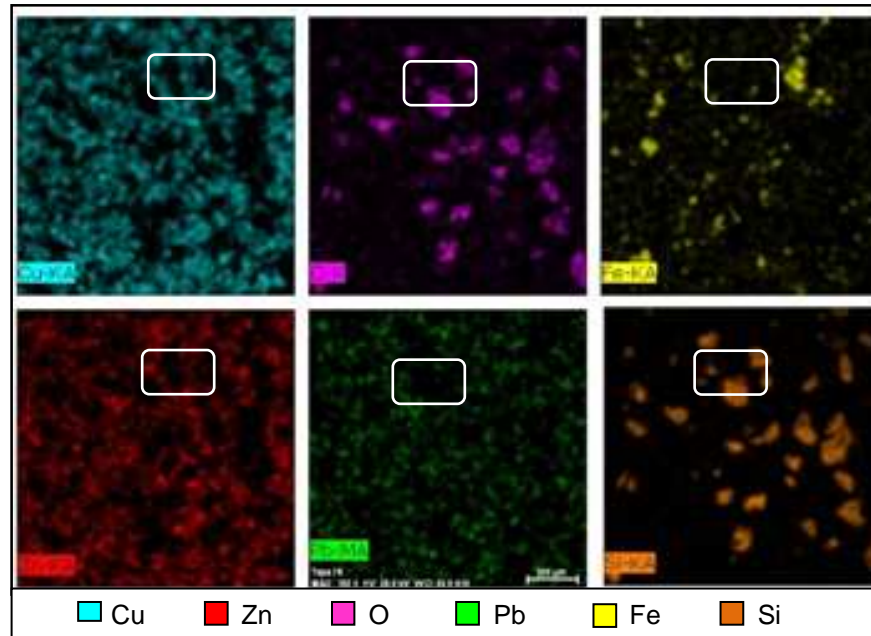


Figura 3.6. Mapeo químico de cada metal del residuo del proceso de acabado (100 aumentos)

En las figura 3.5 y 3.6, se puede observar, que los elementos predominantes son el cobre, el zinc y el plomo en menor cantidad. El cobre y el zinc son los principales elementos de la sección del residuo, el oxígeno y silicio se encuentran en la misma posición, por tanto están formando óxido de silicio.

El plomo es un componente minoritario del residuo de latón, pero su presencia ayuda a la formación de una aleación particularmente adecuada para la mecanización en el torno. De hecho el plomo permanece insoluble y externo a la estructura cristalina y se dispersa en los extremos de los granos: de este modo la viruta es más corta y las herramientas sufren un menor desgaste, con la consecuente mejora de la calidad y velocidad de mecanización. (KME Group, 1999).

En la figura 3.5, se puede observar que no hay unión de los metales componentes, cada uno se encuentra libre en forma de gránulos. Por tanto no hay

problemas de liberación de los metales de interés.

En la tabla 3.7, se detalla el análisis semicuantitativo efectuado a través del MEB y con ayuda del programa Espirit 1.8.

Tabla 3.7. Resultados para el análisis semicuantitativo del residuo de latón del proceso de acabado piezas (100 aumentos) usando Analizar RX (MEB-TESCAN)

Elemento	Concentración [%]
Cobre	46,12
Zinc	27,30
Hierro	6,92
Plomo	2,05
Oxígeno	9,38
Silicio	6,92

Este análisis corrobora que los elementos más abundantes son el cobre y el zinc, Así mismo, se puede observar que existe una concentración significativa de oxígeno y silicio, esta concentración es similar a la determinada por difracción. En el caso de absorción atómica, el contenido de silicio obtenido es menor a los otros dos análisis. De la misma manera, se puede observar que existe una concentración significativa de hierro al igual que en el análisis por absorción atómica.

Para el residuo de latón del proceso de pulido, se detalla la ubicación global de elementos para la imagen con 100 aumentos, en la figura 3.7.

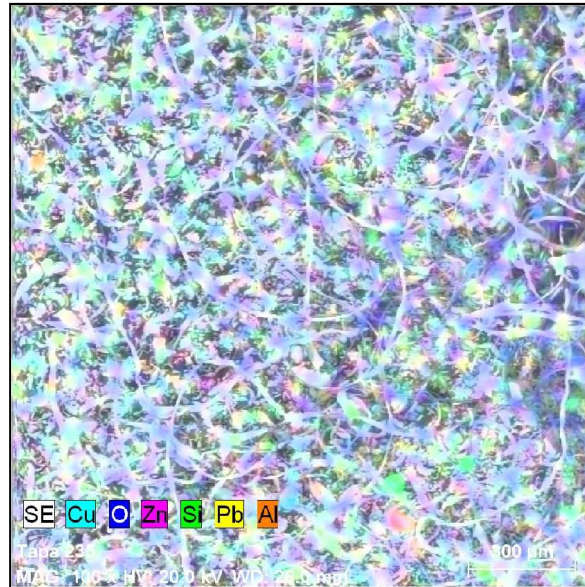


Figura 3.7. Mapeo químico elemental del residuo de latón del pulido (100 aumentos)

En la figura 3.8, se presenta la ubicación de cada elemento dentro de la imagen del residuo de pulido.

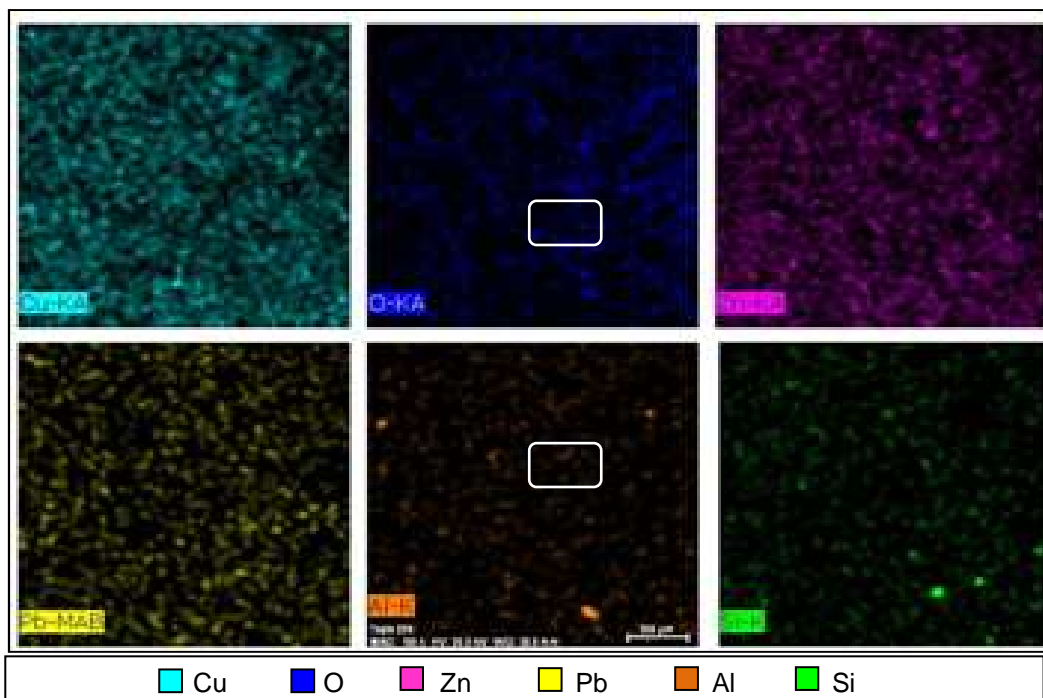


Figura 3.8. Mapeo químico de cada metal de residuo de latón del pulido (100 aumentos)

Como se puede observar en las figuras 3.7 y 3.8, los elementos mayoritarios son

el cobre y el zinc. Las fibras, que se evidencian en la figura 3.8, están dispersas en toda la superficie del residuo, poseen trazas de cobre y zinc, debido a que los metales se encuentran ocluidos en ellas.

Al analizar la figura 3.8, se puede constatar que el oxígeno, plomo, aluminio y silicio, presentan una coloración muy leve, lo cual implica que no existen concentraciones significativas de dichos elementos en la composición del residuo de latón del proceso de pulido.

En la tabla 3.8, se presenta los resultados del análisis semicuantitativo realizado por el microscopio electrónico de barrido.

Tabla 3.8. Resultados para el análisis semicuantitativo del residuo de latón del proceso de pulido de piezas (100 aumentos), usando Analizar Rx (Meb-Tescan)

Elemento	Concentración [%]
Cobre	62,94
Zinc	33,20
Hierro	0,64
Plomo	1,63
Oxígeno	0,41
Silicio	0,36
Aluminio	0,81

El análisis semicuantitativo, presentado en la tabla 3.8, confirma que el cobre y el zinc son los metales de mayor concentración. En lo que se refiere al resto de metales las concentraciones son bajas, esto es visible en los tres análisis de determinación de contenido de metales. Como se aprecia a pesar de que la absorción atómica y difracción de rayos x, analizan a la muestra de una manera global, no solo superficial, el contenido metálico en el residuo del proceso de pulido es muy parecido.

En la tabla 3.9, se muestra el análisis semicuantitativo realizado por el MEB, con ayuda del programa Spirit, de la fibra de paño mostrada en la figura 3.4 (b).

Tabla 3.9. Resultados para el análisis semicuantitativo de la fibra de paño, presente en el residuo de latón del proceso de pulido (600 aumentos), usando Analizar RX (MEB-Tescan)

Elemento	Concentración [%]
Carbón	57,89
Oxígeno	17,32
Cobre	26,54
Zinc	4,18

De acuerdo a los resultados presentados en la tabla 3.9, se puede visualizar que el elemento mayoritario presenta en la fibra de paño es el carbón, debido a que se trata de una fibra vegetal natural cuyo componente mayoritario es la celulosa, que es una molécula que contiene carbonos en su estructura.

También existe una cantidad apreciable de oxígeno, ya que el carbón tiene afinidad con este. Además la presencia de cobre y zinc, ya que se encuentran atrapadas en la estructura de la fibra

3.3. ENSAYOS DE SEPARACIÓN MAGNÉTICA DE RESIDUOS DE LATÓN DEL PROCESO DE ACABADO

3.3.1. ENSAYOS SEPARACIÓN MAGNÉTICA EN SECO

A continuación se presentan los resultados de los ensayos en los que se elimino el exceso de hierro de los residuos que contienen fragmentos de granalla, mediante separación magnética por vía seca. Los ensayos se realizaron conforme la metodología descrita en la sección 2.2.1. Los resultados de los ensayos, se reportan en el Anexos V.

La separación magnética seca, divide al material en dos fracciones que son: la magnética (Mag.) y la no magnética (No mag.). Las recuperaciones de latón se

calculan al dividir los pesos obtenidos en cada fracción, para el total de material alimentado.

Las concentraciones de metales de cada fracción de la separación magnética, a Campo magnético aplicado (CMA) de 570, 516 y 462 [Gauss] y las recuperaciones de latón, se detallan en la tabla 3.10.

Tabla 3.10. Concentración de metales y recuperación de latón, en el proceso de separación magnética seca

	CMA [Gauss]	570		516		462		570-516-462	
	Fracciones	No mag.	Mag.	No mag.	Mag.	No mag.	Mag.	No mag.	Mag.
Contenido [%]	Cu	56,00	39,08	50,20	35,03	49,84	34,78	52,57	36,69
	Fe	4,74	17,21	5,90	21,42	6,85	24,87	2,10	27,21
	Zn	35,00	28,46	35,05	28,50	36,25	29,48	38,28	28,46
	Al	0,58	0,45	0,53	0,41	0,63	0,49	0,58	0,45
	Mn	0,04	0,10	0,06	0,15	0,09	0,23	0,04	0,10
	Si	0,64	0,40	0,71	0,44	0,72	0,45	0,64	0,40
	Pb	2,98	1,55	3,41	1,77	3,26	1,70	2,98	1,55
	Sn	0,27	0,35	0,32	0,41	0,40	0,52	0,27	0,35
Alimentación [g]		351,6		351,7		352,4		800	
Cantidad [g]		310,1	41,6	285,5	66,2	283,7	68,7	687,7	112,3
Recuperación de latón w/w [%]		88,18		81,18		80,52		85,96	

La recuperación del hierro se favorece, con la aplicación de un CMA bajo, debido a que este metal es ferromagnético, estos son materiales que experimentan alto paramagnetismo ante la aplicación de un campo magnético, como se observa en la tabla 3.9, los CMA de trabajo son sumamente bajos.

Otro factor importante que influyó fue el tamaño de partícula pues mientras menor es este parámetro, el Campo Magnético Aplicado debe ser menor. En este caso el d80 determinado para el residuo del proceso de acabado es pequeño, de 95 [µm], por tanto el campo magnético aplicado fue el indicado para este tipo de muestra.

Además se comprobó que en las fracciones no magnéticas de este ensayo, el contenido de hierro disminuye considerablemente, mientras que en las fracciones magnéticas esta concentración aumenta.

En la figura 3.9, se ilustra el contenido de hierro presenta en cada fracción de la separación. El hierro como principal contaminante, ha disminuido de manera importante de la muestra original (11,61% Fe), que es el propósito de este ensayo.

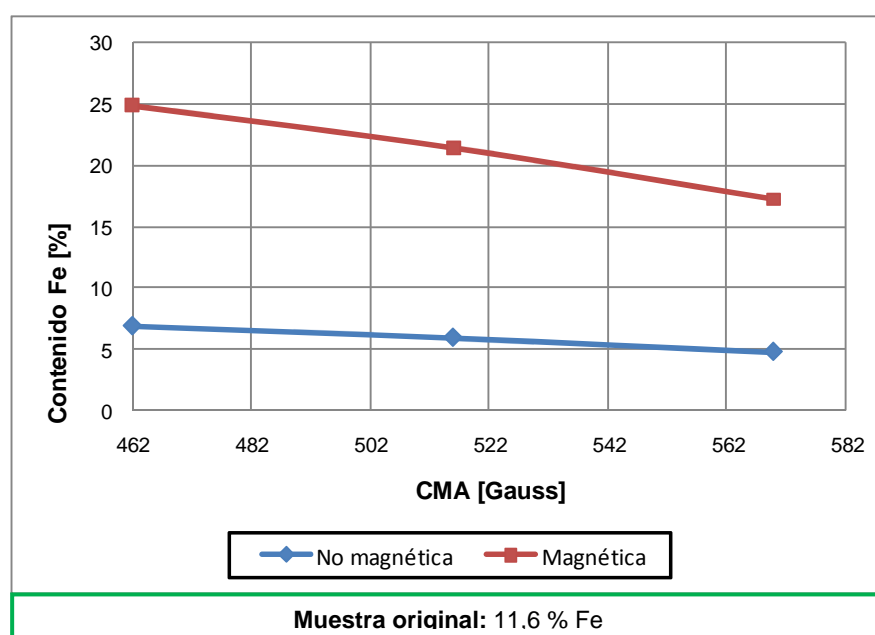


Figura 3.9. Variación del contenido de hierro, con cada de fracción a diferente CMA en la separación magnética seca

La fracción no magnética, es la parte de interés en este ensayo, como se observa, los metales predominantes en esta fracción a los diferentes CMA, son el cobre y el zinc. En lo que se refiere al resto de elementos analizados, las concentraciones promedio presentan valores menores al 1 %, consecuentemente no ejercieron influencia durante el proceso de separación magnética por vía seca.

Con respecto a las recuperaciones en peso de latón purificado, en todos los ensayos esta sobre el 80%, sin embargo en ninguna de las separaciones cumple con la disminución de hierro hasta valores inferiores al 1%.

La máxima recuperación de latón purificado (fracción no magnética), 88,18%, se obtuvo al trabajar a un CMA de 570 [Gauss], en este caso se obtuvo un latón con una concentración de hierro de 4,74%.

El contenido de hierro remanente, señala la necesidad de un proceso de purificación del latón residual, mostrada en la sección de ensayos de fusión.

3.3.2. ENSAYOS DE SEPARACIÓN MAGNÉTICA EN HÚMEDO

En este ensayo, se separa materiales magnético (Mag.) de los no magnéticos (No mag.), cuando la alimentación del material al equipo es hecha con la adición de agua. En la tabla 3.10, se detallan el contenido de metales pesados en cada fracción en cada pasada de material por el separador magnético húmedo, y las recuperaciones en peso de latón obtenidas. La metodología experimental empleada, se presenta en la sección 2.2.2 y resultados se muestra, en el Anexo V.

Tabla 3.11. Concentración de metales y recuperación de latón, en el proceso de separación magnética húmeda

N° pasos	1		2		3		
	No mag.	Mag.	No mag.	Mag.	No mag.	Mag.	
Contenido [%]	Cu	57,70	43,74	60,30	45,72	62,80	47,61
	Fe	3,23	34,14	2,33	24,62	1,48	15,64
	Zn	34,48	26,14	30,64	23,23	29,95	22,71
	Al	0,31	0,39	0,29	0,36	0,20	0,25
	Mn	0,22	0,01	0,19	0,01	0,18	0,01
	Si	0,46	1,84	0,53	2,12	0,64	2,56
	Pb	2,52	3,67	2,74	3,99	3,01	4,38
	Sn	0,32	0,33	0,35	0,36	0,39	0,40
Alimentación [g]	2900		4504,9		3275,9		
Cantidad [g]	2 593,3	306,7	3 977,9	527	2 838,7	437,2	
Recuperación de latón w/w [%]	89,42		88,30		86,65		

Como se puede apreciar la mayor recuperación de latón purificado (89,42 %) se alcanzó con la primera pasada en el separador magnético húmedo. Al igual que en la separación magnética seca, las concentraciones de metales son similares.

El cobre y el zinc son los componentes mayoritarios y la presencia de hierro ha disminuido a 3,23 %.

En la figura 3.10, se puede observar que las concentraciones de hierro en las fracciones magnéticas aumentan, por el contrario el contenido de hierro disminuye en la fracción no magnética. Esto significa que este ensayo cumple con las metas de su aplicación.

La ventaja que presenta este tipo separación se encuentra en la capacidad del equipo (1 ton/h), ya que permite procesar una mayor cantidad de material respecto al ensayo en seco, de igual forma la recuperación es mayor que en la separación magnética por vía seca.

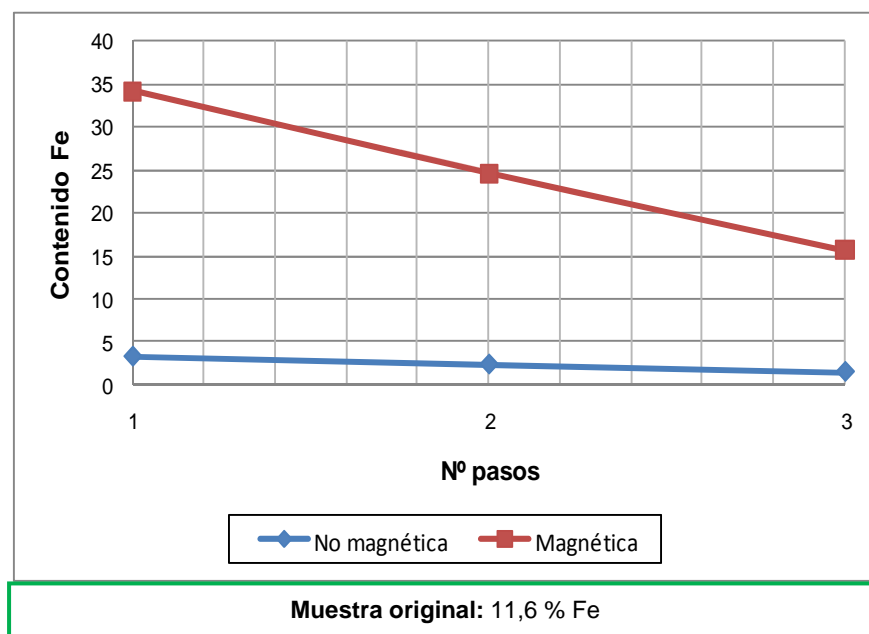


Figura 3.10. Variación del contenido de hierro, con cada en cada fracción a diferente número de pasadas en el separador magnético húmedo

Cabe mencionar, que por efectos del agua las muestras podrían formar una pequeña capa de óxido superficial, sin embargo la aplicación de procesos posteriores no se ve afectada por este efecto.

3.4. MÉTODO DE CLASIFICACIÓN POR TAMAÑO DE PARTÍCULA DE RESIDUOS DEL PROCESO DE PULIDO

3.4.1. SEPARACIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA MEDIANTE TAMIZADO

En esta sección, se representan los resultados obtenidos para la eliminación de la fibra de paño del residuo de latón del proceso de pulido, mediante separación física. La separación física por tamizado es una operación mecánica, en la separación de la mezcla de partículas sólidas. Cada fracción obtenida es más uniforme en tamaño que la mezcla original. Se empleó separación física por tamizado como tratamiento para eliminar las fibras de paño presentes, mediante la metodología descrita en la sección 2.3.1. En la tabla 3.12 se exponen los pesos de las fracciones obtenidas en cada tamiz.

Tabla 3.12. Peso retenido en cada malla

Malla [#]	Abertura [μm]	P _{retenido} [g]	P _{retenido} [%]
+40	425	0,3	0,12
+50	300	0,3	0,12
+60	250	0,2	0,08
+70	212	0,3	0,12
+80	180	0,6	0,25
+100	150	9,8	4,01
+200	75	18,8	7,69
+270	53	45,9	18,77
+325	45	24,6	10,06
+400	38	20,4	8,34
-400	<38	123,4	50,45
Total		244,6	

En la figura 3.11, se representa un gráfico con base a la tabla 3.11, de la variación existente entre la abertura de tamiz y el peso retenido en cada tamiz.

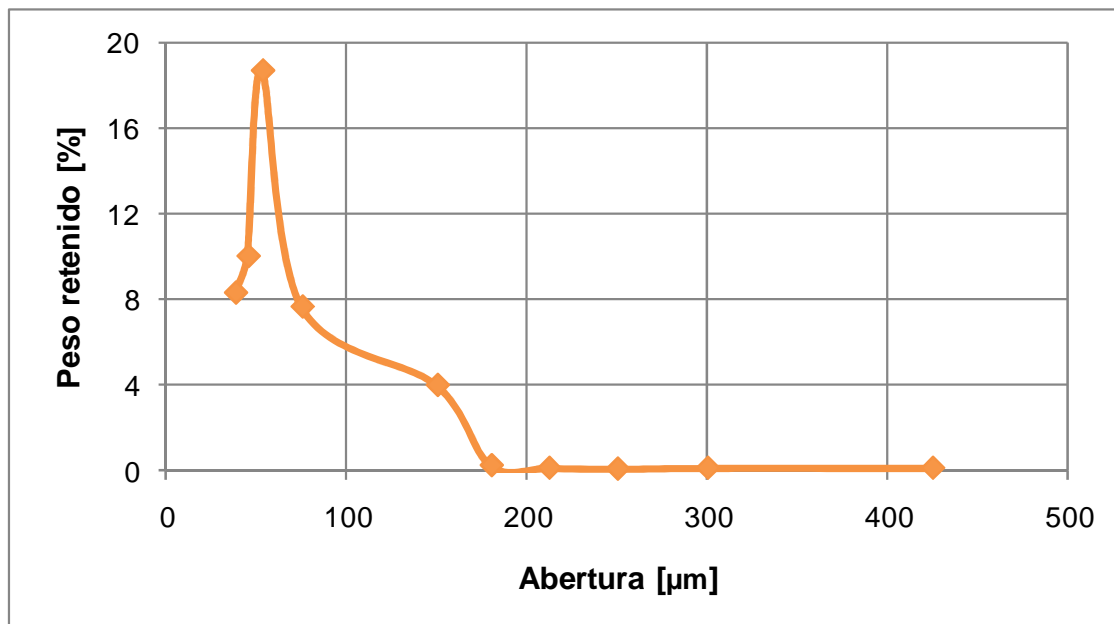



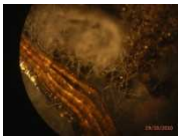
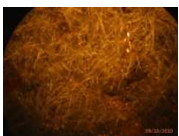
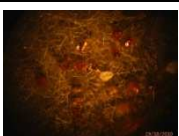




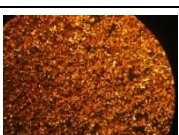

Figura 3.11. Peso retenido en cada tamiz

Como se puede observar en la figura 3.11, el porcentaje de material retenido en las mallas con abertura de tamiz de 425 a 180 [μm], es casi despreciable, ya que en estas mallas, el material retenido está formado principalmente por pequeños fragmentos de la fibra de paño.

A partir de un tamaño de partícula de 150 [μm], (malla #100), el porcentaje de material retenido, es de 4% que es bajo pero un poco más apreciable, las siguientes mallas van incrementando este porcentaje, hasta llegar a la malla #270 (53 μm), donde se obtiene la mayor cantidad de material retenido, se obtiene en la malla

Con el fin observar las características del material retenido, se hizo un análisis con microscopía óptica de luz reflejada con 100 aumentos, estos resultados se observan en la tabla 3.13. El detalle de estos resultados se halla en el Anexo VII.

Tabla 3.13. Caracterización de las fracciones obtenidas por tamizado, usando microscopía óptica de luz reflejada

Malla #	Tamaño de partícula [μm]	Peso [g]	PORCENTAJE [%]	Imagen de microscopía óptica de luz reflejada a (10 aumentos)
+40	425	0.3	60% pelusa fina. 25% limallas metálicas. 15% impurezas.	
+50	300	0.3	65% pelusa fina. 10% limallas metálicas. 25% impurezas.	
+60	250	0.2	90% pelusa fina. 3% limallas metálicas. 7% impurezas.	
+70	212	0.3	20% pelusa fina. 80% polvo metálico contaminado con impurezas (30% de polvo metálico y 50% de impurezas).	
+80	180	0.6	55% pelusa contaminada con polvo metálico. 45% polvo metálico con pequeñas pelusas de impurezas 2.48 x 2.46 mm.	
+100	150	9.8	65% pelusa fina 10% limallas metálicas 25% impurezas	
+200	75	18.8	50% motas. 50% polvo dorado metálico.	
+270	53	45.9	100% Polvo homogéneo.	
+325	45	24.6	100% Polvo homogéneo.	
+400	38	20.4	100% Polvo homogéneo.	
-400	<38	123.4	100% Polvo homogéneo.	

En la tabla 3.13, se confirma que las mallas con abertura entre 425 y 180 [μm], retienen materiales como pelusas finas, malla metálicas e impurezas, razón por la cual el peso retenido en las mismas es menor al 1%.

Además, se puede observar que a partir de la abertura 150 [μm], el peso del material retenido es más apreciable, esto se debe en esta malla las partículas retenidas, también cuentan con la presencia de una pequeña cantidad de latón.

En la malla #200 (75 μm), la cantidad de polvo metálico aumenta, por lo que el porcentaje retenido también lo hace, pero todavía se observa la presencia de impurezas.

También se puede distinguir, que en la malla #270 se obtiene la mayor recuperación de polvo metálico limpio (el material obtenido está libre de impurezas de fibra de paño), y es un polvo 100% homogéneo. Esto nos indica que a 53 [μm], es donde las últimas impurezas de residuo son retenidas., por lo que esta abertura (malla #270), es la indicada para la purificación completa de fibras de este residuo metálico.

Para corroborar que en la malla #270, correspondiente a 53 [μm], en la figura 3.9, se muestra la fotografía de la fracción retenida en la misma, obtenida de microscopía óptica de luz reflejada a 100 aumentos.



Figura 3.12. Fotografía del material retenido en la malla #270, correspondiente a 53 [μm], mediante microscopía óptica de luz reflejada (100 aumentos)

Como se aprecia en la figura 3.12, el material retenido en la malla #200, corresponde a partículas metálicas. Esto confirma que esta fracción, esta purificada y libre de todo impureza no metálica.

En la figura 3.13, se presenta la fotografía del material correspondiente a < 38 $[\mu\text{m}]$, a 100 aumentos en el microscopio óptico de luz reflejada.

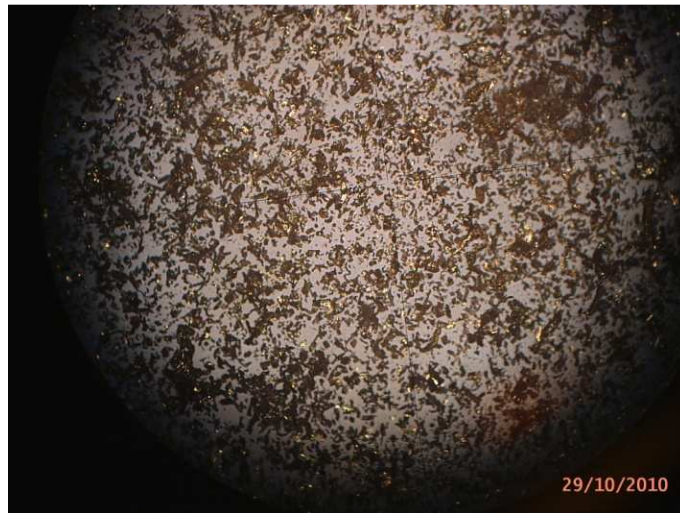


Figura 3.13. Fotografía del material < 38 $[\mu\text{m}]$, a 100 aumentos en el microscopio óptico de luz reflejada

La fotografía representada en la figura 3.13, muestran el aspecto del material luego del proceso de tamizado. Como se aprecia es un material totalmente limpio y libre de impurezas, compuesto netamente de partículas metálicas. Además se comprueba que el tamizado, es una técnica efectiva para el pretratamiento del residuo de latón del proceso de pulido, logrando la eliminación total del material no metálico.

Para el análisis de la influencia de tiempo de tamizado, se realizó ensayos a tiempos de 5, 10, 15 y 25 [min]. En la tabla 3.14, se especifican los resultados de la determinación de este parámetro.

Tabla 3.14. Variación de tiempo de tamizado con el peso retenido en la malla #200, a diferentes tiempos

Tiempo [min]	Peso retenido [%] Malla #200
5	10,88
10	8,33
15	7,87
25	6,59

En este caso el mayor porcentaje retenido se obtiene a los 5 min de proceso (10,88%).

En la figura 3.14, se representa un gráfico, basado en la tabla 3.14, de la variación existente en el tiempo de tamizado con el peso retenido.

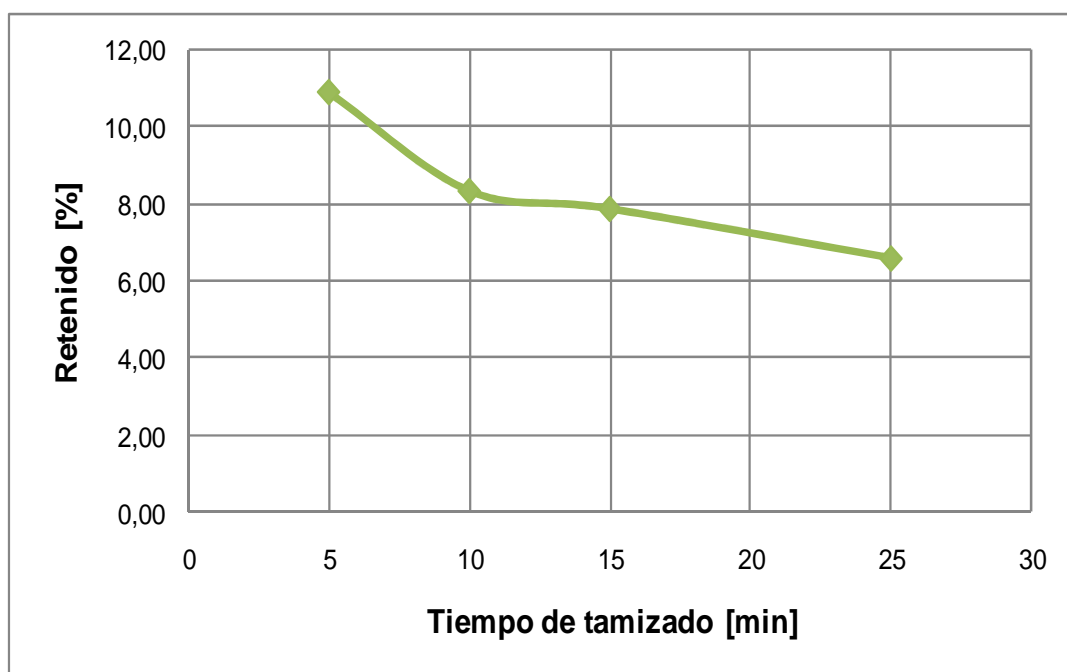


Figura 3.14. Variación del porcentaje de material retenido a diferentes tiempos en el proceso de tamizado

La determinación del tiempo de tamizado es muy importante en este ensayo, en la figura 3.14, se puede constatar la influencia del mismo sobre la cantidad de material retenido, este valor disminuye a mayor tiempo de proceso.

Normalmente mientras mayor es el tiempo de tamizado mayor es la recuperación de material, en este caso sucede el efecto contrario, la mayor recuperación se obtiene a los 5 min de ensayo. Este comportamiento atípico se debe a que, mientras más tiempo de tamizado se dé a este residuo, las delicadas fibras de paño contenidas en el mismo se van desintegrando y como consecuencia pasan al siguiente, contaminado nuevamente las fracciones de latón de tamaños menores.

Para la caracterización química del material $< 75 \mu\text{m}$, obtenido como producto del pretratamiento mediante separación física por tamizado y 5 min de ensayo, se hizo un análisis elemental mediante absorción atómica.

En la tabla 3.15, se muestra el contenido de metales pesados para la fracción $< 75 \mu\text{m}$, del tamizado a 5 min.

Tabla 3.15. Contenido de metales pesados de la fracción $< 75 \mu\text{m}$, a 5 min de tamizado

Tamaños de partícula [μm]	Tiempo [min]	Contenido [%]							
		Cu	Fe	Zn	Al	Mn	Si	Pb	Sn
<75	5	51,21	0,34	29,19	0,36	0,19	0,48	1,98	0,29

Como se aprecia en la tabla 3.15, las concentraciones de los metales pesado en la fracción $< 75 \mu\text{m}$ y 5 min de tamizado, presentan como elementos predominantes al cobre y zinc. Continúa la presencia de hierro, pero en concentraciones muy bajas. Los otros metales restantes, también se encuentra en una cantidad poco apreciable (0,19-1,98%), por lo que no existirá interferencia de los mismos en los posteriores procesos de purificación del residuo de pulido de piezas.

3.5. ENSAYOS DE FUSIÓN DE LOS RESIDUOS DE LATÓN PRETRATADOS

3.5.1. ENSAYO DE FUSIÓN CON CARGA FUNDENTE ESTÁNDAR PARA LOS DESECHOS INDUSTRIALES DE LATÓN

El tratamiento final dado a la fracción no magnética (residuos del proceso de acabado) y fracción menor a 75 [um] (residuo del proceso de pulido), fue el proceso de fusión. En este ensayo se utilizó la metodología descrita en la sección 2.4.1.

En este ensayo se homogeniza los componentes de la carga fundente detallada en la sección 2.4.1, se coloca en un crisol y se la coloca en un horno de crisol a gas a una temperatura aproximada de 1 200 °C y un tiempo de 45 min. En la figura 3.15, se indica el procedimiento seguido para este ensayo.

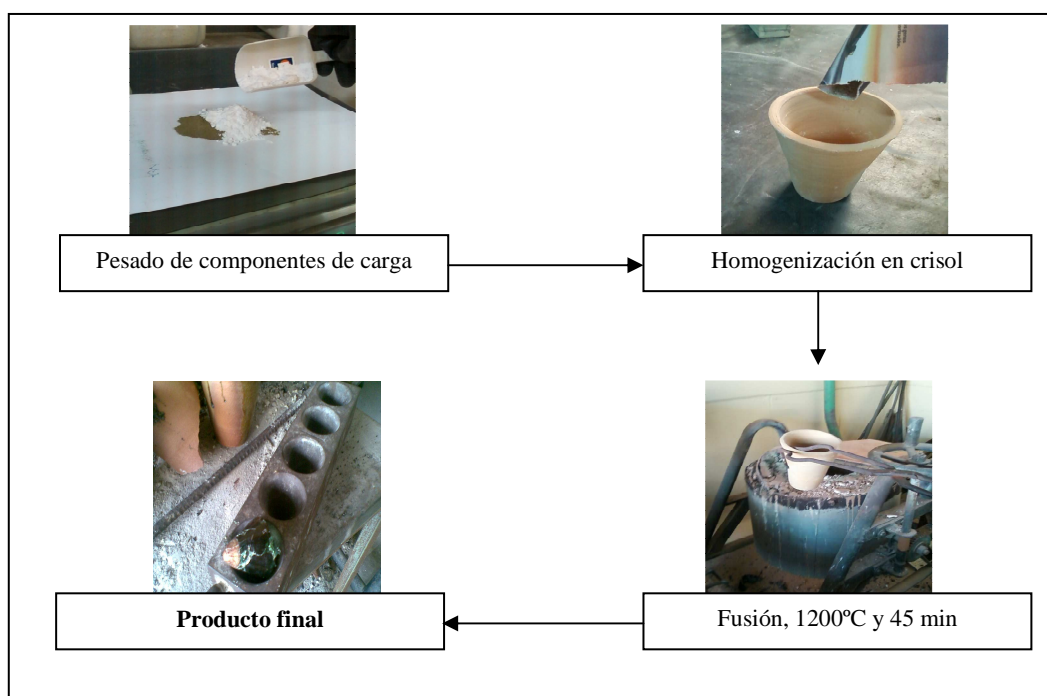


Figura 3.15. Procedimiento seguido para la fusión de material de latón pretratado

En la figura 3.16, se aprecia el producto obtenido de la fusión con carga fundente estándar en un horno a gas, por 45 minutos.



Figura 3.16. Muestras pretratadas, después de fusión con carga típica fundente en horno de crisol a gas

Las fotos representadas en la figura 3.16, muestran las características de la muestra pretratada luego de salir del horno de crisol. En este caso vemos que el material presenta una coloración rojiza que se debe a la presencia mayoritaria de cobre. El cobre es un elemento químico, que sin alear, presenta un característico color rojizo.

En la tabla 3.16, se muestra el contenido de metales presentes en la pieza fundida de latón con una carga fundente estándar.

Tabla 3.16. Concentración de metales, en muestra pretratada luego de fusión con carga estándar fundente en horno de crisol gas

Muestra	Contenido [%]							
	Cu	Fe	Zn	Al	Mn	Si	Pb	Sn
Fundida	77,24	0,32	3,46	0,02	0,7	0,75	1,54	0,41

Como se puede conocer en la tabla 3.16, la cantidad hierro presente es de 0,3 %, está dentro de los requerimientos de este metal en el latón. Pero también se observa que el cobre tiene una concentración muy elevada y es el metal principal.

El zinc, no tiene predominancia en la aleación obtenida, su concentración es poco considerable, esto probablemente se debe a que este elemento tiene un punto de fusión de 400 °C y un punto de evaporación de 600 °C. Estas propiedades ocasionan el mayor problema, ya que al estar el resto de la mezcla a una mayor temperatura (cerca a los 1000 °C), ocasionando que el zinc se volatilice. El flujo de aire que se suministró al horno a gas, influyó de gran manera a la oxidación de este metal, ya que la velocidad de oxidación del zinc es mayor que la del cobre.

La disminución del contenido del zinc en el material obtenido como producto, indica la necesidad de encontrar nuevas alternativas para evitar las pérdidas de este metal en el latón. Para esto se han encontrado agentes fundentes como las sales de cloro, que evitan la oxidación del zinc.

3.5.2. IDENTIFICACIÓN DE SALES DE CLORO PARA EL PROCESO DE FUSIÓN DE DESECHOS INDUSTRIALES DE LATÓN

Para la identificación de sales de cloro que eviten la pérdida de zinc, en la aleación, se efectuaron los ensayos de fusión a 1000 °C en una mufla eléctrica.

Esta temperatura se seleccionó para lograr que cada sal se funda y pueda crear una capa protectora para la aleación, de modo que no se produzca oxidación del zinc para el presente estudio. La metodología experimental empleada se detalla en la sección 2.4.2.

En la tabla 3.16, se especifican las recuperaciones de latón obtenidas en la fusión del material pretratado en presencia de sales de cloro. Las recuperaciones se calculan mediante la relación entre el régulo obtenido y la cantidad de materia prima utilizada para el ensayo.

Tabla 3.17. Recuperaciones de latón de la fusión de material pretratado en presencia de sales de cloro

Sal de cloro	Recuperación [%]	Observaciones
Cloruro de potasio (KCl)	77,8	Se produce un material fluido que puede ser colado
Cloruro de sodio (NaCl)	< 0,01	Se genera un material duro color negro, en forma de polvo y que no puede ser colado
Cloruro de calcio (CaCl ₂)	< 0,01	
Cloruro de zinc (ZnCl ₂)	< 0,01	
Cloruro de amonio (NH ₄ Cl)	< 0,01	

Como se puede observar en la tabla 3.17, el cloruro de potasio es el único que permite obtener recuperaciones de latón, debido a que esta sal se funde a menor temperatura, por lo que se difunde de mejor manera alrededor del material.

En lo que se refiere al resto de sales, no se logró fundir el material, esto debido estas sales no logran proporcionar una capa protectora a la muestra, pues a pesar que la mufla eléctrica no presenta un suministro de aire, el aire contenido en la cámara de operación es suficiente para provocar la oxidación del material de latón. En la figura 3.12, se hace una comparación de la muestra con la adición de KCl y con las demás sales de cloro (NaCl, CaCl₂, ZnCl₂ y NH₄Cl), con este tipo de problemas y la muestra original.



Figura 3.17. (a) Muestra sin fundir (b) Muestra fundida

Como se aprecia en la figura 3.17(a), es una muestra sin fundir, presenta aglomeración y su color se torna negro, no es posible su colada. La figura 3.17 (b), ilustra la apariencia de una muestra cuya fusión se logró, pues es líquida y permite ser colada.

De esta forma se puede establecer que tan solo el cloruro de potasio es capaz de crear una capa protectora alrededor de las muestras purificadas, de modo que se evita en gran parte la oxidación del material. El resto de sales presenta una acción que no es efectiva, por lo que la mayor parte de la materia prima se oxida y consecuentemente, no se funde.

Cabe mencionar que el cloruro de amonio vaporiza a temperaturas de 363 °C, por lo tanto al ser sometido a fusión, se descompone en amonio y ácido clorhídrico, compuestos tóxicos para la salud y forma una capa blanquecina de la sal sobre el crisol de trabajo, lo cual explica que no exista ninguna recuperación.

En el caso del cloruro de zinc, presenta una temperatura de fusión muy baja (290° C). La fundición de latón se hace a temperaturas elevadas, por lo que esta sal funde mucho antes de que el latón logre estar en estado líquido, lo que provoca que no exista recuperación de la aleación.

Una vez determinado, que el cloruro de potasio evita la oxidación del zinc y permite obtener una recuperación de latón > 70 %, se estudió la alternativa de combinarlo con otra sal.

El cloruro de sodio es una sal de menor precio que el cloruro de potasio, por lo que se busca realizar una mezcla entre los dos y así tratar de abaratar costos en fusión.

En la tabla 3.18, se especifican las recuperaciones obtenidas para las mezclas de sales con distintas concentraciones de la sal de cloro a la temperatura de trabajo. La metodología experimental empleada para estos ensayos, se detalla en la sección 2.4.3.1.

Tabla 3.18. Recuperaciones para la definición de la concentración de cada sal de cloro dentro de una mezcla fundente a la temperatura de trabajo para material pretratado

Concentración de KCl [% mol]	Concentración de NaCl [% mol]	Recuperación [%]
100	0	76,7
70	30	< 1,0
50	50	< 1,0
30	70	< 1,0
20	80	< 1,0
0	100	< 1,0

Como se detalla en la tabla 3.18, los ensayos realizados para esta sección presentaron solo recuperación cuando el cloruro de potasio esta al 100% con una recuperación de 76,7 [%], lo que implica que con esta sal el material se funde con facilidad, lo cual permite extraer la mayor parte de latón contenido en el material pretratado.

Con las mezclas binarias probadas, no se logra extraer latón, pues la muestra no funde. Esto se debe a que el latón se oxidó, pues estas mezclas no tienen la capacidad para rodear al material y protegerlo, como consecuencia no se logró recuperar ningún producto de la fusión.

El cloruro de potasio, obtuvo la única recuperación de latón, de modo que el latón se funde fácilmente y permite que la sal rodee al material y evite la oxidación del mismo casi por completo. Esta es la principal razón de porque las muestras de latón fundan en presencia del cloruro de potasio.

En el caso del cloruro de sodio, se visualizó una recuperación de latón despreciable, de modo que esta sal no presenta la capacidad para evitar la oxidación del mineral.

3.5.3. DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN PARA LA FUSIÓN DE DESECHOS DE LATÓN EN PRESENCIA DE SALES DE CLORO

La definición de los parámetros se realizó en una mufla eléctrica, a una temperatura de trabajo de 1000 °C y con tiempos de fusión de 30 y 45 [min]. La metodología experimental utilizada, se detalla en la sección 2.4.3.

Se definirán los siguientes aspectos:

- Carga de sales fundentes respecto a la carga del material pretratado
- Tiempo de fusión
- Implementación de agitación

3.5.3.1. Definición de carga de sales fundentes respecto a la carga de material pretratado, el tiempo de trabajo e implementación de agitación para el proceso de fusión

El parámetro a determinar es la relación entre la cantidad de cloruro de potasio y la cantidad de materia prima. En esta sección se analiza la variación de recuperaciones, al variar el porcentaje de carga de sal y el tiempo de fusión para la temperatura de trabajo, además la implementación de agitación en el proceso de fusión, como se muestra en la tabla 3.19.

La metodología experimental utilizada para estos ensayos 2.4.3.2, 2.4.3.3 y 2.4.3.4. Los detalles de los ensayos se encuentran en el Anexo IX.

La recuperación se obtiene mediante la relación entre el peso del régulo metálico obtenido y la cantidad [g] de materia prima (residuo de latón pretratado).

Tabla 3.19. Recuperaciones para la definición de la concentración del cloruro de potasio, el tiempo de fusión y la homogenización

Tiempo [min]	Concentración de KCl [%]	Recuperación [%]
30	0	0,0
	10	28,0
	16	50,8
	20	54,8
	30	70,4
	40	62,4
45	0	0,0
	10	39,4
	16	54,6
	20	57,8
	30	80,2
	40	56,6

En la figura 3.18, se representa un gráfico comparativo, con base a la tabla 3.18, de la variación existente en la recuperación de latón de acuerdo a la composición del cloruro de potasio para cada tiempo y con homogenización mediante la aplicación de agitación, en el proceso de fusión de material metálico pretratado.

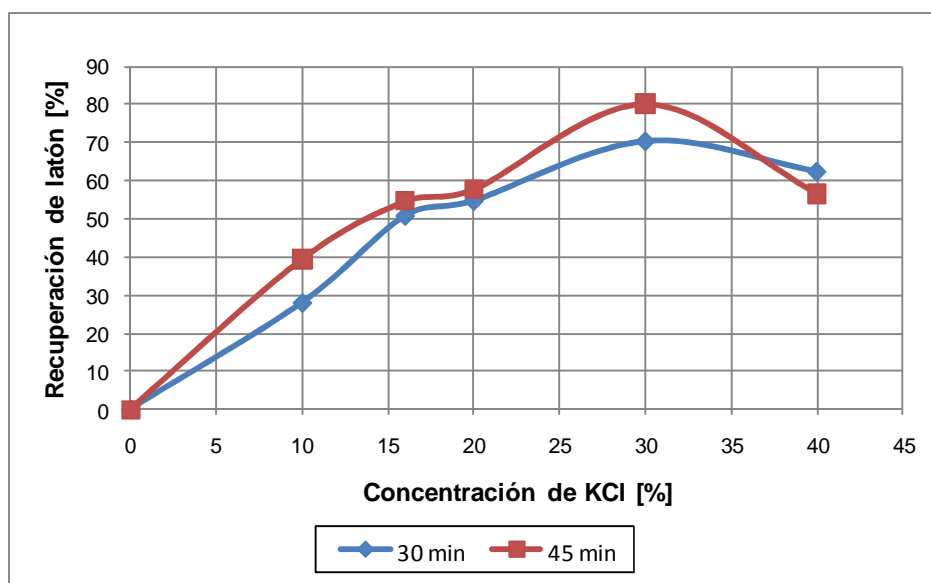


Figura 3.18. Variación de la recuperación de latón con la cantidad de cloruro de potasio para cada tiempo de fusión y homogenización

Como se puede constatar en la figura 3.18, los ensayos de fusión en presencia de cloruro de potasio, permitieron obtener recuperaciones de latón superiores al 70 %.

Al fundir el material en ausencia de sales, el residuo pretratado no funde, por lo que no existe recuperación de la aleación, lo cual indica que la sal de cloro presenta una acción muy efectiva para prevenir la oxidación del zinc y ayuda a la recuperación del latón. Pues el cloruro de potasio al pasar a estado líquido, presenta la capacidad para rodear al material al protegerlo, de modo que el grado de oxidación disminuya y la recuperación aumente.

El análisis de la influencia del tiempo de operación es muy importante en los procesos de fusión, las recuperaciones a 30 y 45 [min], siguen la misma tendencia, sin embargo a los 45 [min] las recuperaciones de latón obtenidas, son ligeramente más altas que a los 30 [min]. Esto nos indica que el factor que influye en la recuperación, es la cantidad de cloruro de potasio empleada. La máxima recuperación, 80.2 %, se obtuvo al trabajar con una carga de cloruro de potasio del 30% y un tiempo de fundido de 45 [min].

En la tabla 3.20, se puede visualizar, las concentraciones de los metales pesados existentes en latón obtenido como producto de fusión de material metálico tratado preliminarmente, en presencia de sales de cloro a diferentes concentraciones y tiempos de fusión, adicionalmente empleando homogenización mediante agitación en el proceso.

Tabla 3.20. Concentraciones de metales pesados en material fundido con diferentes cantidades de cloruro de potasio, a 30 y 45 [min]

Tiempo [min]	KCl [%]	Contenido [%]							
		Cu	Fe	Zn	Al	Mn	Si	Pb	Sn
30	0	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
	10	63,96	1,91	29,33	0,56	0,04	0,71	1,75	0,14
	16	61,33	1,20	33,27	0,45	0,04	0,64	1,55	0,08
	20	64,65	1,05	33,35	0,32	0,03	0,63	1,50	0,04
	30	62,83	1,08	35,77	0,67	0,02	0,81	1,40	0,02
	40	67,32	0,69	30,25	0,50	0,04	0,52	1,57	0,02
45	0	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
	10	67,54	0,99	31,32	0,02	0,01	0,73	1,82	0,04
	16	64,70	0,86	33,35	0,04	0,04	0,62	1,79	0,20
	20	63,73	0,84	30,29	0,02	0,04	0,41	1,77	0,30
	30	59,43	0,67	31,39	0,02	0,03	0,53	1,84	0,06
	40	60,15	0,85	35,27	0,02	0,05	0,56	1,83	0,06
Latón comercial		57-60	1	35-37	0,3	0,01	0,3	2-3,5	0,3

En la tabla 3.20, se detallan el contenido de metales presentes en cada producto de la fusión con diferentes cantidades de sal del cloro para los dos tiempos.

En el caso de la cantidad de hierro, se observa que en la mayoría de ensayos es inferior al 1%, los elementos predominantes en el producto son el cobre y el zinc, y el resto de metales se encuentran en cantidades poco significativas.

Se puede también visualizar, que la prueba realizada con 30 [%] de KCl y 45 [min], presentó la mejor recuperación y que el contenido de metales es el indicado para un latón comercial.

Al comparar los contenidos de metales del latón comercial respecto a los de esta prueba casi todos los valores de las concentraciones cumplen con las especificaciones del latón comercial, a excepción del plomo que presenta un valor de 1,84% cuando el requerimiento está de 2 a 3,5 %, como podemos ver no es tan apreciable la diferencia entre los dos.

La agitación es un parámetro adicional que se implementa en los ensayos de fusión de material metálico pretratado con el fin de mejorar las recuperaciones de este material, para lo cual se realiza una comparación para el proceso con y sin agitación.

Estos ensayos se efectuaron con agitación mecánica, para lo cual se buscó un mecanismo de operación. Se realizaron dos tipos de pruebas, la agitación con una varilla de madera y la segunda con varilla de acero inoxidable.

La prueba sin agitación en la fusión, provocó que el producto obtenido no sea homogéneo, es así que se realizó un corte del material, con el fin de hacer un análisis microscópico del interior del material recuperado, dicha sección se ilustra en la figura 3.19.

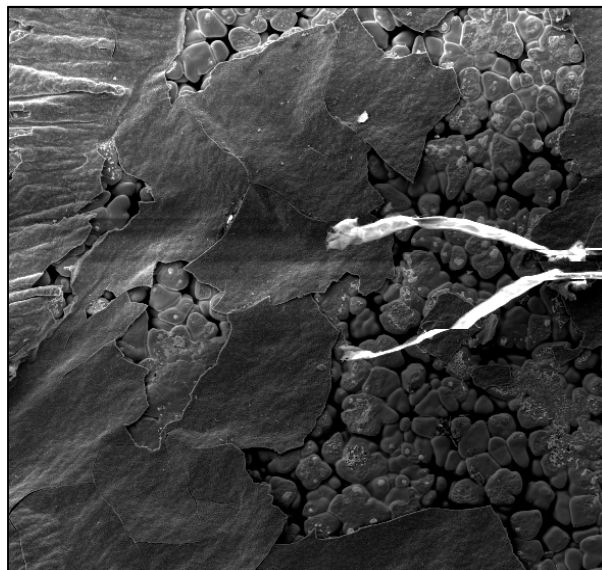


Figura 3.19. Sección transversal de una pieza de latón, sin agitación en el proceso de fusión

Como se puede observar, la superficie de la sección es sumamente irregular, debido a la formación de pequeñas grietas y cavidades superficiales. Con el fin de averiguar el origen de estas cavidades y grietas, se realizó un análisis por medio de microscopia de barrido.

En la figura 3.20, se analiza composición de la muestra durante la solidificación de latón, luego de un proceso de fusión sin agitación, obtenida a través del MEB con 200 aumentos.

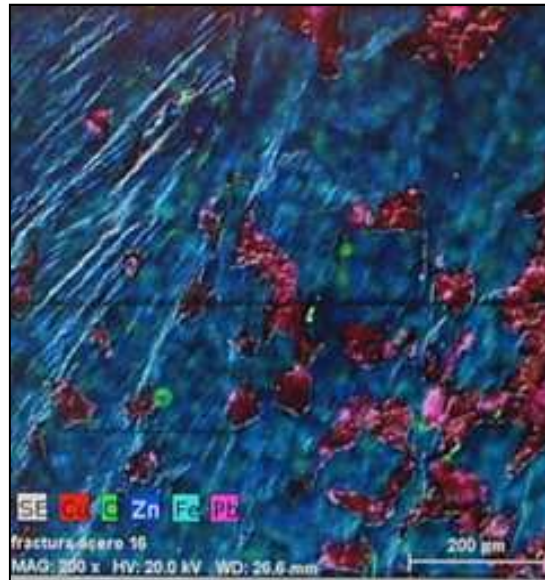


Figura 3.20. Cavidades y grietas formadas durante la solidificación de latón obtenido en la fusión de material metálico pretratado sin agitación

Como se aprecia la aleación es heterogénea, el metal predominante en el material es el zinc. No se trata de una aleación de cobre y zinc, sino simplemente de un material con altos contenidos de zinc.

En el segundo ensayo se realizaron pruebas con varilla de madera, con el fin de mantener a la muestra sin contaminación de otros metales. Se observó que durante la agitación del material, la varilla sufrió un proceso de combustión por la elevada temperatura de fusión, lo cual ocasionó que la muestra no se funda obteniéndose una fusión incompleta.

El tercer ensayo de fusión utilizó una varilla metálica para agitar el sistema. Se visualiza que al agitar el material con la varilla metálica para agitar el sistema, el material no sufrió ningún cambio. Se obtuvo una sección transversal de la pieza, con el fin de compararla con los casos anteriores, la misma se muestra en la figura 3.21.

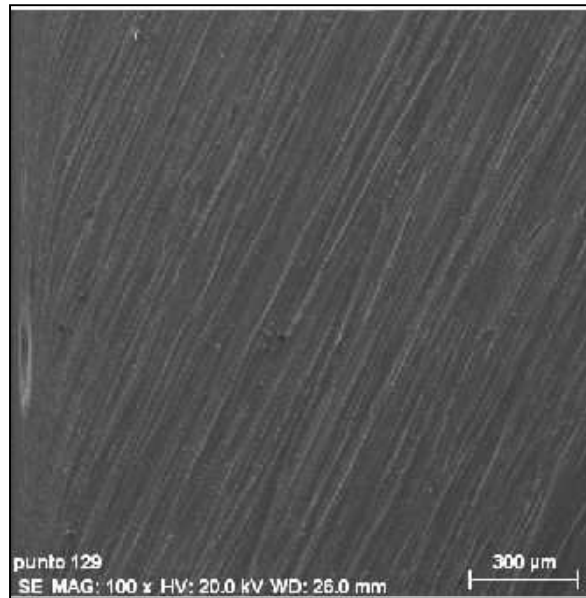


Figura 3.21. Superficie de latón obtenido en la fusión de material pretratado de latón con agitación del sistema con una varilla metálica

Como se puede observar, la superficie es bastante lisa, presenta pequeñas rayaduras superficiales. Con el fin de determinar el origen de estas irregularidades, se realizó un mapeo elemental de la superficie, como se indican en la figura 3.22.

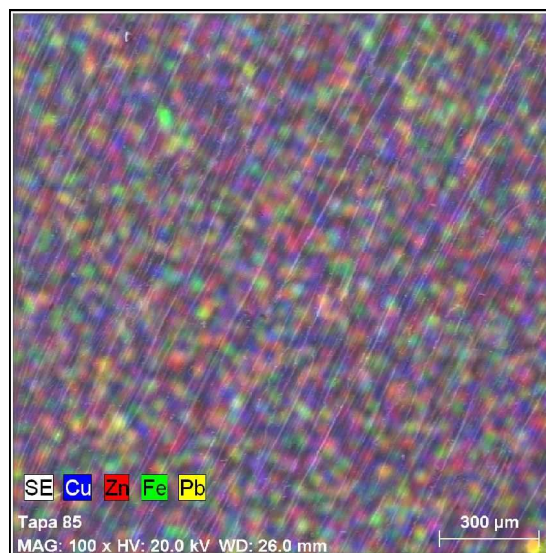


Figura 3.22. Mapeo químico elemental de la superficie de latón obtenida en la fusión de material pretratado con agitación del sistema con varilla metálica

Además, se realizó el desglose por elementos de este mapeo, con el fin de observar de mejor manera la concentración de cada elemento. El mapeo por elementos se muestra en la figura 3.23.

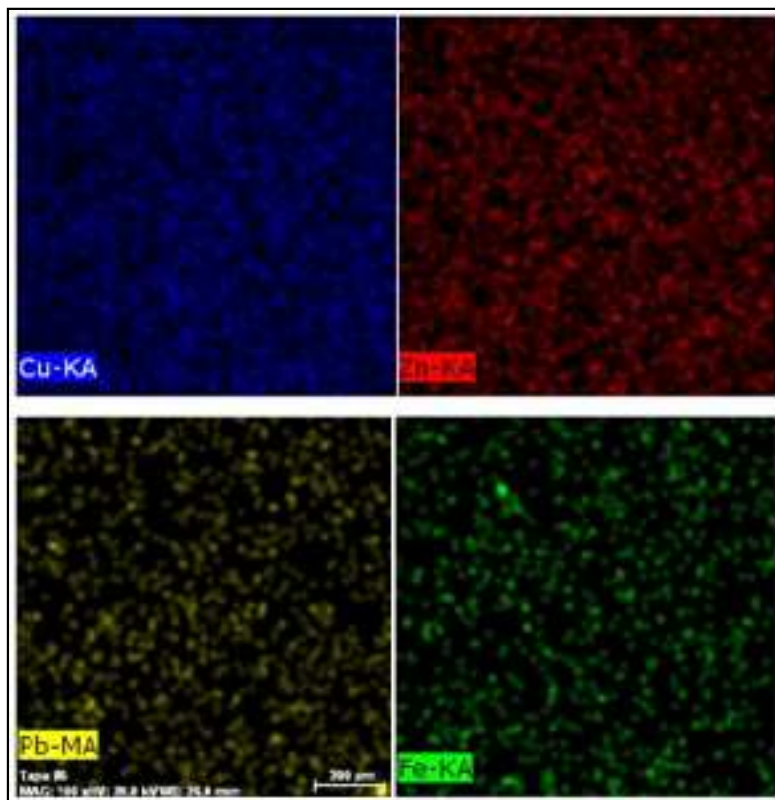


Figura 3.23. Mapeos químicos de cada metal para la superficie de latón obtenida en la fusión de material pretratado con agitación del sistema con varilla metálica

Como se puede ver en la figuras 3.22 y 3.23, los elementos mayoritarios en la superficie analizada son el cobre y el zinc, todavía existe una pequeña concentración de hierro y plomo.

En el mapeo individual, se observa que los metales cobre y zinc se encuentran en las mismas posiciones, esto quiere decir que se hallan perfectamente combinados, formando una aleación muy homogénea. En la tabla 3.21, se representa en análisis cuantitativo para la superficie analizada.

Tabla 3.21. Concentraciones elementales de cada metal para la superficie de latón de la fusión de material de material pretratado con agitación del sistema con varilla metálica

Elemento	Concentración [%]
Cobre	66,28
Zinc	31,01
Hierro	0,97
Plomo	1,97

De esta forma, se verifica que la concentración del hierro es pequeña, consecuentemente, la agitación para estos ensayos se debe realizar con una varilla metálica, ya que evita que el material se contamine con elementos adicionales.

3.6. CALIDAD DE LOS PRODUCTOS DE LATÓN DE FUNDICIÓN EN PRESENCIA DE CLORURO DE POTASIO

Para el análisis de calidad, se emplearon las muestras de los proceso de pretratamiento de los residuos de acabado y pulido de piezas. Estas muestras son fracción no magnética y la fracción menor a 75 μm . En la tabla 3.22, se resume las mejores condiciones de trabajo y su recuperación.

Tabla 3.22. Condiciones de operación definidas para la fundición de material metálico pretratado en presencia de cloruro de potasio

Material	Temperatura °C	KCl [%]	Agitación	Tiempo [min]	Recuperación [%]
Fracción no magnética	1000	40	Sí	45	80,2
Fracción menor 75 μm	1000	40	Sí	45	80,2

Para el análisis de calidad se emplearon 2 métodos: espectrofotometría de absorción atómica y microscopia electrónica de barrido. Se emplearon estos 2

análisis, al ser análisis complementarios que permiten efectuar evaluaciones de elementos.

La microscopía electrónica de barrido permite realizar un análisis elemental de la superficie, mientras que el análisis de absorción atómica permite analizar elementos de toda la muestra analizada, no solo superficialmente.

3.6.1. CALIDAD DEL PRODUCTO DE LATÓN OBTENIDO A PARTIR DE LA FUNDICIÓN DE LA FRACCIÓN NO MAGNÉTICA

Una vez elaborada la fundición de la fracción no magnética, con las condiciones definidas en la tabla 3.22, se procedió a analizar la calidad del producto obtenido. En la tabla 3.23, se resume los resultados obtenidos para los 2 métodos de análisis utilizados.

Tabla 3.23. Análisis de calidad para el producto obtenido de la fundición de fracción no magnética para las mejores condiciones operatorias

Método de análisis	Contenido [%]							
	Cu	Fe	Zn	Al	Mn	Si	Pb	Sn
Espectrofotometría de absorción atómica (AA)	59,43	0,67	31,39	0,02	0,03	0,53	1,84	0,06
Microscopía electrónica de barrido (MEB)	66,28	0,97	31,09	<1,00	<1,00	<1,00	1,97	<1,00
Latón comercial	57-60	1	35-37	0,3	0,01	0,3	2-3,5	0,3

Como se puede constatar en la tabla 3.23, las concentraciones de cobre son superiores al 59% y las de zinc al 30%, en consecuencia, el producto obtenido presenta muy poca cantidad de impurezas.

Las concentraciones de hierro son menores al 1%, por lo que ya no se considera una impureza que contamina al latón, sino un elemento en las concentraciones indicadas para la aleación. De igual manera, el plomo con una concentración de aproximadamente 2%, similar a la del latón comercial.

3.6.2. CALIDAD DEL PRODUCTO DE LATÓN OBTENIDO A PARTIR DE LA FUNDICIÓN DE LA FRACCIÓN <75 [um]

Una vez definido los parámetros de operación en la tabla 3.22, se procedió a analizar la calidad de producto obtenido. En la tabla 3.24, se resumen los resultados obtenidos para los 2 métodos de análisis usados.

Tabla 3.24. Análisis de calidad para el producto obtenido de la fundición de la fracción - < 75 [um] para la mejores condiciones de operación

Método de análisis	Contenido [%]							
	Cu	Fe	Zn	Al	Mn	Si	Pb	Sn
Espectrofotometría de absorción atómica (AA)	60,55	0,40	29,35	0,02	0,03	0,53	1,79	0,06
Microscopía electrónica de barrido (MEB)	62,13	0,34	28,71	<1,00	<1,00	<1,00	1,73	<1,00
Latón comercial	57-60	1	35-37	0,3	0,01	0,3	2-3,5	0,3

En la tabla 3.24, se pueden distinguir que las concentraciones de cobre son mayores al 60% y las de zinc al 28%, en consecuencia, el producto obtenido presenta muy pocas impurezas.

Las concentraciones de hierro son inferiores al 1%, por lo que ya no se considera importante. El plomo está en una concentración que cumple las especificaciones de latón comercial.

3.7. DISEÑO CONCEPTUAL Y ANÁLISIS ECONÓMICO PRELIMINAR DEL ESTABLECIMIENTO DE UNA PLANTA DE PURIFICACIÓN DE RESIDUOS INDUSTRIALES DE LATÓN PARA SU RECICLAJE.

3.7.1. DISEÑO CONCEPTUAL PARA EL PROCESAMIENTO DE RESIDUOS INDUSTRIALES DE LATÓN PARA SU RECICLAJE

3.7.1.1. Volumen a producir en una planta de purificación de residuos de latón para su reciclaje

El consumo de cobre y sus aleaciones reciclados, a nivel mundial, ha crecido un 20% en cinco años, pero registró una pequeña caída en 2008 (2,6% menos que en 2007). La reducción de un 5,2% se debió a la disminución del reciclaje directo de chatarra nueva. Europa fue la única región del mundo que a partir del año 2008 ha incrementado el consumo de cobre reciclado, ya que llegó a satisfacer en un 43% su necesidad de cobre con metal reciclado. (CEDIC, 2010)

El latón reciclado es fundamental para poder hacer frente a la demanda mundial de esta aleación, ya que se lo obtiene a precios más competitivos. Actualmente, más industrias dependen del reciclaje, ya que no sólo aporta la posibilidad de variaciones en los precios de las materias primas, sino que también permite aprovechar mejor las cualidades de este material, que es su capacidad de reciclado.

Con base a los datos proporcionados por una empresa ecuatoriana de grifería, cuyos residuos se están usando como materia prima de éste estudio, se ha estimado que la descarga promedio de residuos de latón es de 3,5 ton/mes, donde el 67% del material pertenecería al proceso de acabado de piezas y 33% al proceso de pulido de piezas.

Para el dimensionamiento de la planta se ha establecido un procesamiento de 2000 kg/mes de residuo de latón del proceso de acabado y 1000 kg/mes de residuo de latón del proceso de pulido de piezas. Se estimó una operación de 20 días al mes, durante 1 turno de 8 horas para la separación magnética y fusión y un turno de 5 horas para el tamizado.

3.7.1.2. Balance de masa realizado para la instalación de una planta de purificación de residuos de latón para su reciclaje

Se procesarán 100 kg/día de residuo de latón del proceso de acabado y 50 kg/día de residuo de latón del proceso de pulido en 2 líneas independientes.

Sobre esta base se realizó un balance de masa con las mejores condiciones experimentales obtenidas en las secciones 3.3.1 y 3.3.2, es decir las condiciones de separación magnética, para el caso del pretratamiento del residuo del proceso de acabado y la sección 3.4.1 separación por tamaño de partícula para el residuo del proceso de pulido.

En la figura 3.24, se presenta el diagrama del proceso de purificación de residuos de latón para su reciclaje, con los respectivos datos de proceso.

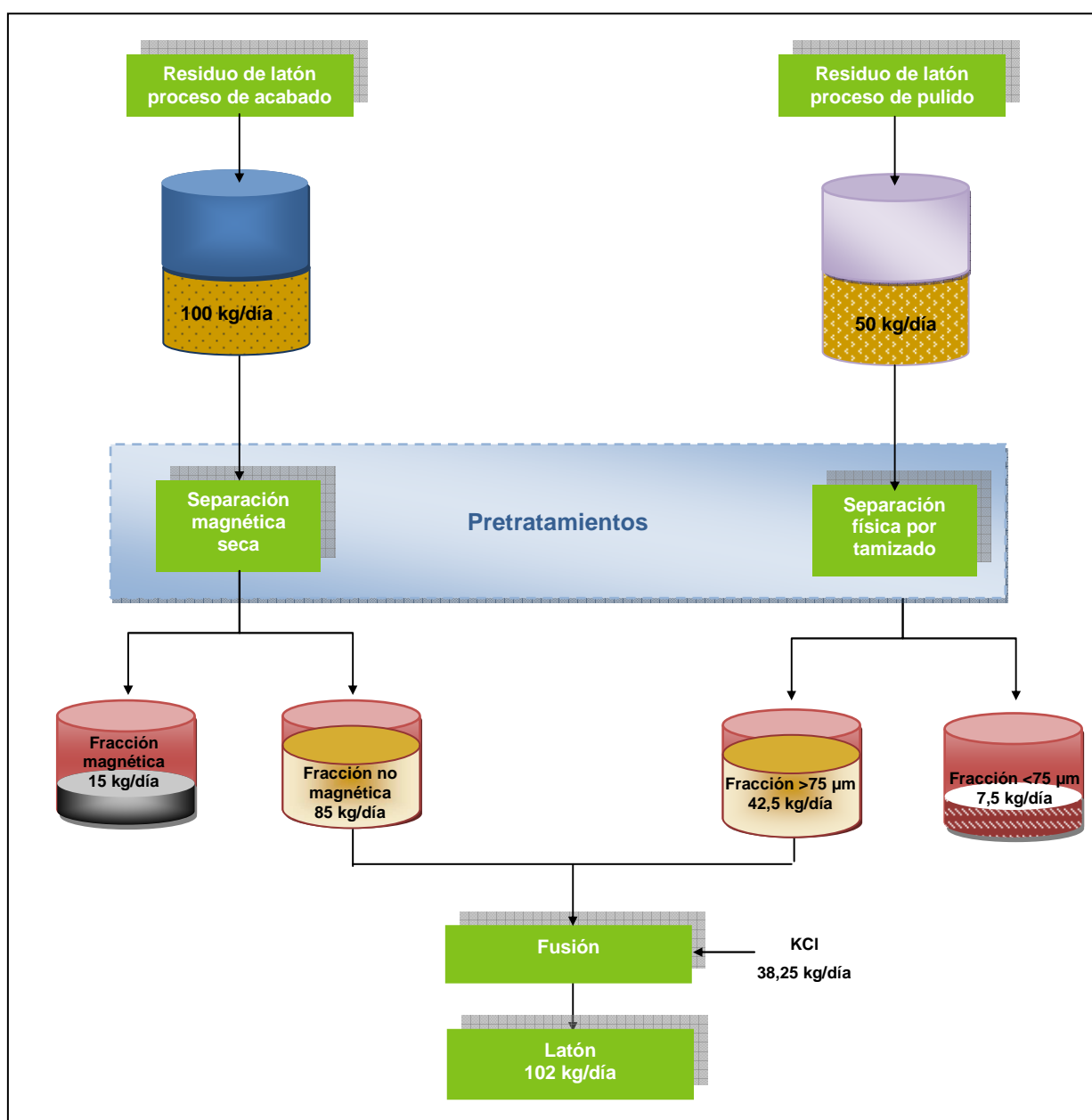


Figura 3.24. Diagrama de purificación de residuos de latón

Para el procesamiento de 100 kg/día de residuo de latón del proceso de acabado de piezas, se señalan los parámetros de operación para la separación magnética en las tabla 3.25.

Tabla 3.25. Condiciones de operación para la separación magnética seca del residuo del proceso de acabado de piezas

Tipo de muestra	Residuo de latón
Proveniencia	Proceso de acabado de piezas de grifería
Tipo de separación magnética	Vía seca
Campo magnético aplicado	570 [Gauss]

En la tabla 3.26, se indican las condiciones de operación para la fusión del residuo de latón del proceso de acabado de piezas.

Tabla 3.26. Condiciones de operación para la fusión de residuo del proceso de acabado pretratado

Tipo de muestra	Residuo de latón
Proveniencia	Proceso de acabado de piezas de grifería
Pretratamiento	Separación magnética seca
Temperatura de fusión °C	1000
Tiempo de fusión [min]	45
Fundente	Cloruro de potasio
Cantidad de fundente respecto a la muestra de latón inicial[%]	30
Homogenización	Si

En la figura 3.25, se ilustra el balance de masa elaborado para el tratamiento del residuo de latón del proceso de acabado de piezas, para un día de trabajo.

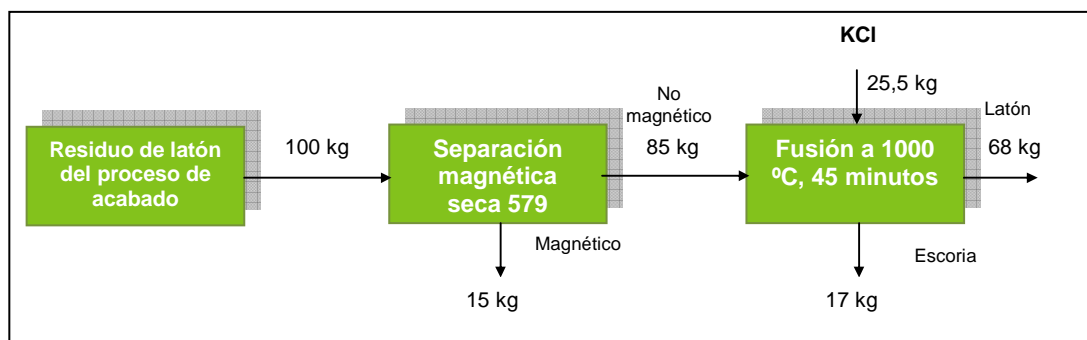


Figura 3.25. Balance de masa para la purificación del residuo del proceso de acabado

En la tabla 3.27, se presenta el resumen del balance de masa realizado para el proceso de purificación de residuos de latón del proceso de acabado.

Tabla 3.27. Balance de masa para la recuperación de latón del residuo del proceso de acabado de piezas, durante un día de trabajo

Corriente	Peso (kg)	Concentración de los minerales		
		Cobre [%]	Zinc [%]	Hierro [%]
Residuo de latón original	100	47,83	36,62	11,61
Fracción no magnética	85	56,00	35,00	4,74
Fracción magnética	15	39,08	28,56	17,21
Fusión	68	59,43	31,39	0,67
Cloruro de potasio (KCl)	25,5	-	-	-

Como se puede ver en la tabla 3.27, la cantidad de latón recuperado en el proceso de recuperación del residuo del proceso de acabado de piezas, es de 68 gramos correspondiente al 70% de recuperación global.

Para el procesamiento de 50 kg/día de residuo del proceso de pulido, en las tablas 3.28, se señalan las condiciones de operación para la separación física por tamizado y fusión.

Tabla 3.28. Condiciones de operación para la fusión de residuo del proceso de pulido de piezas pretratado

Tipo de muestra	Residuo de latón
Proveniencia	Proceso pulido de piezas de grifería
Pretratamiento	Separación física por tamizado
Temperatura de fusión °C	1000
Tiempo de fusión [min]	45
Fundente	Cloruro de potasio
Cantidad de fundente [%]	30
Homogenización	Si

Tabla 3.29. Condiciones de operación para la separación física por tamizado del residuo de latón del proceso de pulido de piezas

Tipo de muestra	Residuo de latón
Proveniencia	Proceso de pulido de piezas de grifería
Tipo de separación	Tamizado
Malla #	200 [75 μm]
Tiempo de tamizado [min]	5

El balance de masa realizado para el proceso de purificación de residuo de latón del proceso de pulido de piezas, se ilustra en la figura 3.26. el balance se hace para un día de producción.

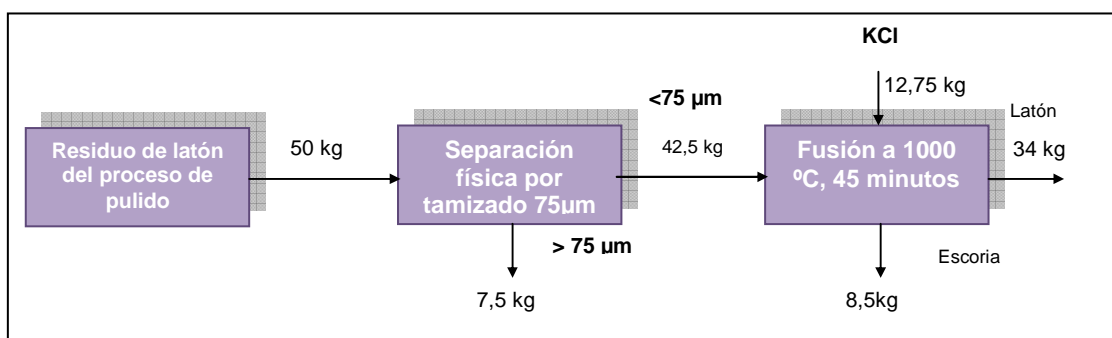


Figura 3.26. Balance de masa para la purificación del residuo del proceso de pulido

El resumen del balance de materia efectuado para el proceso de pulido, se detalla en la tabla 3.30.

Tabla 3.30. Balance de masa diario para la recuperación de latón del residuo del proceso de pulido de piezas

Corriente	Peso (kg)	Concentración de los minerales		
		Cobre [%]	Zinc [%]	Hierro [%]
Residuo de latón original	50	53,84	34,64	1,64
Fracción < 200 μm	42,5	51,21	29,19	0,34
Fracción +#200	7,5	--	--	--
Fusión	34	60,55	29,35	0,40
Cloruro de potasio	12,75	-	-	-

Para la determinación de la recuperación total del latón, se hace un balance de masa global para el proceso en general, tal como se muestra en la figura 3.27.

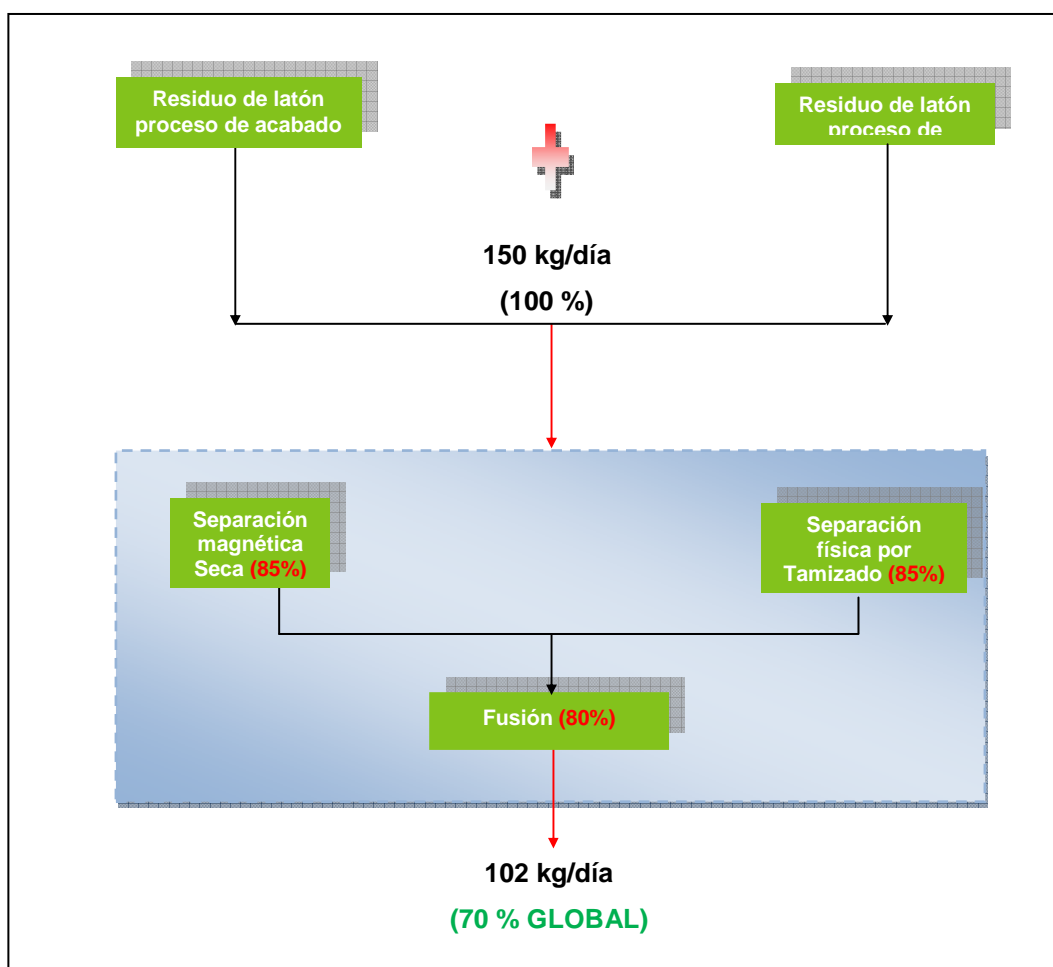


Figura 3.27. Balance global para el proceso de purificación de residuos de latón para su reciclaje

En la tabla 3.31, se presenta la recuperación global de latón a partir de la purificación de residuos del proceso de acabado y pulido de piezas. La recuperación total se obtiene, al dividir el total de latón obtenido después de los proceso de pretratamiento para el total de residuos de latón que ingresan para ser purificados.

Tabla 3.31. Recuperación global de latón obtenida del tratamiento de residuos de proceso de grifería

	Latón
Recuperación Global %	70,00

Como se muestra en la tabla 3.31, el proceso de purificación de residuos de latón tiene una eficiencia global del 70%, esto se debe a las operaciones de pretratamiento que se aplica en la recuperación de latón de residuos de la industria de la grifería.

La eficiencia de la separación magnética seca es del 85%, el material purificado en esta zona es inmediatamente sometido a fusión, el 15% restante es un material con altos contenidos de hierro (20%), que puede ser vendido como chatarra metálica a empresas que se dedican a la compra y reciclaje de este tipo de materiales como: FUNDIMET, RECICLAR, RIMESA o ARBAEL.

La separación física por tamizado, permite recuperar el 85% de material pretratado del residuo de pulido, que al igual que en el primer caso, es sometido a fusión. La diferencia, es decir, el 15%, es un residuo compuesto de fibra de paño que debe ser tratada como pasivo ambiental por medio de un gestor ambiental calificado.

Finalmente, la fusión de material pretratado presenta una eficiencia del 80%. Las pérdidas en esta operación, son producidas por el mismo proceso, esto se explica de la siguiente manera, el cloruro de potasio permite que funda todo el latón, pero provoca que la escoria se quede incrustada en el crisol, por lo que ocasiona que no se recupere el 100% del metal.

3.7.1.3. Síntesis de la tecnología para la purificación de residuos de latón para su reciclaje

Como se señaló anteriormente, en la planta propuesta se procesarán 100 kg/día de residuo de latón del proceso de acabado y 50 kg/día de residuo de latón del proceso de pulido en 2 líneas independientes.

En la tabla 3.32, se muestra un resumen de las etapas del proceso de purificación, así como los resultados de eficiencia que se obtuvieron al probar cada proceso experimentalmente a nivel laboratorio.

Tabla 3.32. Descripción del proceso para la purificación de residuos de latón

Etapas	Función	Resultados
Separación magnética seca	Disminuir contenido de hierro hasta valores < 4%	Eficiencia 85%
Separación física por tamizado	Eliminar impurezas con diámetro > 75 μm	Eficiencia 85%
Fusión	Obtener latón en lingotes libre de impurezas no metálicas y con contenido de hierro <1%	Eficiencia 80%

3.7.1.4. Capacidad de los equipos

- **Separador magnético**

El separador magnético es utilizado para disminuir el contenido hierro en el residuo de latón del proceso de acabado. Existen equipos de alta y baja intensidad, por lo tanto es importante definir este parámetro a través de la determinación del campo magnético inducido para el hierro, cobre y zinc, por medio de la metodología descrita en la sección 2.5. Los detalles de cálculos se muestran en el Anexo X.

En la tabla 3.33, se indica los resultados de los cálculos de esta variable.

Tabla 3.33. Resultado de cálculo de variables magnéticas

Nombre	Símbolo	Unidad	Valores	
Campo magnético aplicado	H	Gauss	Fe	570
			Cu	
			Zn	
Magnetización	M	Gauss	Fe	51,3
			Cu	-4,90E-05
			Zn	-8,95E-05
Intensidad de magnetización	J	Gauss	Fe	1,58E-04
			Cu	-1,51E-10
			Zn	-2,75E-10
Campo magnético inducido	B	Gauss	Fe	570
			Cu	570
			Zn	570

De acuerdo a la tabla 3.33, los campos magnéticos inducidos son de 570 [Gauss], para los tres casos, por lo tanto el equipo que se recomienda utilizar es un separador magnético de banda cruzada en seco. Con este parámetro se determinó el área que ocupa el material en la banda y la capacidad, de acuerdo a la sección 2.5 y las ecuaciones [2.5] y [2.6], para diferentes anchos de banda. Con estos datos se escogió el tamaño de banda que proporcione una capacidad similar a 12,5 [kg/h]. Los detalles de estos cálculos, se encuentran en el Anexo X. En la tabla 3.34, se detallan los resultados para los diferentes anchos de banda.

Tabla 3.34. Capacidad de transporte con diferentes anchos de banda

Ancho de banda [pulg]	Área [m ²]	Volumen [m ³]	Velocidad [m/s]	Peso específico [kg/m ³]	Capacidad de transporte [kg/h]
93,75E-03	9,45E-07	9,45E-07	1,05	2,78	9,93
18,75E-02	3,78E-06	3,78E-06			39,72
0,38	1,51E-05	1,51E-05			158,89
0,75	6,05E-05	6,05E-05			635,58
1,50	2,42E-04	2,42E-04			2542,35
3,00	9,68E-04	9,68E-04			10169,41
6,00	3,87E-03	3,87E-03			40677,65

Como se aprecia en la tabla 3.34, la capacidad de transporte similar a 12,5 [kg/h], se tiene con un ancho de banda de 0,19 [pulg], pero en el mercado la banda existente es de 3 [pulg], a una velocidad de 1,05 [m/s]. Se escogió esta velocidad, de acuerdo con el Anexo para materiales no abrasivos.

- **Tamiz**

Para conocer la capacidad de un tamiz vibratorio, se determinó el área de tamizado, de acuerdo con la sección 2.5 y la ecuación [2.7]. En el Anexo X, se detallan estos resultados. En la tabla 3.35, se presentan los resultados para la determinación de área de tamizado, para una alimentación 0,01 [t/h], tamizado en malla #200 para obtener un diámetro de partícula menor a 75 [μm] y un 15% de sobretamaño.

Tabla 3.35. Resultados de cálculo de área de tamizado

Alimentación [t/h]	Sobretamaño [t/h]	Pasante [t/h]	a	b	c	d	e	f	A [ft ²]
0,01	0,0015	0,0085	0,0072	0,277	1	0,72	1	1	5,89

Como se observa en la tabla 3.35, la capacidad obtenida para el tamiz de 5,89 [ft²], se escogió 6 [ft²] como alternativa.

- **Horno de fusión**

Para determinar el equipo para fusión, los parámetros definidos son la capacidad del horno y la temperatura de fusión.

Los equipos que se emplearán para el proceso de purificación de los residuos de latón, de acuerdo a lo expuesto en la sección 3.36 son los siguientes.

Tabla 3.36. Características de los equipos para la planta de purificación de residuos de latón

Equipo	Uso	Capacidad [kg/h]	Tamaño [m ³]	Marca
Separador magnético de correa es una máquina	Separa el material férrico por medio del campo magnético del resto de materiales.	6	1,24	Sepor
Tamiz vibratorio lineal	Separa un determinado material, clasificándolo en sus distintos tamaños.	6,5	0,55	BL- modelo SZF-120
Horno de crisol basculante	Funde y da tratamiento térmico a los metales	150	0,13	EMISON, SERIE TP, modelo TP-287

3.7.1.5. Implantación de equipos para el proceso de purificación de los residuos de latón para su reciclaje

Para el diseño de una planta de purificación de residuos de latón se consideran dos líneas distintas: la purificación de residuos de latón del proceso de acabado de piezas y la purificación de residuos de latón del proceso de pulido.

Las etapas del proceso son distintas, hasta antes de las operaciones de fusión, donde las líneas se unifican y el material se procesa como una sola muestra.

Los equipos empleados para el proceso de purificación se listaron en la tabla 3.33 y en la figura 3.28, se presenta un esquema de la implementación en planta de éstos equipos.

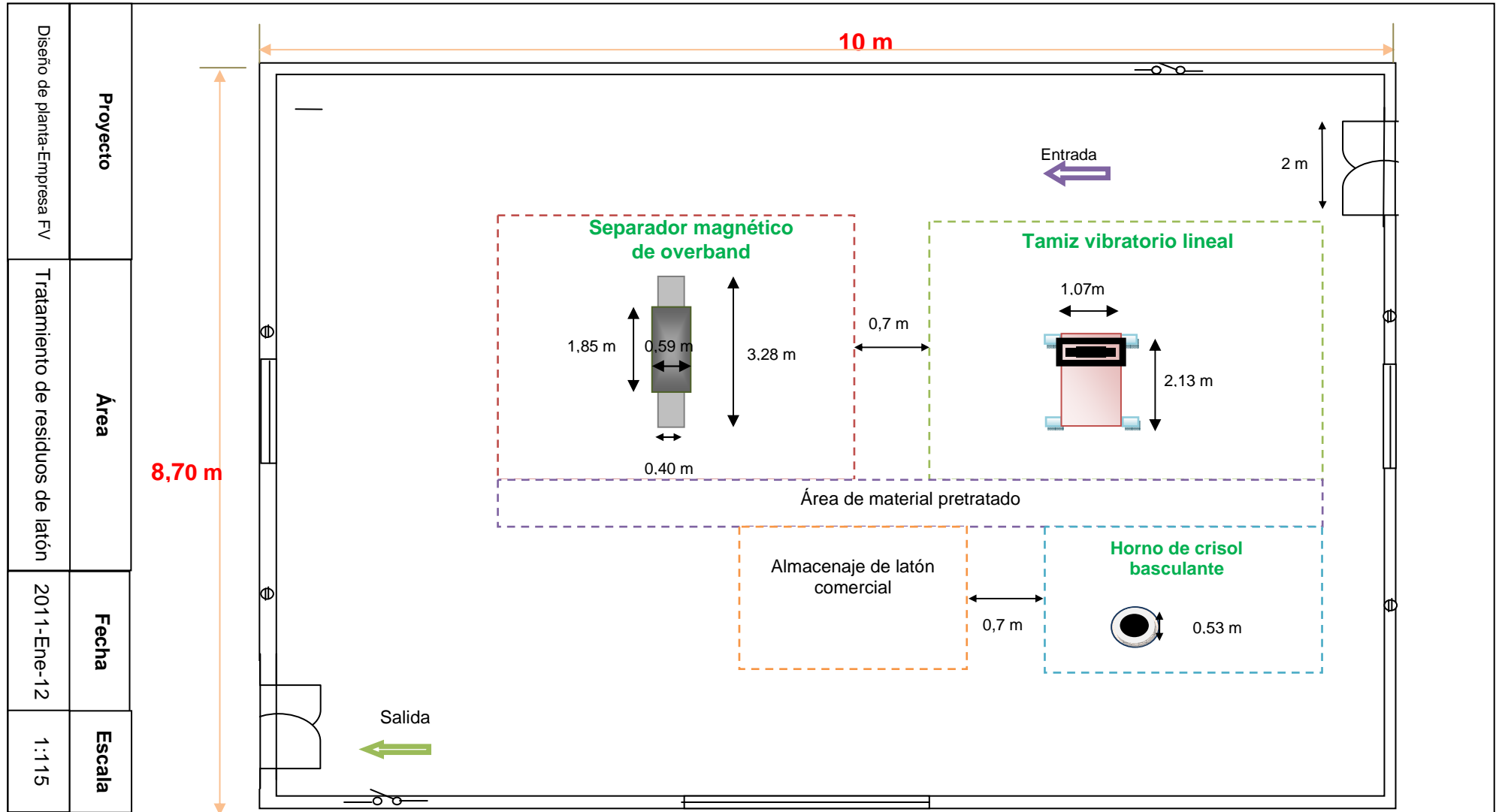


Figura 3.28. Vista superior de la planta de tratamiento de residuos de latón

Para la mejor disposición de los equipos en la planta de purificación de residuos de latón, se elabora un esquema con la vista superior de los mismos.

Para esta implementación se necesita un espacio físico de 87,86 m² con las siguientes características: una acceso de por lo menos 2 m, para el ingreso y salida de camiones o montacargas con el material, conexión a tierra y alimentación trifásica de 220 voltios, conexiones de agua y telefónica, 4 extintores tipo ABC.

3.7.2. ESTIMACIÓN DE COSTOS Y RESULTADOS

Una vez recompilada la información técnica, se hizo una estimación de la inversión y de los costos de operación de la planta.

La evaluación económica nos permitió conocer la factibilidad del proyecto y por lo tanto su construcción.

Para el análisis económico preliminar, se considera el procesamiento de 2 ton/mes de residuo de latón del proceso de acabado de piezas y 1 ton/mes de residuo de latón del proceso de pulido de piezas. Estos residuos no tienen costo ya que son desechadas y almacenadas en la planta.

3.7.2.1. Inicio del proyecto

- Compra del terreno e infraestructura

El proyecto empieza con la compra de un terreno donde se construirá la planta. La ubicación del terreno para construirla, será cerca de la planta de producción de piezas de grifería. La planta tiene dimensiones de unos 12 m por 40 m, por tanto se propone comprar un terreno de 500 m², que permite construir la infraestructura adecuada para la planta. En la tabla 3.37, se muestran los valores del terreno y de la infraestructura.

Tabla 3.37. Inversión estimada de la planta

Item	Costo (USD)
Terreno	23 000
Infraestructura	2 000
Inversión estimada	25 000

3.7.2.2. Costo de los equipos principales

El equipamiento de la planta considera separador magnético, tamizador vibrante, horno para fundición, moldes para la colada del latón fundido y otros equipos, así como varias instalaciones (eléctrica, de seguridad)

Los datos del costo de los equipos a utilizar y sus especificaciones técnicas, en la tabla 3.34. Los reactivos junto con su consumo y costo se muestran en la tabla 3.38.

Para la especificación de los equipos se ha considerado un turno de trabajo, en los cuales se halla dividido el procesamiento de materiales.

Tabla 3.38. Especificaciones técnicas y costos de los equipos a utilizar en una planta de tratamiento de residuos de latón

Equipo	Cantidad.	Especificaciones técnicas	Costo (USD)
Separador magnético	1	Separador magnético de correa tipo overband, imán permanente, velocidad de cinta adaptable, alta eficiencia, de 6 kg por hora	8 000
Tamiz vibratorio	1	Abertura 75 μ m	4 000
Horno	1	Horno basculante, eléctrico con crisol, con controlador automático de temperatura, capacidad 150 kg + crisol	18 570
Lingoteras	5	Lingoteras para colada de latón de 3x1,5x0,9m	1 000
Inversión total			31 570

3.7.2.3. Elementos de costos fijos

Los costos fijos de la planta representan los costos que no dependen directamente de la cantidad producida. Son costos invariables que se deben pagar cualquier sea el modo de funcionamiento y de operación.

- **Personal necesario**

El personal de planta sirve en todas las partes de control de producción, de los equipos y de calidad, los operarios se encargan de alimentar el residuo de latón al separador magnético y al tamiz vibratorio (equipos de pretratamiento), además de realizar la descarga del material fundido a las lingoteras.

También se requiere de un jefe de planta, un técnico mecánico para la gestión del mantenimiento de equipos, dos operarios de carga de residuos de latón a los equipos de pretratamiento y para descarga de material fundido del horno basculante.

La producción es de tipo batch, se debe trabajar 5 días a la semana, por 8 horas al día, durante el año por lo que debe funcionar una jornada. Se crea entonces 1 turno de 8 horas diarias.

- **Mantenimiento de planta**

Se debe efectuar un mantenimiento permanente y preventivo durante todo el año y también un mantenimiento global durante el mes de paro de la planta. En efecto, la producción se hace durante 240 días al año, lo que permite utilizar el tiempo remanente para las obras de inspección general y cambio de equipos previstos.

Se estima que el precio del mantenimiento de la planta es el 1% del precio de los equipos instalados.

- **Seguros y otros costos**

Son un costo obligatorio que corresponden al seguro de la planta y personal. Estos valores con décimo tercero, décimo cuarto, aporte patronal al IESS y afiliación médica.

El aporte patronal al IESS, corresponde al 12,5% de la inversión total de salarios del personal, el décimo tercero equivale al valor total de inversión dividido para 12, el décimo cuarto es la suma de dos salarios básicos dividido para 12 y la afiliación médica se refiere a un seguro privado donde el patrono cubre el 70% del valor del seguro.

El funcionamiento de una planta siempre genera una multitud de pequeños costos (administrativos) cuyo costo agregado es un gasto importante. Se encontraron cifras del 50% del gasto en personal, mantenimiento y seguros, corresponde a este parámetro. Para este proyecto, se propone utilizar el mismo porcentaje.

En la tabla 3.39, se indica los gastos fijos mensuales, para la planta de purificación de residuos de latón para su reciclaje.

Tabla 3.39. Gastos fijos de la planta

Parámetro	Valor [USD \$]
Sueldo del supervisor	600,00
2 Obreros	600,00
Décimo tercero	100,00
Décimo cuarto	60,00
IESS Aporte patronal	145,80
Afiliación médica	300,00
Funcionamiento de planta	800,00
Total	2 605,60

3.7.2.4. Elementos de costos variables

Los costos variables reagrupan todos los costos y consumos que se relacionan directamente con la cantidad de latón a producir. Obviamente, cuanto más grande la planta, mas grande el consumo de reactantes y otros compuestos.

- **Cloruro de potasio**

El cloruro de potasio (KCl), sin duda es el mayor costo variable de la planta y fija de manera muy sensible el costo final del latón. El cloruro de potasio, presenta un costo que disminuye con el volumen a comprar.

Se cotizaron precios para paquetes de pequeñas cantidades a la empresa Merck y representan seguramente un valor mucho más alto de lo que se pagaría en realidad, sin embargo, constituyen una buena base para evaluar el proyecto. Los consumos también se extraen del flujo másico calculado y se dan en valor neto. Este valor se indica en la tabla 3.40.

Tabla 3.40. Consumo y costo de los reactivos a utilizar en una planta de procesamiento de residuos de latón del proceso de acabado y del proceso de pulido de piezas

Reactivo	Consumo (kg/día)	Costo (USD/kg)	Valor (USD/día)	Valor (USD/mes)
KCl	38,25	8,00	306,00	6 120,00
Costo mensual de los reactivos				3 060,00

- **Consumo eléctrico**

La planta consta de muchos equipos eléctricos que consumen de manera constante electricidad. Estos son: separador magnético, tamiz vibrante, horno de crisol eléctrico. Se suma la potencia de cada equipo para obtener una estimación

de la potencia total instalada en la planta. Normalmente, se sobre diseñan los equipo con los diversos factores de seguridad

Obtenemos finalmente una potencia instalada de 20 kW. Para tomar en cuenta gastos adicionales, se propone agregar un 10% a este valor que permite acercarse a la potencia instalada en plantas clásicas. El precio del kWh 0,11 USD\$, dando un total de aproximadamente 400 USD \$ mensuales, y consumo de agua de 100 USD \$.

3.7.3. Ingresos del proyecto

Con una jornada de trabajo de 20 días al mes, se tiene un procesamiento diario de 100 kg/día de residuo de latón del proceso de acabado y 50 kg/día de residuo de latón del proceso de pulido. Con estos niveles de producción, se estiman en detalle los ingresos, que se presentan en la tabla 3.41.

Tabla 3.41. Ingresos mensuales por venta de los productos

Material	Producción (kg/día)	Producción (kg/mes)	Precio ¹ (USD/kg)	Ingreso mensual (USD)
Latón comercial	102	2040	5,90	12 036,00
Fracción magnética con contenidos de hierro del 18%	15	300	0,14	42,00
Total				12 078,00

A partir de los costos fijos y variables, tenemos el conjunto de los gastos hechos durante el año al hacer funcionar la planta.

En función de la capacidad a instalar, y de la vida útil de la misma, se estimó un horizonte de 5 años para la operación de la planta.

Para la actualización de los flujos y el cálculo de los indicadores de factibilidad económica de la planta, se utilizó una tasa de oportunidad de 10%, con base en una media de la tasa de interés nacional.

Con estas estimaciones se construyó un flujo de fondos para el cálculo de los indicadores económicos: Valor actual neto (VAN);

Tasa interna de retorno (TIR); y Relación beneficio costo (B/C). En la tabla 3.42, se presenta el análisis financiero para la implementación de una planta de purificación de residuos de latón.

Tabla 3.42. Análisis financiero de la implementación de una planta de tratamiento de residuos de latón de la industria de la grifería

FLUJOS	Valor	Valor/mes	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
	Ingresos							
Producción de latón [kg]		2040		24480	24480	24480	24480	24480
Producción de Fe [kg]		300		3600	3600	3600	3600	3600
Precio del kg de latón [\$USD]	5,9			70,8	70,8	70,8	70,8	70,8
Precio del kg de Fe [\$USD]	0,14			1,68	1,68	1,68	1,68	1,68
Ingreso por venta de latón [\$USD]				144432	144432	144432	144432	144432
Ingreso por venta de Fe [\$USD]				504	504	504	504	504
Ingresos totales [\$USD]				144936	144936	144936	144936	144936
COSTOS DE OPERACIÓN [\$USD]				110707,2	110707,2	110707,2	110707,2	110707,2
Reactivos [\$USD]		6120		73440	73440	73440	73440	73440
Personal [\$USD]		2605,6		31267,2	31267,2	31267,2	31267,2	31267,2
Servicios [\$USD]		500		6000	6000	6000	6000	6000
INVERSIÓN [\$USD]			56570	4714,17				
Equipos [\$USD]			31570	115421,4				
Infraestructura [\$USD]			25000					
Flujo neto [\$USD]			-56570	34228,8	34228,8	34228,8	34228,8	34228,8
Tasa de descuento	10							
VAN [\$USD]	71184,08							
B/C	1,26							
TIR [%]	74,18							

Los valores obtenidos de éstos indicadores se presentan en la tabla 3.43.

Tabla 3.43. Indicadores económicos obtenidos

Indicadores	Valores
VAN	71.184,08USD
B/C	1,26
TIR	74,18%

Los indicadores reflejan que la planta de procesamiento, en las condiciones planteadas produciría una rentabilidad atractiva del 74,18% que se encuentra sobre la tasa de oportunidad del capital, por lo tanto, es conveniente efectuar la inversión.

La inversa del TIR se define como la velocidad o rapidez en el tiempo de recuperación del capital o inversión, sin tomar en cuenta el valor del dinero en el tiempo. En este caso es de 1,3 años. Por lo tanto, la inversión se podría recuperar en 1 año y 4 meses aproximadamente.

Luego de la recuperación de los costos operacionales y de la inversión en la planta, a valores actuales mantendría una utilidad de USD 71.184,08 en los 5 años, ya que al 1 año 4 meses se recuperaría la inversión total.

Los beneficios calculados sobre la estimación del volumen de producción por cada uno de los metales a precios actuales del mercado, superarían a los costos de operación más la inversión requeridos, en un 26% como muestra el valor de 1,26 del indicador B/C.

El precio de venta del latón comercial de 5,90 USD/kg, permiten tener ingresos de venta de \$USD 724.180 durante los 5 años de vida útil de los equipos. Los precios mostrados pertenecen a valores referenciales y no están sustentados en un estudio de mercado. Se estima además una variación en el precio del latón comercial, donde se puede determinar que el valor mínimo al que puede ser comercializado el producto es de 5,14 USD/kg para que se hable de un proyecto

económicamente rentable, esto es posible gracias a que el valor del latón históricamente no a registrados valores menores a este precio.

Los cinco años de operación estimados para el cálculo de los indicadores corresponden a un escenario conservador, puesto que la infraestructura y los equipos mayores como el horno, podría tener una vida útil sobre los 10 años y con una pequeña reinversión se podría estimar la rentabilidad para el mismo tiempo, en ese caso arrojaría una TIR de alrededor del 58%, lo que significa que la variable más sensible en este modelo de producción es el volumen de producción y el aprovechamiento de la capacidad instalada.

Cabe tomar en cuenta, que el material residual de la separación magnética seca con altos contenidos de hierro, puede ser vendido como chatarra metálica a empresas como FUNDIMET, RECICLAR, RIMESA o ARBAEL, que se dedican a la compra y reciclaje de este tipo de materiales. Estas empresas están ubicadas en Ecuador.

Anualmente la producción de fibras de paño será de aproximadamente 1,8 toneladas. El tratamiento debe ser realizado por parte de un gestor ambiental calificado, lo cual, motivaría un gasto de 1 350 USD/año. Esto correspondería al 1,6% de las ganancias netas generadas por el proyecto.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

Es factible obtener latón con características comerciales (37% de Zn y 58% de Cu), a partir de residuos del proceso de acabado de piezas de grifería contaminados con hierro (11,4% de Fe) empleando procesos de separación magnética y fusión.

Para disminuir en 59% la cantidad de hierro presente en los residuos de latón del proceso de acabado de piezas, se debe emplear un proceso de separación magnética por vía seca, con un campo magnético aplicado de 570 [Gauss]. Este proceso de separación permite obtener residuos metálicos con contenidos de 35 % de Zn, 56 % de Cu y 4,74 % de Fe, recuperando el 85% del material inicial procesado.

Es factible obtener latón con características comerciales (37% de Zn y 58 % de Cu), a partir de residuos del proceso de pulido de piezas de grifería contaminados con fibras de paño (2%), empleando procesos de separación física por tamizado y fusión.

Las fracciones de fibra de paño que contaminan los residuos de latón del proceso de pulido, pueden ser removidas mediante un tamiz vibratorio con malla #200 (75 μ m), solamente en cinco minutos de operación.

Los residuos de latón de los procesos de acabado y pulido de piezas, ya pre-tratados por separación magnética y separación física, respectivamente, presentan concentraciones de cobre cercano al 58% y de zinc de 35%, sin embargo, al someter a los materiales directamente a procesos de fundición, a una temperatura de 1000 °C, no se recuperó latón, ya que el material se oxida por completo, pues no presenta un fundente adecuado que actúe como una barrera

protectora ante esta oxidación, con características comerciales, el producto obtenido presenta

La fusión de los residuos de latón a 1000 °C de temperatura, en horno de crisol a gas, durante 45 min, con adición de la carga fundente estándar (25% de Muestra, 25 de Bórax, 33% de Carbonato de sodio y 17% de Sílice), no se logra recuperar latón con las características deseadas. Se obtiene un material con altos contenidos de cobre (77%). El producto obtenido presenta 3,5% de Zn, 77,2% de Cu y 0,32% de Fe, esto se debe probablemente, a que el zinc tiene un punto de fusión de 400 °C y un punto de evaporación de 600 °C. Estas propiedades ocasionan el mayor problema, ya que al estar el resto de la mezcla a una mayor temperatura (cerca a los 1000 °C), ocasionando que el zinc se volatilice. El flujo de aire que se suministró al horno a gas, influyó de gran manera a la oxidación de este metal, ya que la velocidad de oxidación del zinc es mayor que la del cobre.

Para recuperar latón con características comerciales, a partir de los residuos de acabado y pulido de piezas es necesaria la adición de sales de cloro. Al analizar la influencia de las sales de cloro (KCl, NaCl, CaCl₂, ZnCl₂ y NH₄C) en la fundición de residuos de latón, se estableció que el cloruro de potasio permite obtener las recuperaciones más altas de latón (80%), respecto al resto de cloruros utilizados (<1%).

Para los residuos de latón provenientes de los procesos de pulido y acabado de piezas, es conveniente emplear carga de sal de 30% respecto a la muestra, para proteger al material y evitar la oxidación del latón, a la vez recuperar la mayor cantidad posible de latón comercial (%Cu, %Zn).

El cloruro de potasio, al fundirse, actúa como una barrera entre los materiales de latón y el oxígeno de la atmósfera, de modo que evitan la formación de óxidos en la superficie y mejoran la recuperación del latón por el proceso de fusión, en mufla eléctrica, a 1000°C de temperatura, durante.. 45 min.

La introducción de agitación mecánica con varilla metálica, en el proceso de fundición de los residuos de latón pretratado, permite obtener una aleación homogénea, con contenidos de cobre y zinc adecuados para este producto (Cu%, Zn%). Este hecho ocurre debido a que la agitación permite mejorar la transferencia de calor en el sistema y el contacto entre la sal fundente y los residuos, por lo tanto existe mayor protección contra la oxidación, consecuentemente, mayor cantidad de latón fundido.

Para obtener una recuperación global de latón del 70% y con concentraciones aproximadas de 60% cobre, 30% de zinc, 2% de plomo y <1% de hierro, a partir de residuos metálicos de grifería pretratados por medios físicos o magnéticos, se debe efectuar la fundición de material pretratado en una mufla eléctrica, a 1000 °C, por 45 min, con la adición de una capa de 30% de KCl (respecto a la materia prima) y agitación con varilla metálica.

La recuperación global del proceso de recuperación de latón comercial propuesto, es del 70%. Los principales parámetros definidos en este estudio, conjuntamente con los valores de recuperación de latón obtenidos en cada operación propuesta, se presentan en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Parámetros definidos para la purificación y recuperación de residuos de latón

Material	Pretratamiento	Recuperación [%]	Fusión 1000 °C, 45 min		Recuperación [%]
			KCl [%]	Agitación	
Residuo de latón, proceso de acabado de piezas	Separación magnética en seco, 570 [Gauss]	85	30	Si	80
Residuo de latón, proceso de pulido de piezas	Separación física por tamizad, malla #200 (Abertura 75 µm), por 5 min	85			

4.2. RECOMENDACIONES

La disposición de los residuos de latón generados en la industria de la grifería, deben ser en lugares cerrados donde se evite la contaminación con polvo y así obtener contenidos de óxido de silicio en la misma.

Completar el trabajo con estudios a mayor escala, puesto que la evaluación de los diferentes métodos de valorización fue realizada a escala de laboratorio.

Efectuar en forma complementaria un estudio de mercado para la venta de los productos con las determinadas especificaciones que se debe tomar y a la vez confirmar los precios de venta.

Elaborar un estudio de valorización para las escorias salinas que se producen durante la fundición de los desechos empleados en la presente investigación, con el fin de disminuir la generación de desechos sólidos y evitar impactos ambientales por su disposición.

BIBLIOGRAFÍA

1. Adex, 2009, “Boletín sectorial GAM”, <http://www.adexdatatrade.com/boletines/boletines%202009/qmot2009-07.pdf>, (Noviembre 2010).
2. Amaya, G. R., Valero, A. L., Aranda, A. G. y Scarpellini, S. I., 2006, “Disminución de costes energéticos en la empresa: tecnologías”, Editorial FC, Madrid, España, p.p. 124-125.
3. Arlandis, J. R., 1999, “La metalurgia del cobre”, http://www.aim.es/publicaciones/bol2/13_Metalurgia_Cobre.pdf, (Noviembre 2010)
4. Asamtech, 2009, “Estudio de impacto ambiental Expost y plan de manejo ambiental para las actividades industriales ejecutadas por FV área andina”, www.ambiente.gob.ec/userfiles/552/file/.../EIA%20EX%20POST%20FV.pdf, (Diciembre 2010).
5. Bermúdez, M. A., 2006, “Diseño, construcción y calibración de un sistema automatizado para la separación de minerales pesados”, Revista de la Facultad de ingeniería Universidad Central de Venezuela, 21(3), 35.
6. Brewis, T. A., 2000, “Magnetic Separation”, Mining Magazine, 8(2), 192.
7. Calvo, E., 2001, “Metales y aleaciones no férricas”, http://www.terra.es/personal/ecalvog/metales_no_ferricos.htm. (Noviembre, 2009)
8. Castells, X. E., 2000, “Reciclaje de residuos industriales: aplicación a la fabricación de materiales para la construcción”, 1ra. Edición, Editorial Díaz de Santos, Madrid, España, pp. 2-10, 107.

9. Castro, M. L. y Fornaro, O., 2009, "Microscopia óptica aplicada al estudio de aleaciones mecánicas",
http://www.ciasem2009.com.ar/upload_short/sa738106_userid-261.pdf,
(Diciembre, 2010)
10. Copper Development Association Inc, 1998, "Desing in brass",
<http://www.copperinfo.co.uk/alloys/brass/downloads/pub-133-design-in-brass.pdf>, (Noviembre 2010).
11. Copper Development Association Inc, 2005, "The brasses properties and applications",
<http://www.copperinfo.co.uk/alloys/brass/brassesproperties-and-applications.shtml>, (Noviembre 2010).
12. Chernicoff, C. J., 2001, "Interpretación geofísico-geológica del levantamiento aeromagnético de la región noroccidental de la provincia del Chubut", Revista de la Asoc Metallography Principales and practice iación Geológica Argentina, 56 (3), 268.
13. Cobba, N. M., 2008, "Tamizado", <http://nelsoncobba.blogspot.com/2008/04/tamizado.html>, (Julio 2010).
14. DeGarmo, E. P., Black, T. J. y Kohser, R. A., 1994, "Materiales y procesos de fabricación", 2da. Edición, Editorial Reverté, Barcelona, España, pp. 218-220.
15. Di Vita, G., 2004, "Renewable Resource and waste recycling", Enviromental Modeling and Assement, 9 (3), 159.
16. Escudero, M. E., 2006, "Medium and small caps en la bolsa española", 1ra. Edición, Editorial Gesbiblo, La Coruña, España, pp. 68-69

17. Fernández, J. J., 2007, "Manual de Mecánica", 1ra. Edición, Ediciones CEAC, Barcelona, España, pp. 16-20
18. Figueroa, F. C., 2003, "Escasez de metales en la tierra para su demanda mundial", <http://www.atinachile.cl/node/11324>, (Noviembre 2010).
19. Fink, D. G., Carroll J. M. y Wayne H. B., 1984 "Manual práctico de electricidad para ingenieros", 11va. Edición, Editorial Reverté, Barcelona, España, pp. 60, 79-81.
20. Gardner, G. J., 2003, "La situación del mundo 2003", 1ra. Edición, Editorial Icaria, Barcelona, España, pp. 211-212.
21. Gaspar, M. A., 1998, "Routledge spanish dictionary of enviromental technology", Editorial Routledge, New York, Estados Unidos, p.210.
22. Gerling, H. K., 1992, "Alrededor de las máquinas-herramienta", 3ra. edición, Editorial Reverté, Barcelona, España, pp.219-221.
23. González, A. M. y Bellver, C. M., 1999, "Campos electromagnéticos", 2da. Edición, Editorial Universidad de Sevilla, Madrid, España, pp. 421-432.
24. Groover, M. P., 1997, Fundamentos de manufactura moderna, 1ra. Edición, Editorial Prentice Hall Hispanoamérica, Naucalpan, México, pp. 724-726.
25. Guevara, J., 2003, "Tecnología Automotriz", <http://www.monografias.com/usuario/perfiles/cicuta350/monografias>, (Septiembre 2010).
26. Garrison, J. L., 1996, "Camino al reciclaje", <http://www.borderwastewise.org/espanol/news/news1.pdf>, (Septiembre 2010).

27. Houldcroft, P. T., 1999, "Tecnología de los procesos de soldadura", Editorial CEAC, Barcelona, España, p. 136.
28. Hufnagel, W. S., 1992, "Manuel del aluminio", 2da edición, Editorial Reverté, Barcelona, España, pp.719-720, 405-407.
29. Irasarri, L. F., 2006, "¿Reciclar hasta dónde?", <http://www.slideshare.net/roccoslides/sostenibilidad-reciclar-presentation>, (Octubre 2010).
30. Kalpaklian, S. y Schmid, S. R. 2002, "Manufactura, ingeniería y tecnología, 4ta. Edición, Edición Prentice Hall, Naucalpan de Juárez, México, p. 163, 292-294, 904.
31. Kelly, E. T. y Spottiswood, D. G., 1990, "Introducción al procesamiento de minerales", 1ra. edición, Editorial Limusa, México D.F., México, pp. 459-466.
32. Kempson, K. O., 2005, "Brass in focus", <http://www.copperinfo.co.uk/alloys/brass/downloads/pub-177-brass-in-focus.pdf>, (Noviembre 2010).
33. Kopeliovich D., 2009, "Fluxes for melting aluminum", SubsTech, http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=fluxes_for_melting_aluminum, (Noviembre 2010).
34. Lagos, V. G., 2009, "El cobre y el medio ambiente", http://www.procobre.com/archivos/pdf/salud_ambiente_tecnologia/Capitulo_03.pdf, (Noviembre 2010).
35. Lara, D. F., 2003, "Reloj es material", <http://www26.brinkster.com/antiquorelojes/07materia.htm>, (Noviembre 2010).
36. Luzón, J. M., 2003, "Curso sobre el Patrimonio Histórico ",5ta. Edición, Editorial Universidad de Cantabria, Cantabria, España, pp. 61-62.

37. Manero, J. M. y Gil, F. J., 2005, "Metalografía", 1ra. Edición, Editorial UPC, Barcelona, España, pp. 79-82
38. Metalgrup S.A., 2010, "Proceso productivo", <http://www.metalgrup.eu/ltb/es/page/customers>, (Diciembre 2010).
39. Molina, B., 2006, "Temas 24-26", <http://www.nebrija.es/~material/Diseno/Materiales/Temas%2024-26.pdf>, (Diciembre 2010).
40. Morral, F. R., Jimeno, E. A. y Molera, P.E., 2004, "Metalurgia general, Volumen 2", Editorial Reverté, Barcelona, España, pp. 1264-1269.
41. Mott, R. L., González, V. R. y Pozo, J. A., 2006, "Diseño de elementos de máquinas", 4ta. Edición, Editorial Pearson Educación, Guadalajara, México, p.60.
42. Nápoles, A. C., 2000, "Tecnología mecánica", Editorial UPC, Barcelona, España, pp. 122-123.
43. Navarro, R. C., 2007, "Máquinas eléctricas y sistemas de potencia", 6ta. Edición, Editorial Pearson Educación, Naucalpan de Juárez, México.pp. 237-238.
44. Nebel, B. J. y Wright, R. T., 1999, "Ciencias ambientales, Ecología y desarrollo, 6ta. Edición, Editorial Prentice Hall Hispanoamerican, México D. F., México, p. 159.
45. Nemerrow, N. L. y Dasgupta, A. J., 1998, "Tratamiento de vertidos industriales y peligrosos", 1ra. Edición, Editorial Díaz de Santos, S. A., Madrid, España, p. 267.

46. Nicolini, J., 1999, "Tablas y ábacos para la resolución de problemas", <http://materias.fi.uba.ar/7202/MaterialAlumnos/Tablas&Abacos.pdf>, (Octubre, 2010).
47. Orozco, A. F., 2005, "Bioingeniería de aguas residuales", Editorial Lerner, Mineapolis, Estados Unidos, p.383.
48. Pancorbo, F. J., 2009, "Griferías y contaminación del agua potable por plomo", <http://dspace.universia.net/bitstream/2024/275/1/Griferias+y+contaminacion+por+plomo.pdf>, (Diciembre 2010).
49. Pankratov, A. A., Pugacheva, N. B. y Frovolova, N. V., 2006; "Structural Phase transformation in $\alpha+\beta$ brasses, Russian Metallurgy, 2006 (3), 239.
50. Parera, A. M., 1991, "Conformación Metálica". Editorial Marcombo S. A., Barcelona, España, p.22.
51. Pardavé, W. A., 2006, "Reciclado industrial de metals", Editorial Ecoe, Bogotá, Colombia, pp.1-4, 33-75.
52. Pávez, B. N., 2005, "Concentración Magnética", http://www.ex-alumnos.uda.cl/metalurgia/402/concentracion.minerales.2/03.-_Concentracion.Magnetica.pdf, (Noviembre, 2010)
53. Pérez, L., Peralta, H. y Bianchi, R., 2003, "Estudio de las corrientes de Foucault a través del enfoque magnetoestático", http://www.fisicarecreativa.com/informes/infor_em/Eddy2k3a.pdf, (Noviembre, 2010).
54. Ponce, E., Cortés, R. y Valdés, C., 2003, "Desarrollo de un harnero vibratorio", Revista Facultad de ingeniería UTA (Chile), 11 (2), 35.
55. Porter, R. C., 2002, "The economics of waste", Editorial Resources for the Future, Virginia, Estados Unidos, pp. 20-23.

56. Ramos, P., 2005, "Gestión del medio ambiente, 1996-2005", 1ra. Edición Editorial Universidad de Salamanca, Salamanca, España, p. 34
57. Riba, R. C., 2008, "Selección de materiales en el diseño de máquinas", Editorial UPC, Barcelona, España, pp. 31-33.
58. Rodríguez, J.K., L. A. y Del Real, J. C., 2006, "Procesos industriales para materiales metálicos", 2da. Edición, Editorial Visión Net, Madrid, España, pp.155-160.
59. Rodríguez, J. M. y Montesinos, J. L., 1991, "Colada continua horizontal del cobre en horno de inducción con diseños seleccionados del enfriador y del molde", *Alambre*, 41 (5), 359.
60. Sanchis, A., 1999, "Fundamentos Físicos para Ingenieros"; Ediciones Universidad Politénica de Valencia, Valencia, España, pp. 572-595.
61. Schade, H. J., 1992, "Procedimientos de trabajo en óptica de taller", 5ta. Edición, Editorial Reverté, Bueno Aires, Argentina, pp. 64-66.
62. Seoáñez, C. M., 2000, "Residuos. Problemática, descripción, manejo, aprovechamiento y destrucción", Editorial Mundi Prensa, Madrid, España, pp. 105-111, 298.
63. Silva, K. L. y Rodríguez L. M., 2005, "Conformación en estado semisólido", http://www.tdr.cesca.es/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-0725105-155028/05Mtbp05de29.pdf, (Diciembre 2010)
64. Skauppy, F. B.,1997, "Cerámica de los metales", 6ta. Edición, Editorial Reverté, Barcelona, España, pp. 81-82.

65. Stephens, M. P. y Meyers, F. E., 2006, "Diseño de instalaciones de manufactura y manejo de materiales", 3ra. Edición, Editorial Prentice Hall, Virginia, Estados Unidos, pp- 345-376.
66. Tipler, P. A. y Mosca, G., 2005, "Física para la ciencia y la tecnología"; 5ta. Edición, Editorial Reverté, Barcelona, España, pp. 845-847.
67. Utigard, T. A., Friesen K., Roy, R. R., Lim, J., Dupuis C., 1998, "The Properties and Uses of Fluxes in Molten Aluminum Processing", JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society, <http://springerlink.com/content/07n6547371220w4n/fulltext.pdf>, (Noviembre 2010).
68. Vander, G. F., 1999, "Metallography Principales and practice", 1ra. Edición, Editorial McGraw Hill, New York, Estados Unidos, pp. 180-317.
69. Vásquez, A. J., 2001, "Ciencia en Ingeniería de la superficie de los materiales metálicos", 1ra. Edición. Editorial Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, España, pp. 561-572.
70. Veritas, B., 2008, "Manual para la formación en medio ambiente, 1ra. Edición, Editorial Lex Nova, Valladolid, España, p. 319.
71. Vin, C., 2000, "Brief Early History of Brass", http://www.copper.org/publications/newsletters/innovations/2000/01brasses/history_brass.html. (Septiembre 2010)
72. Walker, S. M. y King, A. F., 2007, "El Magnetismo", Editorial Lerner, Mineapolis, Estados Unidos, p. 23.
73. Xintao, L. K., Zhaoxiang, G. S. y Xiangwei, Z. L., 2007, "Continuous casting of copper tube billets rotating electromagnetic field", 3ra. Edición,

Editorial Materials Science and Engineering, Mineapolis, Estados Unidos, pp. 648-651.

ANEXOS

ANEXO I

CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LOS RESIDUOS INDUSTRIALES DE LATÓN

Ensayo N° 1. Análisis granulométrico del residuo de latón proveniente del proceso de acabado de piezas.

Como el residuo de latón del proceso de acabado de piezas es muy fino, atravesó la malla #400 en seco, se realizó un deslamado.

Deslamado

Peso inicial de la muestra [g] 250,00

Peso final de la muestra [g] 250,00

Tabla A.1. Tratamiento de datos para el ensayo granulométrico de residuos de latón proveniente del proceso de acabado de piezas.

Malla [#]	Abertura [um]	Peso Retenido [g]	Porcentaje Retenido [%]	Porcentaje Retenido Acumulado [%]	Porcentaje Pasado Acumulado [%]
+70	212	0,20	0,1	0,1	99,9
+80	180	0,50	0,2	0,3	99,7
+100	150	3,70	1,5	1,8	98,2
+150	106	32,20	12,9	14,6	85,4
+200	75	52,70	21,1	35,7	64,3
+270	53	55,60	22,2	58,0	42,0
+325	45	25,90	10,4	68,3	31,7
+400	38	10,60	4,2	72,6	27,4
-400	-	68,60	27,4	100,0	0,0
TOTAL		250,00	100		

Empleando los datos de la tabla A.1, se determina la curva granulométrica para el material. Esta curva se representa en la figura A.1.

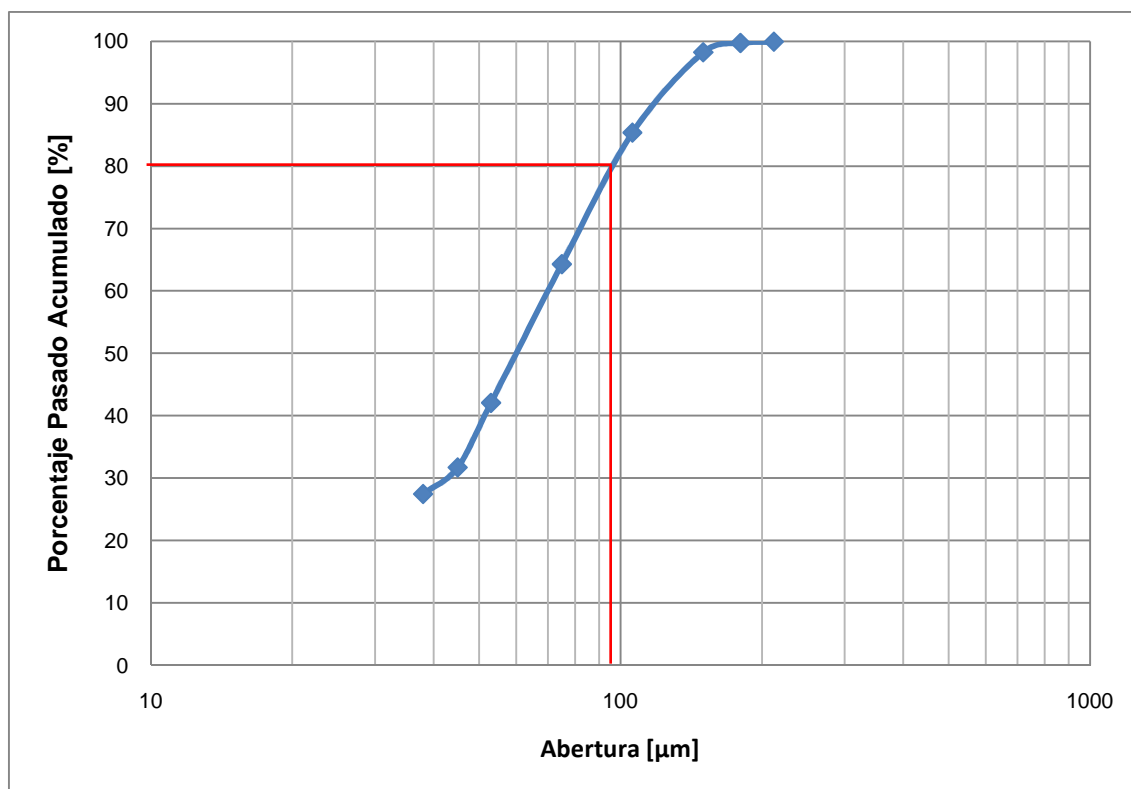


Figura A.1. Curva granulométrica para el residuo de latón del proceso de acabado de piezas

De esta forma, es posible determinar el valor para el d80, los mismos que se especifican en la tabla A.2.

Tabla A.2. Parámetros definidos en el ensayo granulométrico para el residuo de latón del proceso de acabado de piezas

Parámetro	Valor	Unidad
d80	95	[μm]

Ensayo N° 2. Análisis granulométrico del residuo de latón proveniente del proceso de pulido de piezas.

Deslamado

Peso inicial de la muestra [g] 250,00

Peso final de la muestra [g] 250,00

Tabla A.3. Tratamiento de datos para el ensayo granulométrico de residuo de latón proveniente del proceso de pulido de piezas

Malla [#]	Abertura [um]	Peso Retenido [g]	Porcentaje Retenido [%]	Porcentaje Retenido Acumulado [%]	Porcentaje Pasado Acumulado [%]
+40	425	0,40	0,2	0,2	99,8
+50	300	0,50	0,2	0,4	99,6
+60	250	0,20	0,1	0,4	99,6
+70	212	0,20	0,1	0,5	99,5
+80	180	0,30	0,1	0,6	99,4
+100	150	0,90	0,4	1,0	99,0
+200	75	13,60	5,4	6,4	93,6
+270	53	36,30	14,5	21,0	79,0
+325	45	32,60	13,0	34,0	66,0
+400	38	19,30	7,7	41,7	58,3
-400	-	145,74	58,3	100,0	0,0
TOTAL		250,04	100,0		

Empleando los datos de la tabla A.3, se determina a curva granulométrica para el material. Esta curva se representa en la figura A.2.

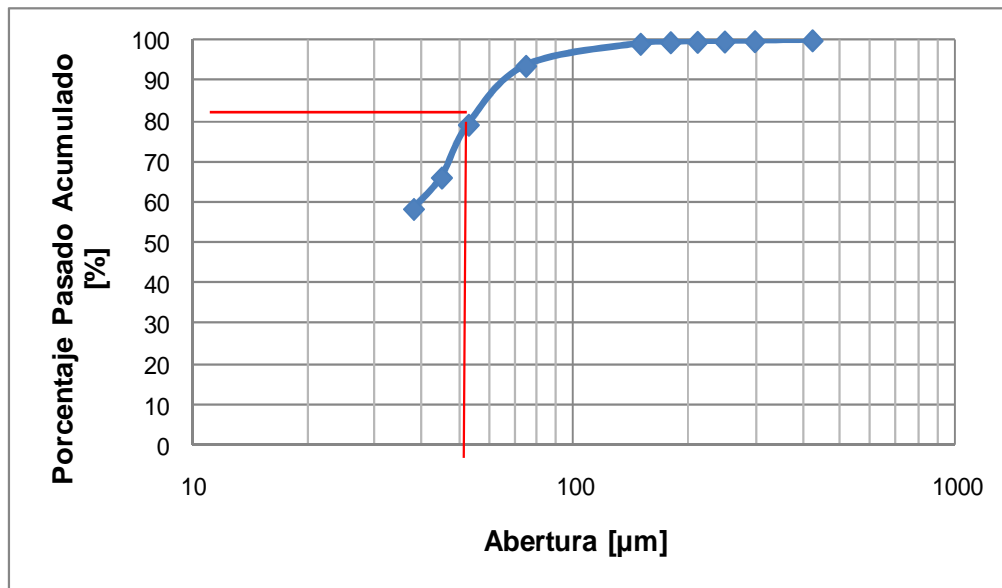


Figura A.2. Curva granulométrica para los residuos de latón del proceso de pulido de piezas

A través de la figura A.2, es posible determinar los valores para el d80, que se especifican en la tabla A.4.

Tabla A.4. Parámetros definidos en el ensayo granulométrico para el residuo de latón del proceso de pulido

Parámetro	Valor	Unidad
d80	54	[μm]

Ensayo N° 3. Determinación de la densidad aparente de los residuos de latón

Tabla A.5. Tratamiento de datos para el ensayo de determinación de densidad real de residuos de latón proveniente de los procesos de acabado y pulido de piezas.

	Unidades	Residuo de latón	
		Acabado de piezas	Pulido de piezas
Peso	[g]	197,7	86,8
Volumen	[cm ³]	71	37,5
Densidad real	[g/cm³]	2,78	2,31

Ensayo N° 4. Determinación de la densidad real de los residuos de latón

Tabla A.6. Tratamiento de datos para el ensayo de determinación de densidad real de residuos de latón proveniente de los procesos de acabado y pulido de piezas.

		Residuo de latón	
		Acabado de piezas	Pulido de piezas
Peso picnómetro	W _p	23,72	23,72
Peso picnómetro + muestra	W _{p+m}	24,68	24,70
Peso picnómetro + muestra + agua	W _{p+m+a}	49,07	49,03
Peso picnómetro + agua	W _{p+a}	48,46	48,45
Densidad real	[g/cm³]	2,80	2,42

La relación entre la densidad aparente y la densidad real de los materiales, permite calcular el porcentaje del espacio poroso (n), utilizando la siguiente fórmula:

$$n = \left(1 - \frac{\text{Densidad aparente}}{\text{Densidad real}}\right) \times 100 \text{ [adimensional]}$$

[A1]

El valor n permite interpretar la porosidad del material y su grado de compactación.

Por regla general, a menor porosidad (menor valor de n) el material es más compacto. Este valor n no permite interpretar por si solo las relaciones de infiltración o permeabilidad, a menos que se asocie con la clase textural correspondiente.

Los valores de densidad aparente que presenten los suelos son influenciados por:

- Contenido de materia orgánica.
- Material que le ha dado origen.
- Nivel de compactación (Núñez, 2000).

Ensayo N° 5. Determinación del pH para los residuos de latón de la industria de la grifería.

Tabla A.7. Tratamiento de datos para el ensayo de determinación del pH de los residuo del latón de los procesos de acabado y pulido de piezas

	Residuo de latón	
	Acabado de piezas	Pulido de piezas
pH	10,39	9,85

ANEXO II

DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS EN LOS DESECHOS INDUSTRIALES DE LATÓN

Ensayo N° 1. Determinación de la concentración de metales pesados en los residuos de latón provenientes del proceso de acabado de piezas.

Tabla A.8. Concentraciones de metales pesados en los residuos de latón del proceso de acabado de piezas

Muestra	Concentración [%]							
	Cu	Zn	Fe	Pb	Al	Si	Sn	Mn
1	46,83	35,61	13,53	1,40	0,30	0,31	0,70	0,03
2	47,92	38,76	9,30	1,60	0,30	0,23	1,32	0,03
3	48,73	35,56	12,01	1,50	0,30	0,10	0,81	0,03
Promedio	47,83	36,64	11,61	1,50	0,30	0,21	0,94	0,03

Ensayo N° 2. Determinación de la concentración de metales pesados en los residuos de latón provenientes del proceso de pulido de piezas.

Tabla A.9. Concentraciones de metales pesados en los residuos de latón del proceso de pulido de piezas

Muestra	Concentración [%]							
	Cu	Zn	Fe	Pb	Al	Si	Sn	Mn
1	53,12	34,91	0,96	1,40	0,50	0,31	0,71	0,001
2	54,89	33,46	0,67	1,30	0,50	0,23	0,32	0,001
3	53,51	35,56	1,79	1,50	0,50	0,40	0,54	0,001
Promedio	53,84	34,64	1,14	1,40	0,50	0,31	0,52	0,001

ANEXO III

CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL RESIDUO DE LATÓN DEL PROCESO DE ACABADO DE PIEZAS

Ensayo N° 1. Caracterización química del residuo de latón del proceso de acabado de piezas a través de microscopía electrónica de barrido, trabajando a 100 aumentos

El análisis de microscopía electrónica de barrido se realizó a 100 aumentos. En la figura A.3, se representa el mapeo elemental de la sección estudiada del residuo de latón del proceso de acabado de piezas, en la figura A.4, se representa el desglose del mapeo. Los metales de interés son el cobre y el zinc.



Figura A.3. Mapeo químico elemental del residuo de latón, proveniente del proceso de acabado (100 aumentos)

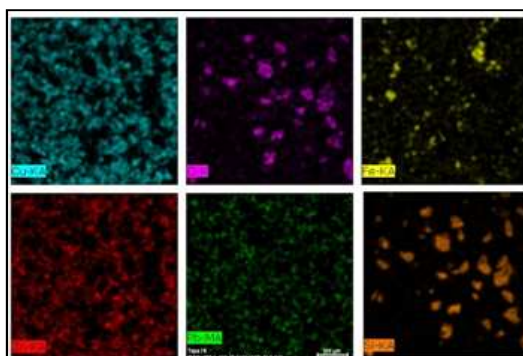


Figura A.4. Mapeo químico de cada metal del residuo de latón del proceso de acabado de piezas. (100 aumentos)

Una vez obtenido el mapeo de la muestra, se realiza un análisis químico elemental cualitativo. En la figura A.5, se ilustra el espectro con los picos característicos de cada elemento.

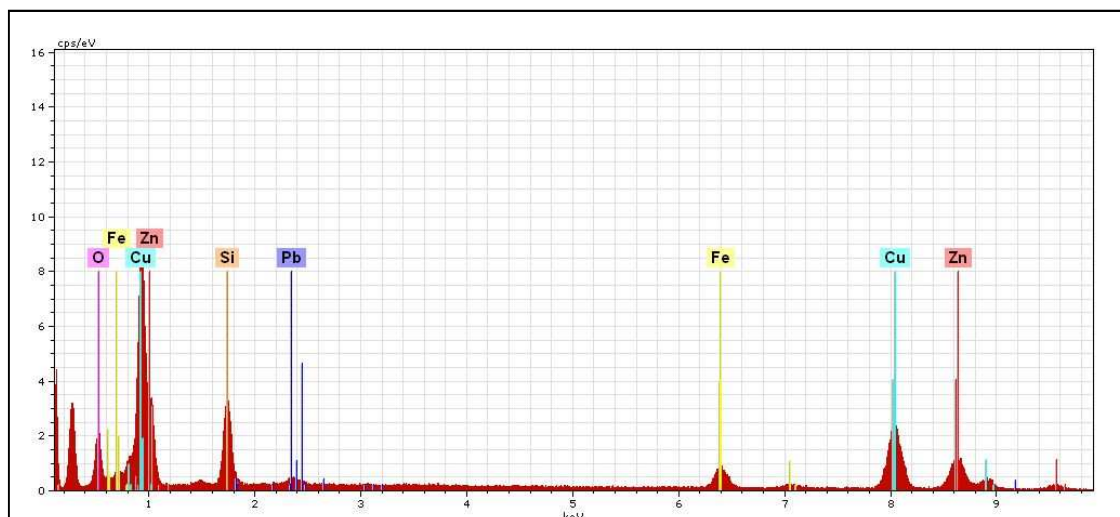


Figura A.5. Análisis cuantitativo del residuo de latón del proceso de acabado de piezas (100 aumentos)

La tabla A.10, resume las concentraciones de cada uno de los metales indicados en la figura A.5.

- **Tabla A.10. Resultados del análisis cuantitativo del residuo de latón del proceso de acabado de piezas**

Elemento	Concentración [%]
Cobre	46,12
Zinc	27,30
Hierro	6,92
Plomo	2,05
Oxígeno	9,38
Silicio	6,92

Ensayo N° 2. Caracterización química del residuo de latón del proceso de pulido de piezas a través de microscopía electrónica de barrido, trabajando a 100 aumentos

El análisis de microscopía electrónica de barrido se realizó a 100 aumentos. El mapeo elemental de la muestra, se ilustra en la figura A.6. En la figura A.7, se representa el desglose del mapeo. Los metales de interés son el cobre y el zinc.

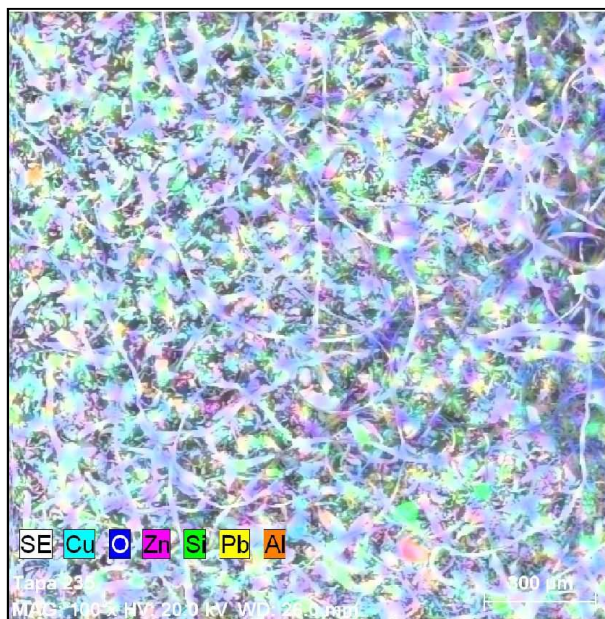


Figura A.6. Mapeo químico elemental del residuo de latón, proveniente del proceso de pulido de piezas (100 aumentos)

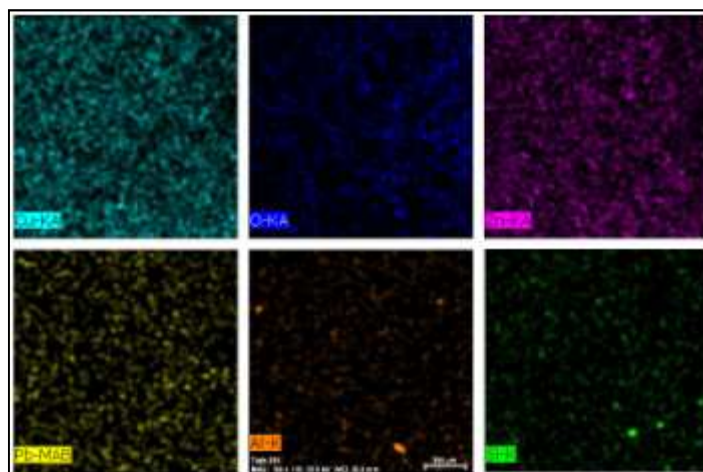


Figura A.7. Mapeo químico de cada metal del residuo de latón del proceso de pulido de piezas. (100 aumentos)

Adicionalmente al mapeo de la muestra, se efectúa un análisis químico elemental cualitativo. En la figura A.8, se ilustra el espectro con los picos característicos de cada elemento.

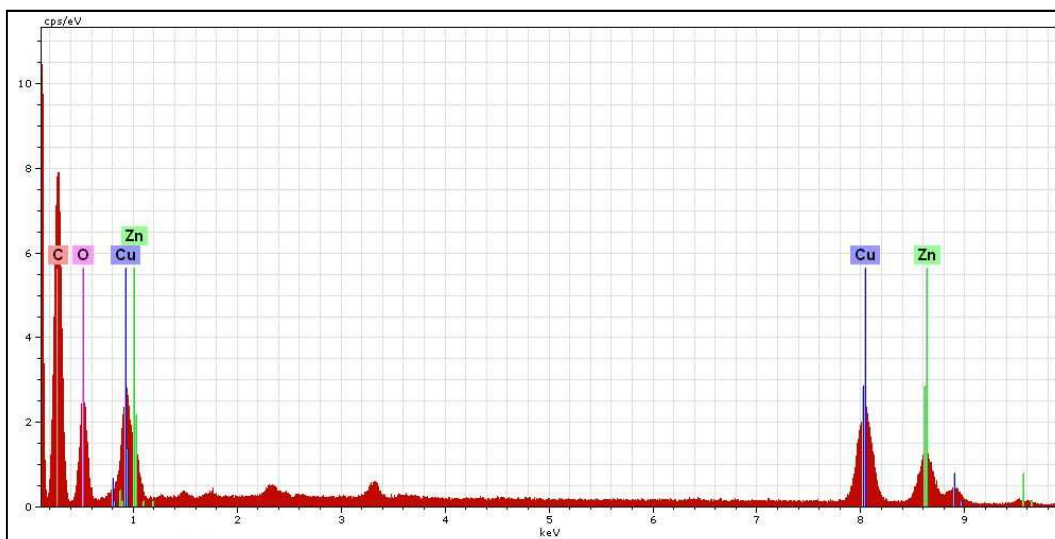


Figura A.8. Análisis cuantitativo del residuo de latón del proceso de pulido de piezas (100 aumentos)

Las concentraciones de los metales indicados en la figura A.8, se detallan en la tabla A.11.

- **Tabla A.11. Resultados del análisis cuantitativo del residuo de latón del proceso de pulido de piezas**

Elemento	Concentración [%]
Cobre	46,12
Zinc	27,30
Hierro	6,92
Plomo	2,05
Oxígeno	9,38
Silicio	6,92

ANEXO IV

DETERMINACIÓN DE CAMPO MAGNÉTICO APLICADO (CMA) EN GAUSS, EN LA SEPARACIÓN MAGNÉTICA EN SECO

En la figura A.9, se presenta la relación entre el Campo magnético aplicado en Gauss y el Campo magnético aplicado en porcentaje.

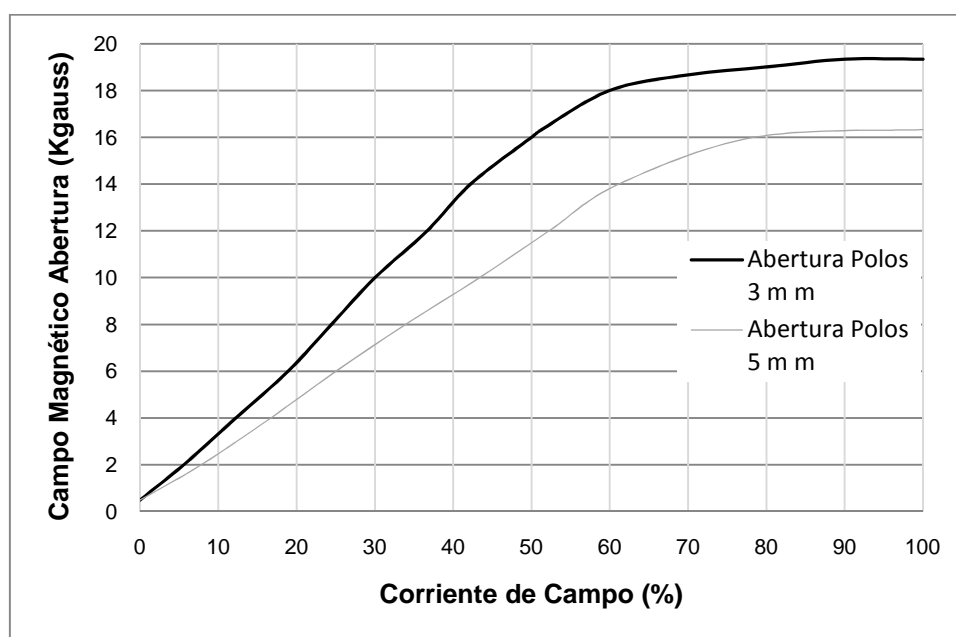


Figura A.9. Flujo magnético, en la Abertura de separación [%] como función de la corriente del campo magnético [K Gauss]
(CARPO DIVISION, 1999)

Mediante la linealización de la curva correspondiente a 3 [mm] de abertura entre polos, en la figura A.9. Se considera tres regresiones lineales, debido a que se trabaja en un rango de 0-5000 Gauss. Las relaciones entre el Campo magnético aplicado (CMA) en porcentaje y CMA en Gauss, se presentan en la tabla A.12.

Tabla A.12. Relación entre el Campo Magnético Aplicado [%] vs [KGauss]

Campo magnético aplicado [%]	Campo magnético aplicado [Gauss]
0	435
0,1	462
0,3	516
0,5	570
0,7	624
2	975

ANEXO V

ENSAYOS DE SEPARACIÓN MAGNÉTICA EN SECO

FICHA TÉCNICA N°1.

Ensayo N°: 1.

Tipo de ensayo: Determinación de la recuperación de latón

Tipo de muestra: Residuo de latón

Tipo de proceso proveniente: Acabado de piezas

Objetivo: Determinar la recuperación de latón en el proceso de separación magnética en seco.

Condiciones de operación:

Tabla A.13. Condiciones de operación para el ensayo de recuperación de latón por separación magnética seca

Características	Magnitud	Unidad
Velocidad de giro del tambor	4	[rpm]
Vibración de tolva	22	[%]
Abertura de separación de polos	3	[mm]
Tamaño de partícula alimentado	100	[μ m]
Campo magnético aplicado (CMA)	570	[Gauss]

Resultados:

Tabla A.14. Resultados para el ensayo de recuperación de latón por separación magnética seca

# Ensayo	Fracción operada	CMA [%]	CMA [Gauss]	Peso [g]	No. muestra	Material no magnético	
						Ret Ac. [g]	Recuperación [%]
1	Magnética	0,5	570	41,55	3	310,05	88,18
	No Magnética			310,05	2		
	Alimentación			351,60	1		

Ejemplo de cálculo

El cálculo de la Recuperación de material en separación magnética, se lo efectuó de manera similar al análisis granulométrico. En lugar de retenerse partículas por un tamiz, se lo hace debido a un campo magnético aplicado (CMA).

Del ensayo: 1

CMA: 570 Gauss

Porcentaje del peso retenido

$$\%Wr = \frac{Wr}{Ar} * 100$$

[A.1.]

$$\%Wr = \frac{310,05}{351,60} * 100$$

$$\%Wr = 88,18\%$$

Donde:

%Wr = Porcentaje del peso retenido (%).

Wr = Peso retenido (g)

Ar = Alimentación recalculada (g)

Porcentaje del peso retenido acumulado

$$\%Wra = \%Wr_{CMA \text{ anterior}} + \%Wr_{CMA \text{ actual}} \quad [A.2.]$$

$$\%Wra = 88,18\%$$

Donde: %Wra = Porcentaje del peso retenido acumulado (%).

FICHA TÉCNICA N°2.**Ensayo N°:** 2.**Tipo de ensayo:** Determinación de la recuperación de latón**Tipo de muestra:** Residuo de latón**Tipo de proceso proveniente:** Acabado de piezas**Objetivo:** Determinar la recuperación de latón en el proceso de separación magnética en seco.**Condiciones de operación:****Tabla A.15.** Condiciones de operación para el ensayo de recuperación de latón por separación magnética seca

Características	Magnitud	Unidad
Velocidad de giro del tambor	4	[rpm]
Vibración de tolva	22	[%]
Abertura de separación de polos	3	[mm]
Tamaño de partícula alimentado	100	[μ m]
Campo magnético aplicado (CMA)	516	[Gauss]

Resultados:**Tabla A.16.** Resultados para el ensayo de recuperación de latón por separación magnética seca

# Ensayo	Fracción operada	CMA [%]	CMA [Gauss]	Peso [g]	No. muestra	Material no magnético	
						Ret Ac. [g]	Recuperación [%]
2	Magnética	0,3	516	66,18	3	285,52	81,18
	No Magnética			285,52	2		
	Alimentación			351,7	1		

FICHA TÉCNICA N°3.

Ensayo N°:	3.
Tipo de ensayo:	Determinación de la recuperación de latón
Tipo de muestra:	Residuo de latón
Tipo de proceso proveniente:	Acabado de piezas
Objetivo:	Determinar la recuperación de latón en el proceso de separación magnética en seco.

Condiciones de operación:**Tabla A.17.** Condiciones de operación para el ensayo de recuperación de latón por separación magnética seca

Características	Magnitud	Unidad
Velocidad de giro del tambor	4	[rpm]
Vibración de tolva	22	[%]
Abertura de separación de polos	3	[mm]
Tamaño de partícula alimentado	100	[μ m]
Campo magnético aplicado (CMA)	462	[Gauss]

Resultados:**Tabla A.18.** Resultados para el ensayo de recuperación de latón por separación magnética seca

# Ensayo	Fracción operada	CMA [%]	CMA [Gauss]	Peso [g]	No. muestra	Material no magnético	
						Ret Ac. [g]	Recuperación [%]
3	Magnética	0,1	462	68,66	3	283,74	80,52
	No Magnética			283,74	2		
	Alimentación			352,4	1		

FICHA TÉCNICA N°4.

Ensayo N°:	4.
Tipo de ensayo:	Determinación de la recuperación de latón
Tipo de muestra:	Residuo de latón
Tipo de proceso proveniente:	Acabado de piezas
Objetivo:	Determinar la recuperación de latón en el proceso de separación magnética en seco.

Condiciones de operación:**Tabla A.19.** Condiciones de operación para el ensayo de recuperación de latón por separación magnética seca

Características	Magnitud	Unidad
Velocidad de giro del tambor	4	[rpm]
Vibración de tolva	22	[%]
Abertura de separación de polos	3	[mm]
Tamaño de partícula alimentado	100	[μ m]
Campo magnético aplicado (CMA)	570-516-462	[Gauss]

Resultados:**Tabla A.20.** Resultados para el ensayo de recuperación de latón por separación magnética seca

# Prueba	Fracción operada	CMA [%]	CMA [Gauss]	Peso [g]	No. muestra	Material no magnético	
						Ret Ac. [g]	Recuperación [%]
1	Magnética	0,5	570	497,28	3	303,02	37,46
	No Magnética			303,02	2		
	Alimentación			800,3	1		
2	Magnética	0,3	516	207,96	5	592,34	74,01
	No Magnética			289,32	4		
	Alimentación			497,28	3		
3	Magnética	0,27	462	25	7	687,74	85,44
	No Magnética			95,4	6		
	Alimentación			207,96	5		

FICHA TÉCNICA N°7.**Ensayo N°:** 1.**Tipo de ensayo:** Determinación de la concentración de metales**Tipo de muestra:** Residuo de latón**Tipo de proceso proveniente:** Acabado de piezas**Objetivo:** Determinar la concentración de los minerales de las fracciones magnética y no magnética en el proceso de separación magnética en seco.**Condiciones de operación:****Tabla A.21.** Condiciones de operación para el ensayo de recuperación de latón por separación magnética seca

Características	Magnitud	Unidad
Velocidad de giro del tambor	4	[rpm]
Vibración de tolva	22	[%]
Abertura de separación de polos	3	[mm]
Tamaño de partícula alimentado	100	[μ m]
Campo magnético aplicado (CMA)	570	[Gauss]

Resultados:**Tabla A.22.** Concentración de metales en la fracción magnética y no magnética en la separación magnética seca (570 Gauss)

Fracción	Muestra	Concentración [%]							
		Cu	Fe	Zn	Al	Mn	Si	Pb	Sn
No magnética	1	54,47	6,05	36,43	0,78	0,04	0,61	3,69	0,43
	2	58,23	4,48	34,11	0,45	0,04	0,68	2,51	0,21
	3	55,31	3,68	34,47	0,51	0,04	0,62	2,73	0,18
Promedio		56,00	4,74	35,00	0,58	0,04	0,64	2,98	0,27
Magnética	1	38,01	21,97	29,62	0,61	0,10	0,38	1,92	0,56
	2	40,64	16,27	27,74	0,35	0,10	0,43	1,31	0,27
	3	38,60	13,36	28,03	0,40	0,10	0,39	1,42	0,23
Promedio		39,08	17,20	28,46	0,45	0,10	0,40	1,55	0,35

FICHA TÉCNICA N°8.**Ensayo N°:** 2.**Tipo de ensayo:** Determinación de la concentración de metales**Tipo de muestra:** Residuo de latón**Tipo de proceso proveniente:** Acabado de piezas**Objetivo:** Determinar la concentración de los minerales de las fracciones magnética y no magnética en el proceso de separación magnética en seco.**Condiciones de operación:****Tabla A. 23.** Condiciones de operación para el ensayo de recuperación de latón por separación magnética seca

Características	Magnitud	Unidad
Velocidad de giro del tambor	4	[rpm]
Vibración de tolva	22	[%]
Abertura de separación de polos	3	[mm]
Tamaño de partícula alimentado	100	[μm]
Campo magnético aplicado (CMA)	516	[Gauss]

Resultados:**Tabla A.24.** Concentración de metales en la fracción magnética y no magnética de la separación magnética seca (516 Gauss)

Fracción	Muestra	Concentración [%]							
		Cu	Fe	Zn	Al	Mn	Si	Pb	Sn
No magnética	1	49,57	4,99	36,32	0,54	0,05	0,67	3,97	0,23
	2	51,03	5,89	34,41	0,6	0,07	0,75	3,25	0,38
	3	50,01	6,83	34,41	0,46	0,05	0,7	3,02	0,35
Promedio		50,20	5,90	35,05	0,53	0,06	0,71	3,41	0,32
Magnética	1	34,59	18,12	29,53	0,42	0,13	0,42	2,06	0,30
	2	35,61	21,39	27,98	0,47	0,18	0,47	1,69	0,49
	3	34,90	24,80	27,98	0,36	0,13	0,44	1,57	0,45
Promedio		35,03	21,43	28,50	0,41	0,14	0,44	1,78	0,41

FICHA TÉCNICA N°9.**Ensayo N°:** 3.**Tipo de ensayo:** Determinación de la concentración de metales**Tipo de muestra:** Residuo de latón**Tipo de proceso proveniente:** Acabado de piezas**Objetivo:** Determinar la concentración de los minerales de las fracciones magnética y no magnética en el proceso de separación magnética en seco.**Condiciones de operación:****Tabla A.25.** Condiciones de operación para el ensayo de recuperación de latón por separación magnética seca

Características	Magnitud	Unidad
Velocidad de giro del tambor	4	[rpm]
Vibración de tolva	22	[%]
Abertura de separación de polos	3	[mm]
Tamaño de partícula alimentado	100	[μm]
Campo magnético aplicado (CMA)	462	[Gauss]

Resultados:**Tabla A.26.** Concentración de metales en la fracción magnética y no magnética de la separación magnética seca (462 Gauss)

Fracción	Muestra	Concentración [%]							
		Cu	Fe	Zn	Al	Mn	Si	Pb	Sn
No magnética	1	50,08	7,73	36,89	0,72	0,09	0,68	3,3	0,46
	2	49,81	6,37	36,1	0,61	0,09	0,75	2,01	0,36
	3	49,64	6,45	35,77	0,57	0,09	0,73	4,47	0,38
Promedio		49,84	6,85	36,25	0,63	0,09	0,72	3,26	0,40
Magnética	1	34,95	28,07	30,00	0,56	0,23	0,43	1,72	0,60
	2	34,76	23,13	29,35	0,47	0,23	0,47	1,05	0,47
	3	34,64	23,42	29,09	0,44	0,23	0,46	2,33	0,49
Promedio		34,78	24,87	29,48	0,49	0,23	0,45	1,70	0,52

FICHA TÉCNICA N°10.**Ensayo N°:** 4.**Tipo de ensayo:** Determinación de la concentración de metales**Tipo de muestra:** Residuo de latón**Tipo de proceso proveniente:** Acabado de piezas**Objetivo:** Determinar la concentración de los minerales de las fracciones magnética y no magnética en el proceso de separación magnética en seco.**Condiciones de operación:****Tabla A.27.** Condiciones de operación para el ensayo de recuperación de latón por separación magnética seca

Características	Magnitud	Unidad
Velocidad de giro del tambor	4	[rpm]
Vibración de tolva	22	[%]
Abertura de separación de polos	3	[mm]
Tamaño de partícula alimentado	100	[μ m]
Campo magnético aplicado (CMA)	570-516-462	[Gauss]

Resultados:**Tabla A.28.** Concentración de metales en la fracción magnética y no magnética de la separación magnética seca (570, 516 y 462 Gauss)

Fracción	Muestra	Concentración [%]							
		Cu	Fe	Zn	Al	Mn	Si	Pb	Sn
No magnética	1	53,58	1,56	38,39	0,64	0,04	0,64	3,47	0,2
	2	52,04	2,88	37,09	0,51	0,03	0,65	2,51	0,33
	3	52,09	1,86	39,37	0,59	0,05	0,63	2,97	0,28
Promedio		52,57	2,10	38,28	0,58	0,04	0,64	2,98	0,27
Magnética	1	37,39	20,21	28,54	0,50	0,10	0,40	1,80	0,26
	2	36,32	37,32	27,58	0,40	0,08	0,41	1,31	0,43
	3	36,35	24,10	29,27	0,46	0,13	0,39	1,54	0,36
Promedio		36,69	27,21	28,46	0,45	0,10	0,40	1,55	0,35

ANEXO VI

ENSAYOS DE SEPARACIÓN MAGNÉTICA HÚMEDA

FICHA TÉCNICA N°1.

- Ensayo N°:** 1.
- Tipo de ensayo:** Determinación de la recuperación de latón
- Tipo de muestra:** Residuo de latón
- Tipo de proceso proveniente:** Acabado de piezas
- Objetivo:** Determinar la recuperación de la fracción no magnética (latón) en el proceso de separación magnética en húmedo.

Condiciones de operación:

Tabla A.29. Condiciones de operación para el ensayo de recuperación de latón por separación magnética húmeda

Características	Magnitud	Unidad
Temperatura de secado	45	°C
Tiempo de secado	24	[h]

Resultados:

Tabla A.30. Resultados para el ensayo de recuperación de latón por separación magnética húmeda

N° pasos	Fracciones [g]		Total [g]	Recuperación [%]
	No Magnética	Magnética		
1	2593,30	306,70	2900,00	89,42
2	3977,90	527,00	4504,90	88,30
3	2838,70	437,20	3275,90	86,65

FICHA TÉCNICA N°2.**Ensayo N°:** 1.**Tipo de ensayo:** Determinación de la concentración de metales**Tipo de muestra:** Residuo de latón**Tipo de proceso proveniente:** Acabado de piezas**Objetivo:** Determinar la concentración de los minerales de las fracciones magnética y no magnética en el proceso de separación magnética en húmedo.**Condiciones de operación:****Tabla A.31.** Condiciones de operación para el ensayo de recuperación de latón por separación magnética húmeda

Características	Magnitud	Unidad
Cantidad de sólidos en pulpa	20	[%]
Tamaño de partícula alimentado	100	[μm]
# pasos	1	--

Resultados:**Tabla A.32.** Concentración de metales en la fracción magnética y no magnética de la separación magnética húmeda (1ra. Pasada)

Fracción	Muestra	Concentración [%]							
		Cu	Fe	Zn	Al	Mn	Si	Pb	Sn
No magnética	1	59,58	3,53	34,22	0,34	0,22	0,46	2,37	0,35
	2	57,43	2,61	34,76	0,21	0,19	0,48	2,53	0,33
	3	56,09	3,55	34,47	0,39	0,25	0,44	2,67	0,28
Promedio		57,70	3,23	34,48	0,31	0,22	0,46	2,52	0,32
Magnética	1	45,17	37,31	25,94	0,43	0,01	1,84	3,45	0,36
	2	43,54	27,58	26,35	0,26	0,01	1,92	3,68	0,34
	3	42,52	37,52	26,13	0,49	0,01	1,76	3,88	0,29
Promedio		43,74	34,14	26,14	0,39	0,01	1,84	3,67	0,33

FICHA TÉCNICA N°3.**Ensayo N°:** 2.**Tipo de ensayo:** Determinación de la concentración de metales**Tipo de muestra:** Residuo de latón**Tipo de proceso proveniente:** Acabado de piezas**Objetivo:** Determinar la concentración de los minerales de las fracciones magnética y no magnética en el proceso de separación magnética en húmedo.**Condiciones de operación:****Tabla A.33.** Condiciones de operación para el ensayo de recuperación de latón por separación magnética húmeda

Características	Magnitud	Unidad
Cantidad de sólidos en pulpa	20	[%]
Tamaño de partícula alimentado	100	[μm]
# pasos	2	--

Resultados:**Tabla A.34.** Concentración de metales en la fracción magnética y no magnética de la separación magnética húmeda (2da. Pasada)

Fracción	Muestra	Concentración [%]							
		Cu	Fe	Zn	Al	Mn	Si	Pb	Sn
No Magnética	1	62,38	2,33	30,52	0,33	0,17	0,56	2,37	0,35
	2	60,57	3,09	30,66	0,25	0,19	0,57	3,16	0,33
	3	57,96	1,57	30,75	0,29	0,21	0,46	2,69	0,38
Promedio		60,30	2,33	30,64	0,29	0,19	0,53	2,74	0,35
Magnética	1	47,29	24,62	23,14	0,41	0,01	2,24	3,45	0,36
	2	45,92	32,66	23,24	0,31	0,01	2,28	4,60	0,34
	3	43,94	16,59	23,31	0,36	0,01	1,84	3,91	0,39
Promedio		45,72	24,62	23,23	0,36	0,01	2,12	3,99	0,36

FICHA TÉCNICA N°4.**Ensayo N°:** 3.**Tipo de ensayo:** Determinación de la concentración de metales**Tipo de muestra:** Residuo de latón**Tipo de proceso proveniente:** Acabado de piezas**Objetivo:** Determinar la concentración de los minerales de las fracciones magnética y no magnética en el proceso de separación magnética en húmedo.**Condiciones de operación:****Tabla A.35.** Condiciones de operación para el ensayo de recuperación de latón por separación magnética húmeda

Características	Magnitud	Unidad
Cantidad de sólidos en pulpa	20	[%]
Tamaño de partícula alimentado	100	[μm]
# pasos	3	--

Resultados:**Tabla A.36.** Concentración de metales en la fracción magnética y no magnética de la separación magnética húmeda (3ra. Pasada)

Fracción	Muestra	Concentración [%]							
		Cu	Fe	Zn	Al	Mn	Si	Pb	Sn
No Magnética	1	62,38	1,78	28,52	0,21	0,15	0,66	2,39	0,45
	2	61,29	1,09	30,63	0,25	0,19	0,69	3,16	0,33
	3	64,73	1,57	30,71	0,14	0,21	0,57	3,48	0,38
Promedio		62,80	1,48	29,95	0,20	0,18	0,64	3,01	0,39
Magnética	1	47,29	18,81	21,62	0,26	0,01	2,64	3,48	0,46
	2	46,47	11,52	23,22	0,31	0,01	2,76	4,60	0,34
	3	49,07	16,59	23,28	0,18	0,01	2,28	5,06	0,39
Promedio		47,61	15,64	22,71	0,25	0,01	2,56	4,38	0,40

ANEXO VII

ENSAYO DE SEPARACIÓN FÍSICA POR TAMIZADO

FICHA TÉCNICA N°1.

Ensayo N°: 1.

Tipo de ensayo: Caracterización de las fracciones obtenidas por tamizado

Tipo de muestra: Residuo de latón

Tipo de proceso proveniente: Pulido de piezas

Objetivo: Caracterizar las fracciones obtenidas por tamizado mediante microscopía óptica de luz reflejada

Condiciones de operación:

Tabla A.37. Condiciones de operación para el ensayo de recuperación de latón por separación física por tamizado

Características	Magnitud	Unidad
Tamiz vibratorio # tamices	11	--
Tiempo de tamizado	15	[min]

Resultados:**Tabla A.38.** Caracterización de fracciones obtenidas por separación física por tamizado, por microscopía óptica de luz reflejada

Malla	Tamaño de partícula [μm]	Peso [g]	PORCENTAJE [%]
+40	0,30	0.3	60% pelusa fina. 25% limallas metálicas. 15% impurezas.
+50	0,30	0.3	65% pelusa fina. 10% limallas metálicas. 25% impurezas.
+60	0,20	0.2	90% pelusa fina. 3% limallas metálicas. 7% impurezas.
+70	0,30	0.3	20% pelusa fina. 80 % polvo metálico contaminado con impurezas (30% de polvo metálico y 50% de impurezas).
+80	0,60	0.6	55% pelusa contaminada con polvo metálico. 45% polvo metálico con pequeñas pelusas.de impurezas 2.48 x 2.46 mm.
+100	9,80	9.8	65% pelusa fina 10% limallas metálicas 25% impurezas
+200	18,80	18.8	50% motas. 50% polvo dorado metálico.
+270	45,90	45.9	100% Polvo homogéneo.
+325	24,60	24.6	100% Polvo homogéneo.
+400	20,40	20.4	100% Polvo homogéneo.
-400	123,40	123.4	100% Polvo homogéneo.

ANEXO VIII**CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL LATÓN COMERCIAL**

En la tabla 1, se detalla la concentración promedio de metales, mostrada por un latón comercial.

Tabla A.39 Concentración de metales en un latón comercial

Muestra	Contenido [%]				
	Cu	Fe	Zn	Al	Pb
Latón comercial	58,25	0,35	35,70	0,10	2,50

ANEXO IX

DEFINICIÓN DE LA CARGA DE SALES FUNDENTES RESPECTO AL MATERIAL PRETRATADO, TIEMPO DE FUSIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE AGITACIÓN

FICHA TÉCNICA N°1.

Ensayo N°: 1.

Tipo de ensayo: Determinación de la recuperación

Tipo de muestra: Residuo de latón

Tipo de proceso proveniente: Material pretratado

Objetivo: Determinar la recuperación de latón de la fusión de material pretratado a diferentes concentraciones y tiempos de trabajo e implementación de homogenización

Condiciones de operación:

Tabla A.40. Condiciones de operación para el ensayo de recuperación de latón por separación magnética húmeda

Características	Magnitud	Unidad
Temperatura de trabajo	1000	°C
Peso de materia prima	50	[g]
Tiempo de fusión	30	[min]

Resultados:**Tabla A.41.** Recuperaciones para cada cantidad de KCl en la fundición de material pretratado

Concentración de KCl [%]	Peso KCl [g]	Peso muestra [g]	Recuperación [g]	Recuperación [%]
0	0	50	0,0	0,0
10	5	50	14,0	28,0
16	8	50	25,4	50,8
20	10	50	27,4	54,8
30	15	50	35,2	70,4
40	20	50	31,2	62,4

FICHA TÉCNICA N°2.

Ensayo N°: 2.
Tipo de ensayo: Determinación de la recuperación
Tipo de muestra: Residuo de latón
Tipo de proceso proveniente: Material pretratado

Objetivo: Determinar la recuperación de latón de la fusión de material pretratado a diferentes concentraciones y tiempos de trabajo e implementación de homogenización

Condiciones de operación:

Tabla A.42. Condiciones de operación para el ensayo de recuperación de latón por separación magnética húmeda

Características	Magnitud	Unidad
Temperatura de trabajo	1000	°C
Peso de materia prima	50	[g]
Tiempo de fusión	45	[min]

Resultados:

Tabla A.43. Recuperaciones para cada cantidad de KCl en la fundición de material pretratado

Concentración de KCl [%]	Peso KCl [g]	Peso muestra [g]	Recuperación [g]	Recuperación [%]
0	0	50	0,0	0,0
10	5	50	19,7	39,4
16	8	50	27,3	54,6
20	10	50	28,9	57,8
30	15	50	40,1	80,2
40	20	50	28,3	56,6

ANEXO X

**DETERMINACIÓN DE LAS CAPACIDADES DE LOS EQUIPOS
PARA PURIFICACIÓN DE RESIDUOS DE LATÓN PARA SU
RECICLAJE**

Ensayo N° 1. Determinación del campo magnético inducido, para el hierro, cobre y zinc. Y partir de ahí la capacidad del equipo escogido

Se debe determinar esta variable para determinar el tipo de separador magnético más conveniente para este residuo.

Tabla A.44. Tratamiento de datos determinar el campo magnético inducido de el hierro, cobre y zinc

Nombre	Símbolo	Formula	Unidad	Valores	
Susceptibilidad Magnética	x	--	--	Fe	9,00E-02
				Cu	-8,60E-08
				Zn	-1,57E-07
Campo magnético aplicado	H	--	Gauss	Fe	570
				Cu	
				Zn	
Magnetización	M	$K = \frac{M}{H}$	Gauss	Fe	51,3
				Cu	-4,90E-05
				Zn	-8,95E-05
Intensidad de magnetización	J	$J = \frac{x}{H}$	Gauss	Fe	1,58E-04
				Cu	-1,51E-10
				Zn	-2,75E-10
--	φ	$\varphi = 4\pi j$	Gauss	Fe	1,98E-03
				Cu	-1,90E-09
				Zn	-3,46E-09
Campo magnético inducido	B	B=H + φ	Gauss	Fe	570,0019842
				Cu	570
				Zn	570

Con base a este cálculo se determina el equipo de separación magnética de baja intensidad, en seco y tipo banda cruzada. En este caso se debe determinar el ancho de correa de la banda. Para las siguientes condiciones de material.

β [°]:	34
δ [t/m ³]:	2,78
Largo (m)	1

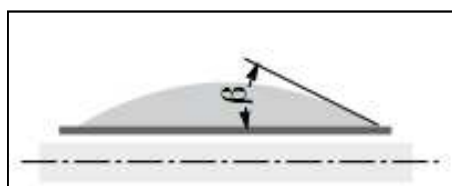


Figura A.10. Angulo de reposo para el material

$$A = \frac{b^2 * \tan(\beta)}{4} \quad [A.3]$$

$$Q = 3600 * v * A * \gamma \quad [A.4]$$

Se obtiene los resultados indicados en la tabla A45, para diferentes anchos de banda.

Tabla A.45. Determinación del área y capacidad de la banda

b ["]	A [m ²]	V [m ³]	[Kg/m]	Velocidad [m/s]	Q [t/h]	Q [kg/h]
0,09375	9,4506E-07	9,45E-07	2,6273E-06	1,05	0,00993107	9,931068092
0,1875	3,7802E-06	3,78E-06	1,0509E-05		0,03972427	39,72427237
0,375	1,5121E-05	1,51E-05	4,2036E-05		0,15889709	158,8970895
0,75	6,0484E-05	6,05E-05	0,00016815		0,63558836	635,5883579
1,5	2,42E-04	2,42E-04	0,00067258		2,54235343	2542,353431
3	9,68E-04	9,68E-04	0,00269032		10,1694137	10169,41373
6	3,87E-03	3,87E-03	0,01076128		40,6776549	40677,6549

Para determinar la velocidad, se utilizó como referencia la tabla A46.

Tabla A.46. Velocidades típicas para los materiales

Material	b [mm]	Velocidad [m/s]
Granos y otros materiales que fluyen bien y no son abrasivos	500	2,62
	650 y 800	3,35
	1000 y 1200	4,19
	1400 y 2400	5,24
Carbón, arcilla compacta, minerales blandos y tierras piedras trituradas de pequeño tamaño	500	2,09
	650-1000	3,35
	1200-1200	4,19
	1400-2400	5,24
Materiales no abrasivos	Cualquier ancho	1,05-1,68

Ensayo N° 2. Determinación de área de tamizado

Se debe determinar esta variable para determinar el tipo la capacidad del equipo

Tabla A.47. Determinación del área de tamizado

Alimentación [t/h]	Sobretamaño [t/h]	Pasante [t/h]	a	b	c	d	e	f	A [ft ²]
0,01	0,0015	0,0085	0,00724409	0,27	1	0,72	1	1	5,89

Para determinar los valores de los coeficientes a, b, c, d, y f, normalmente se recurre a tablas, pero al ser la capacidad de alimentación muy pequeña, se hizo reglas de tres simples entre valores cercanos y se saco un promedio. El valor de a, depende del tamaño de partícula, y se obtuvo el siguiente valor.

Tabla A.48. Factor A

dp ["]	a
1,5	2,68
0,75	1,8
0,375	1,19
2,95E-03	7,24E-03

Tabla A.49. Determinación del factor b

Alimentación(a)	Rechazo(b)	%Sibretamaño (c=b/a)	b
166	76	0,46	0,92
90	54	0,60	0,86
36	16	0,44	0,93
0,01	0,0015	0,15	0,28

Tabla A.49. Determinación del factor d

Alimentación (a)	1/2 Tamaño (b)	%Material Fino(c=bx100/a)	d
166	36	21,69	0,72
90	20	22,22	0,72
36	8	22,22	0,72
0,01	0,0022	22,04	0,72

ANEXO XI

CATÁLOGO DE LOS EQUIPOS

TAMIZ VIBRATORIO LINEAL

- Lugar del origen: Henan China (Mainland)
- Precio Fob: FOB Tianjing, Shanghai US\$ 800~4500
- Puerto: Tianjing, Shanghai
- Condiciones de pago: L/C, D/P, T/T, the two-sided settlement
- Cantidad de orden mínima: 1 Set/Sets
- Capacidad de la fuente: 50 Set/Sets per Trimestre
- Paquete: ser envasados en caja de madera
- Plazo de expedición: el plazo de 15 días hábiles
- Marca: Heng Yu

Tabla A.50. Características y especificaciones de arena de cuarzo especial tamiz vibratorio lineal

Lugar de Origen: NC, GALLINA	Material: de acero inoxidable o de carbono	Tipo: Lineal
Marca: Heng Yu	Color: de acuerdo a sus favoritos	Aplicación: equipos de control
Certificación: ISO	Condición: Nuevo	
Función: equipos de control	Embalaje: libre para el embalaje	Precio: precio favorable calidad: precio fiable
Estructura: diseño lineal	Garantía: plazo de 15 meses	Orden: Para la bienvenida a grandes o pequeños

Instrucciones especiales

Esta serie de tamiz vibrante se puede modificar para requisitos particulares para los clientes, sin importar anchura, longitud, altura, materiales.

Introducción

El tamiz vibrante lineal de la serie de HY es uno de los productos maduros en nuestra compañía, que tiene larga historia en el diseño y la fabricación. Usando los motores eléctricos de alta calidad como la fuente de energía, hace que los materiales lanzan hasta hace el movimiento lineal, puede ser equipado de solo o el acoplamiento de múltiples capas para alcanzar el propósito del grado, deshidratación, quita impurezas y la inspección, tiene la función de la clasificación y de la distribución.

Tabla A.51. Parámetros técnicos

Modelo	HY-520	HY-525	HY-1020	HY-1025
Dimensión del aspecto	500×2000	500×2500	1000×2000	1000×2500
Granulosidad material	0.074-10	0.074-10	0.074-10	0.074-10
Ángulo	1°-7°	1°-7°	1°-7°	1°-7°
Amplitud	3-4.5	3-4.5	3-4.5	3-4.5
Capa	1-6	1-6	1-6	1-6
Energía	2× (0.37-0.75)	2× (0.37-0.75)	2× (0.55-1.1)	2× (0.55-1.1)

Aviso especial

Si usted quiere obtener el tamiz vibrante, usted solamente nos proporciona el requisito siguiente, contestaremos a tiempo para cubrir sus demandas.

- El nombre de materiales, granulosis, gravedad específica, contenido en agua, viscosidad, temperatura.
- Puntería de usar: líbrese de la impureza, de la filtración, de clasificación, y del gránulo total y así sucesivamente.
- Volumen del tratamiento: kg/h, l./h.
- La especificación de la pantalla (acoplamiento o milímetro).



Figura A.11. Tamiz vibratorio lineal
OVERBAND CINTURÓN SEPARADOR MAGNÉTICO

- Lugar del origen: Shandong China (Mainland)
- Número de modelo: RCYD, RCDC, RCDD, RCDF, RCYK
- Precio Fob: FOB Qingdao, Shanghai, Tianjin, etc US\$ 1000~16570
- Puerto: Qingdao, Shanghai, Tianjin, etc
- Condiciones de pago: L/C,T/T
- Cantidad de orden mínima: 1 Set/Sets
- Capacidad de la fuente: 10 Set/Sets per Mes
- Paquete: embalaje de la exportación, envasado en una caja de madera, o según las peticiones del cliente.
- Plazo de expedición: Dentro de los 10 días después del pago adelantado se hace
- Marca: Huaxin

Tabla A.52. Características y Especificaciones de separador magnético de Overband

Tabla 2.1. Lugar de Origen: NC; SHN	Número de modelo: YdRc, RCDC, RCDF RCDD, RCYK	Tipo: Separador magnético
Marca: Huaxin	Certificación: ISO9001: 2008	Condición: Nuevo
Tipo de instalación: Suspendido el tipo	Tipo de limpieza: Limpieza automática	origen magnético: Permanente magnética, electromagnética
Hierro capacidad de atraer: 0.05 ~ 20 kg	Adaptable ancho de la cinta: 400 ~ 2000 mm	Tabla 2.2. Adaptable velocidad de la cinta: $\leq 4,5$ m / s
Tabla 2.3. Intensidad magnética presentada: ≥ 3.200 gauss	Tabla 2.4.	Tabla 2.5.

Introducción

El separador magnético de Overband se suspende generalmente sobre la banda transportadora, el vibrador, el alimentador vibrante o el canal inclinado para atraer los elementos magnéticos, especialmente elementos ferrosos de los materiales no magnéticos para la purificación de materiales o de proteger la máquina machacante, fresadora en el paso siguiente de la producción. El separador magnético de la correa de Overband es completo, posee una correa que atrae a los elementos. El separador magnético de la correa de Overband se puede dividir en el separador magnético permanente y el separador electromagnético. El equipo permanente de la correa de Overband adopta el imán de la tierra rara y el imán de la ferrita para formar su sistema magnético permanente, mientras que el separador electromagnético de la correa del overband adopta bobinas de la excitación para formar su sistema electromagnético. El separador magnético de la correa de Overband se utiliza generalmente en ocasiones del deber continuo con el un montón de materiales del hierro. El separador magnético de la correa de Overband se aplica extensamente en el cemento, productos químicos, plásticos, carbón, material refractario, materiales de construcción, alimento y otras industrias.

Características

1. Intensidad del campo.
2. La estructura sellada hace el separador magnético resistencia impermeable, a prueba de polvo y de la corrosión.
3. Consumo de energía baja.
4. Eficacia alta, funcionamiento estable y buena flexibilidad.
5. Fácil instalar y utilizar, mantenimiento bajo.
6. Vida de servicio larga.

Principio de funcionamiento

Cuando el separador magnético funciona, los materiales en la banda transportadora pasan debajo del separador magnético, y los elementos magnéticos, especialmente los elementos ferrosos en las materias primas serán atraídos a la superficie de la correa. Conducido por el motor, la correa del hierro-limpieza se moverá adelante, y los elementos magnéticos en la correa de la hierro-limpieza serán conducidos para moverse por consiguiente bajo fuerza de fricción y efecto de la placa de bafle. Cuando los elementos magnéticos se mueven lejos del área del campo magnético, como resultado de su gravedad e inercia, caerán a un compartimiento de recogida debajo del separador magnético o caerán a otra banda transportadora y serán transportados al área de junta, y éste es el final del proceso automático de la limpieza.

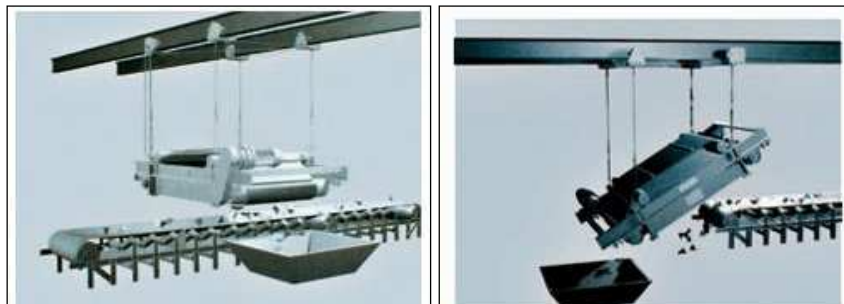


Figura A.12. Separador magnética de overband a) Horizontal b) Inclinado

Model No.	Adaptive belt width (mm)	Suspension height (h≤mm)	Magnetic filed intensity (≥mT)	Depth of materials (≤mm)	Motor power (kW)	Adaptive belt speed (≤m/s)	Weight (kg)
RCYD-5	500	150	320	80	1.5	4.5	750
RCYD-6	600	175	320	120	1.5		920
RCYD-6.5	650	200	320	150	1.5		1200
RCYD-8	800	250	320	200	2.2		1400
RCYD-10	1000	300	320	250	3		2120
RCYD-12	1200	350	320	300	4		3350
RCYD-14	1400	400	320	350	4		4450
RCYD-16	1600	450	320	400	5.5		6200
RCYD-18	1800	500	320	450	5.5		8100
RCYD-20	2000	550	320	500	7.5		9700

Model No.	Adaptive belt width (mm)	Suspension height (h≤mm)	Magnetic filed intensity (≥mT)	Depth of materials (≤mm)	Excitation power (≤kW)	Motor power (kW)	Adaptive belt speed (≤m/s)	Weight (kg)
RCDD-5	500	150	320	100	1.5	1.5	4.5	950
RCDD-6	600	175	320	120	1.6	1.5		1250
RCDD-6.5	650	200	320	150	2	1.5		1500
RCDD-8	800	250	320	200	3	2.2		1730
RCDD-10	1000	300	320	250	4.6	3		2250
RCDD-12	1200	350	320	300	6.7	4		3150
RCDD-14	1400	400	320	350	8.7	4		4650
RCDD-16	1600	450	320	400	13	5.5		5950
RCDD-18	1800	500	320	450	18	5.5		7620

Model No.	Adaptive belt width (mm)	Suspension height (h≤mm)	Magnetic filed intensity (≥mT)	Depth of materials (≤mm)	Excitation power (≤kW)	Motor power (kW)	Adaptive belt speed (≤m/s)	Weight (kg)
RCDC-5	500	150	320	100	1	1.5	4.5	1080
RCDC-6	600	175	320	120	1.6	1.5		1350
RCDC-6.5	650	200	320	150	2	2.2		1530
RCDC-8	800	250	320	200	4	2.2		2100
RCDC-10	1000	300	320	250	6	3		3380
RCDC-12	1200	350	320	300	8	4		4150
RCDC-14	1400	400	320	350	12	4		5500
RCDC-16	1600	450	320	400	15	5.5		6900
RCDC-18	1800	500	320	450	20	7.5		8800
RCDC-20	2000	550	320	500	26	7.5		10500
RCDC-22	2200	600	320	550	32	11		12900

Model No.	Adaptive belt width (mm)	Suspension height (h≤mm)	Magnetic filed intensity (≥mT)	Depth of materials (≤mm)	Excitation power (≤kW)	Motor power (kW)	Adaptive belt speed (≤m/s)	Weight (kg)
RCDF-5	500	150	320	100	1.2	1.5	4.5	1100
RCDF-6	600	175	320	130	1.8	1.5		1500
RCDF-6.5	650	200	320	150	2	2.2		1800
RCDF-8	800	250	320	200	3.3	2.2		2500
RCDF-10	1000	300	320	250	4.6	3		3550
RCDF-12	1200	350	320	300	6.7	4		4650
RCDF-14	1400	400	320	350	8.7	4		6290
RCDF-16	1600	450	320	400	13	5.5		7770
RCDF-18	1800	500	320	450	18	7.5		8900

Nota: 1 mT = 10 gauss