

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA

DISEÑO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS GENERADOS EN LA FUNDICIÓN DE LATÓN

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
QUÍMICO

IVÁN MAURICIO VALDIVIESO MENÉNDEZ

bambamleo2@hotmail.com

DIRECTOR: ING. ERNESTO DE LA TORRE

ernesto.delatorre@epn.edu.ec

Quito, Noviembre 2012

© Escuela Politécnica Nacional (2012)
Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN

Yo, Iván Mauricio Valdivieso Menéndez, 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.

Iván Mauricio Valdivieso Menéndez

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Iván Mauricio Valdivieso Menéndez, bajo mi supervisión.

Ing. Ernesto de la Torre.
DIRECTOR DE PROYECTO

AUSPICIO

La presente investigación contó con el auspicio financiero del Proyecto Semilla PIS09-04 de la Escuela Politécnica nacional, que se ejecuta en el Departamento de Metalurgia Extractiva.

AGRADECIMIENTOS

Sin palabras para expresar mi eterna gratitud a Dios quien me dió las fuerzas para continuar adelante y no bajar los brazos a pesar de las adversidades que se presentaron en mi vida, pero que gracias a su bendición, me enseñó a vivir y me mostró el camino hacia la paciencia y la tenacidad para luchar por lo que tanto se quiere.

Gracias a mi familia, a mi papá Félix (el Doc) y a mi mamá Liria (la Doña) por los consejos que me dieron durante mi vida de estudios y me inculcaron aquellos valores morales que ahora son fundamentales para mí. A mis hermanos Javier (flaco), Mariela (gordis) y Hernán (enano) por su apoyo y por las risas que me dan cuando existen momentos difíciles.

A Ing. Alicia quien me brindó su apoyo para iniciar el proyecto de tesis y puso su confianza sobre mí, y con quien en conjunto con Lore formamos un gran equipo y más que un equipo, una familia en el Departamento de Metalurgia Extractiva. Y de manera especial a mi amigo Ernesto de la Torre quien me aconsejó en las buenas, en las malas, en las peores, con quien jugué volley casi todos los viernes y quien fue mi guía para este gran proyecto de titulación.

A mis amigos del demex a quienes los considero como mi familia y de quién me siento parte de ellos: Magyta, Verito, Eve, Alice, Ernesto, Kleverito, Isacc Meza, Pepe Lucho, Marlon Jácome, Paco Estrella y mis amigas con quien compartí mi tiempo de tesis junto a ellas y con quienes viví muchos momentos gratos y hasta fui su D.T.: Cynti Espinoza, Lore Guanoluiza, Ara Culqui, Xime Suquillo y a todos mis compañeros del laboratorio.

A mis amigos que son especiales y a quienes considero como hermanos: Javi Yaselga, Luchito Tapia (Trax), Kary Flores, de manera especial y personal a Karlita Velín quien me brindó su mano, me apoyó en el camino y a quien quiero con todo el corazón. Gracias amigos!

Mis amigos con quienes llegué a encontrar en ellos personas valiosas y aprecio de verdad desde que entre a la carrera, Susy Morales, Eliana Pérez, Moni Vaca, Edu Almeida, Manu Villagómez, Carlita Molina, Charlie Haro, Johanna Flores, Lois Guanoluisa, Dianita Minayo, Jazz Tabango, Cris Pachacama y Jessi Montenegro.

A mis amigotas Brie Rivilla, Dianita Celi y Ale Erazo de quienes llegaron a mi vida y me dieron alegría y apoyo cuando lo necesitaba.

Y tampoco me he de olvidar de todos aquellos que me consideraron parte de la familia poli: Pato Sánchez, mi bisabuelita Ely Eras, Mabe Espín, Miguicho Pazmiño, Andrés Acevedo y Julisa Jiménez (mamá)...

DIOS LOS BENDIGA A TODOS...!!!

*Pero sobre todas las cosas,
Nunca te olvides de Dios.*

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	xxiii
INTRODUCCIÓN	xxiv
1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	1
1.1. Residuos de fundición y sus implicaciones ambientales	1
1.1.1. Principales etapas en los procesos de fundición	3
1.1.1.1. Fabricación de moldes	4
1.1.1.2. Fusión y llenado de moldes (Vaciado)	4
1.1.1.3. Proceso de limpieza y terminación (Desmoldeo)	5
1.1.2. Generación y tipos de residuos en las industrias fundidoras de metales	6
1.1.2.1. Fundición de metales no ferrosos	6
1.1.3. Determinación de la peligrosidad de un residuo	7
1.1.3.1. TCLP	8
1.1.4. Análisis de decisiones sobre la viabilidad del tratamiento de un residuo	10
1.2. Tamizado, filtración y sedimentación de residuos metálicos industriales	12
1.2.1. Proceso de tamizado	14
1.2.1.1. Tamizado en el sector industrial	15
1.2.1.2. Tamizado por vía húmeda	17
1.2.2. Filtración en residuos metálicos industriales	18
1.2.3. Proceso de sedimentación	22
1.2.3.1. Coagulación / Floculación	25
1.2.3.2. Tipos de floculantes	30
1.3. Estabilización de los residuos metálicos industriales	31
1.3.1. Mecanismos de estabilización	35
1.3.1.1. Macroencapsulación de Residuos	36
1.3.1.2. Microencapsulación de Residuos	36
1.3.1.3. Mecanismo de Absorción	36
1.3.1.4. Mecanismo de Detoxificación	37
1.3.2. Tecnología de estabilización	37
1.3.2.1. Estabilización con cemento	38
1.3.2.2. Estabilización con puzolanas	39
1.3.2.3. Estabilización con cal	39
1.3.2.4. Estabilización con polímeros orgánicos termoestables	40
1.3.3. Confinamiento de los residuos como disposición final	40
1.3.3.1. Sistema pasivo de control	40
1.3.3.2. Sistema de sellado y recogido de lixiviados	41
1.3.3.3. Materiales utilizados para confinamiento	43

2. PARTE EXPERIMENTAL	45
2.1. Caracterización físico - química y mineralógica de residuos sólidos de fundición de latón	47
2.1.1. Caracterización física	47
2.1.1.1. Densidad aparente	47
2.1.1.2. Densidad real	48
2.1.1.3. Granulometría	48
2.1.1.4. Determinación de pH	49
2.1.2. Caracterización química	49
2.1.3. Caracterización mineralógica	50
2.2. Evaluación del proceso de clasificación por tamaño en seco y caracterización de fracciones	50
2.2.1. Ensayo de fusión	51
2.2.1.1. Fundición de las fracciones mayores a 150 μm por separado	51
2.2.1.2. Fundición de las fracciones mayores a 150 μm unido	52
2.2.1.3. Fundición de la fracción menor a 150 μm	53
2.2.2. Test TCLP	53
2.3. Evaluación del proceso de clasificación por tamaño en húmedo	54
2.4. Influencia de la filtración en la recirculación del agua del tamizado en húmedo	55
2.5. Influencia de la sedimentación en la recirculación de agua del tamizado en húmedo	56
2.5.1. Ensayos de sedimentación con floculantes	56
2.5.1.1. Determinación de la velocidad de sedimentación	57
2.5.1.2. Determinación del mejor floculante en la sedimentación de los residuos sólidos de fundición	57
2.5.2. Sedimentación de los residuos sólidos de fundición y recirculación de agua	58
2.5.3. Lixiviación a los residuos tratados por filtración y sedimentación	58
2.6. Estabilización de los residuos tamizados no recuperables	59
2.6.1. Materiales y formulación de los residuos para la elaboración de adoquines	60
2.6.2. Ensayo de resistencia a la compresión	61
2.6.2.1. Preparación de la muestra para el ensayo de compresión	61
2.6.2.2. Ensayo de compresión	62
2.6.3. Análisis de TCLP de los adoquines	62
2.7. Diagrama de flujo y dimensionamiento de equipos	63
2.7.1. Diagrama de flujo	63
2.7.2. Diseño de la planta de tratamiento de residuos sólidos de fundición	64
2.7.3. Dimensionamiento y capacidad de los equipos	64
2.7.3.1. Tanque de mezclado	65
2.7.3.2. Tamizado	65
2.7.3.3. Filtro	66
2.7.3.4. Equipo de compactación	67

2.8. Evaluación económica preliminar	68
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	70
3.1. Caracterización físico - química y mineralógica de residuos sólidos de fundición de latón	70
3.1.1. Caracterización física	70
3.1.1.1. Densidad aparente, densidad real y determinación de pH de los residuos sólidos	70
3.1.1.2. Granulometría de los residuos sólidos	71
3.1.2. Caracterización química de los residuos sólidos	72
3.1.3. Caracterización mineralógica	73
3.2. Evaluación del proceso de clasificación por tamaño en seco y caracterización de fracciones	74
3.2.1. Caracterización de las fracciones retenidas en cada malla	75
3.2.1.1. Ensayo de fusión	76
3.2.1.2. Test TCLP a la fracción de residuo menor de 150 μm	79
3.3. Evaluación del proceso de clasificación por tamaño en húmedo	81
3.3.1. Granulometría en el tamizado en húmedo	81
3.4. Influencia de la filtración en la recirculación del agua del tamizado en húmedo	83
3.5. Influencia de la sedimentación en la recirculación de agua del tamizado en húmedo	85
3.5.1. Ensayos de sedimentación con floculantes	85
3.5.1.1. Concentración de metales en la sedimentación	85
3.5.1.2. Determinación de la velocidad de sedimentación	87
3.5.1.3. Determinación del mejor floculante en la sedimentación de los residuos sólidos de fundición	89
3.5.2. Sedimentación de los residuos sólidos de fundición y recirculación de agua	90
3.5.2.1. Sedimentación durante 24 horas	90
3.5.2.2. Sedimentación durante 4 horas	92
3.5.3. Lixiviación de los residuos tratados mediante filtración y sedimentación	93
3.5.3.1. Ensayo de lixiviación	93
3.5.3.2. Test TCLP	94
3.5.3.3. Porcentaje de recuperación de metales	95
3.6. Estabilización de los residuos tamizados no recuperables	97
3.6.1. Materiales y formulación de los residuos para la elaboración de adoquines	97
3.6.2. Ensayo de resistencia a la compresión	97
3.6.3. Análisis de TCLP de los adoquines	99
3.7. Diagrama de flujo, dimensionamiento de equipos	101
3.7.1. Diagrama de flujo	102

3.7.2. Dimensionamiento y capacidad de los equipos	106
3.7.2.1. Tanque de mezclado	106
3.7.2.2. Tamiz	107
3.7.2.3. Filtro	108
3.7.2.4. Horno de fundición	108
3.7.2.5. Equipo de compactación	108
3.7.2.6. Distribución de equipos en planta	110
3.8. Evaluación económica preliminar	112
3.8.1. Compra de terreno e infraestructura	113
3.8.2. Inversión de equipos principales	113
3.8.3. Costos fijos	114
3.8.3.1. Mano de obra directa, personal requerido	115
3.8.3.2. Mantenimiento de planta	116
3.8.4. Costos variables	116
3.8.4.1. Reactivos o materia prima	117
3.8.4.2. Energía eléctrica	117
3.8.4.3. Agua	118
3.8.5. Ingresos generados	119
3.8.6. TIR Y VAN	120
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	124
4.1. CONCLUSIONES	124
4.2. RECOMENDACIONES	126
BIBLIOGRAFÍA	127
ANEXOS	132

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Residuo generado en el proceso de fundición de metales no ferrosos	7
Tabla 1.2. Límite máximo de la concentración de metales en sólidos para no ser considerado peligroso.	8
Tabla 1.3. Límites de descarga al sistema de alcantarillado público.	9
Tabla 1.4. Aberturas y número de malla ASTM.	15
Tabla 1.5. Ventajas y desventajas del proceso de estabilización y solidificación.	33
Tabla 1.6. Relación de metales tóxicos	34
Tabla 1.7. Estudio de distintos casos de tecnologías de estabilización (Modificado de EPA Estados Unidos).	35
Tabla 1.8. Aplicación de reactivos para la estabilización de residuos	37
Tabla 1.9. Tipos de geomembrana	43
Tabla 1.10. Propiedades de geomembrana.	44
Tabla 2.1. Combinación de las fracciones retenidas en las mallas 10, 50, 100. Temperatura 900 °C. Uso de diferentes cargas fundentes.	52
Tabla 2.2. Tabla de floculantes y concentraciones.	56
Tabla 2.3. Porcentaje de sólidos y tipo de lixiviación.	59
Tabla 2.4. Composición de los adoquines.	60
Tabla 3.1. Densidad real, aparente y pH de los residuos de fundición.	70
Tabla 3.2. Análisis Granulométrico	71
Tabla 3.3. Análisis Químico de residuo.	72
Tabla 3.4. Análisis por Difracción de Rayos X, fracción de residuo menor a 150 μm .	73
Tabla 3.5. Recuperación de la fase metálica del residuo por proceso de fusión. Temperatura de fusión: 900 °C.	76
Tabla 3.6. Recuperación de la fase metálica de las fracciones + 2 mm, + 300 μm y + 150 μm unidos utilizando diferentes fundentes. Temperatura 900°C	77

Tabla 3.7. Recuperación metálica en la fundición, fracción menor a 150 μm	77
Tabla 3.8. Concentración de los elementos analizados de la fracción mayor de 150 y la fracción menor a 150 μm .	78
Tabla 3.9. Concentración de los elementos por test TCLP. Fracción del residuo menor a 150 μm .	80
Tabla 3.10. Análisis granulométrico	81
Tabla 3.11. Concentración de los elementos en la clasificación en húmedo, purificación del agua mediante filtración.	83
Tabla 3.12. Determinación de la influencia del tipo de floculante a utilizarse para el proceso de sedimentación.	86
Tabla 3.13. Velocidad de sedimentación con y sin el uso de floculante.	88
Tabla 3.14. Concentración de elementos en el efluente en el proceso de sedimentación. Agente floculante: cloruro férrico, 1 g/L. Tiempo de sedimentación: 24 h.	91
Tabla 3.15. Concentración de elementos en el efluente en el proceso de sedimentación. Agente floculante: cloruro férrico, 1 g/L. Tiempo de sedimentación: 4 h.	92
Tabla 3.16. Lixiviación ácida y básica a los residuos tratados por sedimentación y filtración.	93
Tabla 3.17. Test TCLP al relave.	94
Tabla 3.18. Porcentaje de recuperación de metales en las soluciones de filtrado, lavado y relave. Residuos tratados por medio de filtración.	95
Tabla 3.19. Porcentaje de recuperación de metales en las soluciones de filtrado, lavado y relave. Residuos tratados por medio de sedimentación.	96
Tabla 3.20. Ensayos de Compresión de Adoquines	97
Tabla 3.21. Descripción de la compresión de adoquines.	98
Tabla 3.22. TCLP de los adoquines.	99
Tabla 3.23. Tiempo de operación de cada equipo.	101
Tabla 3.24. Dimensiones del tanque.	106
Tabla 3.25. Dimensiones del tanque seleccionado por catálogo.	107

Tabla 3.26. Resultados del área de tamizado.	107
Tabla 3.27. Capacidad y dimensiones de filtro prensa.	108
Tabla 3.28. Capacidad del tanque de mezclado.	109
Tabla 3.29. Dimensiones y cantidad de bloques que se realizarán.	109
Tabla 3.30. Características de procesamiento de bloques.	110
Tabla 3.31. Compra de terreno.	113
Tabla 3.32. Descripción de los equipos requeridos.	113
Tabla 3.33. Costos de los equipos a utilizar	114
Tabla 3.34. Costos fijos obtenidos	116
Tabla 3.35. Reactivos y materia prima	117
Tabla 3.36. Energía consumida por los equipos.	118
Tabla 3.37. Consumo inicial de agua	118
Tabla 3.38. Ingresos mensuales tratamiento de residuos	120
Tabla 3.39. Egresos anuales	120
Tabla 3.40. Ingresos anuales.	121
Tabla 3.41. Flujo de caja anual. Tiempo de vida útil: años.	121
Tabla 3.42. TIR, VAN, B/C	122
Tabla A.1. Análisis granulométrico.	133
Tabla A.2. Granulometría de la clasificación por tamaño en húmedo.	135
Tabla A.3. Recirculaciones de agua en clasificación por tamaño en húmedo.	136
Tabla A.4. Concentración de metales en las recirculaciones de agua sin tratamiento de filtración ni sedimentación.	137
Tabla A.5. Recirculaciones de agua en clasificación por tamaño en húmedo.	138
Tabla A.6. Concentraciones de metales en el efluente tratado por filtración.	139
Tabla A.7. Recirculaciones de agua en clasificación por tamaño en húmedo.	140

Tabla A.8. Concentraciones de metales en el efluente tratado por filtración.	141
Tabla A.9. Recirculaciones de agua en clasificación por tamaño en húmedo.	142
Tabla A.10. Recirculaciones de agua en clasificación por tamaño en húmedo.	143
Tabla A.11. Concentraciones de metales en el residuo menor a 150 μm .	144
Tabla A.12. Recuperación de cinc en medio ácido. Procedencia: residuos tratados por sedimentación. Concentración al 10 % de sólidos.	145
Tabla A.13. Recuperación de cobre en medio ácido. Procedencia: residuos tratados por sedimentación. Concentración al 10 % de sólidos.	146
Tabla A.14. Recuperación de hierro en medio ácido. Procedencia: residuos tratados por sedimentación. Concentración al 10 % de sólidos.	146
Tabla A.15. Recuperación de plomo en medio ácido. Procedencia: residuos tratados por sedimentación. Concentración al 10 % de sólidos.	146
Tabla A.16. Recuperación de cinc en medio ácido. Procedencia: residuos tratados por sedimentación. Concentración al 30 % de sólidos.	147
Tabla A.17. Recuperación de cobre en medio ácido. Procedencia: residuos tratados por sedimentación. Concentración al 30 % de sólidos.	147
Tabla A.18. Recuperación de hierro en medio ácido. Procedencia: residuos tratados por sedimentación. Concentración al 30 % de sólidos.	148
Tabla A.19. Recuperación de hierro en medio ácido. Procedencia: residuos tratados por sedimentación. Concentración al 30 % de sólidos.	148
Tabla A.20. Recuperación de cinc en medio alcalino. Procedencia: residuos tratados por sedimentación. Concentración al 10 % de sólidos.	149
Tabla A.21. Recuperación de cobre en medio alcalino. Procedencia: residuos tratados por sedimentación. Concentración al 10 % de sólidos.	149
Tabla A.22. Recuperación de hierro en medio alcalino. Procedencia: residuos tratados por sedimentación. Concentración al 10 % de sólidos.	150
Tabla A.23. Recuperación de hierro en medio alcalino. Procedencia: residuos tratados por sedimentación. Concentración al 10 % de sólidos.	150
Tabla A.24. Recuperación de cinc en medio alcalino. Procedencia: residuos tratados por sedimentación. Concentración al 30 % de sólidos.	151
Tabla A.25. Recuperación de cobre en medio alcalino. Procedencia: residuos tratados por sedimentación. Concentración al 30 % de sólidos.	151

Tabla A.26. Recuperación de hierro en medio alcalino. Procedencia: residuos tratados por sedimentación. Concentración al 30 % de sólidos.	152
Tabla A.27. Recuperación de hierro en medio alcalino. Procedencia: residuos tratados por sedimentación. Concentración al 30 % de sólidos.	152
Tabla A.28. Recuperación de cinc en medio ácido. Procedencia: residuos tratados por filtración. Concentración al 10 % de sólidos.	153
Tabla A.29. Recuperación de cobre en medio ácido. Procedencia: residuos tratados por filtración. Concentración al 10 % de sólidos.	153
Tabla A.30. Recuperación de hierro en medio ácido. Procedencia: residuos tratados por filtración. Concentración al 10 % de sólidos.	154
Tabla A.31. Recuperación de hierro en medio ácido. Procedencia: residuos tratados por filtración. Concentración al 10 % de sólidos.	154
Tabla A.32. Recuperación de cinc en medio ácido. Procedencia: residuos tratados por filtración. Concentración al 30 % de sólidos.	155
Tabla A.33. Recuperación de cobre en medio ácido. Procedencia: residuos tratados por filtración. Concentración al 30 % de sólidos.	155
Tabla A.34. Recuperación de hierro en medio ácido. Procedencia: residuos tratados por filtración. Concentración al 30 % de sólidos.	156
Tabla A.35. Recuperación de hierro en medio ácido. Procedencia: residuos tratados por filtración. Concentración al 30 % de sólidos.	156
Tabla A.36. Recuperación de cinc en medio alcalino. Procedencia: residuos tratados por filtración. Concentración al 10 % de sólidos.	157
Tabla A.37. Recuperación de cobre en medio alcalino. Procedencia: residuos tratados por filtración. Concentración al 10 % de sólidos.	157
Tabla A.38. Recuperación de hierro en medio alcalino. Procedencia: residuos tratados por filtración. Concentración al 10 % de sólidos.	158
Tabla A.39. Recuperación de hierro en medio alcalino. Procedencia: residuos tratados por filtración. Concentración al 10 % de sólidos.	158
Tabla A.40. Recuperación de cinc en medio alcalino. Procedencia: residuos tratados por filtración. Concentración al 30 % de sólidos.	159
Tabla A.41. Recuperación de cobre en medio alcalino. Procedencia: residuos tratados por filtración. Concentración al 30 % de sólidos.	159

Tabla A.42. Recuperación de hierro en medio alcalino. Procedencia: residuos tratados por filtración. Concentración al 30 % de sólidos.	160
Tabla A.43. Recuperación de hierro en medio alcalino. Procedencia: residuos tratados por filtración. Concentración al 30 % de sólidos.	160
Tabla A.44. Datos relacionados a la altura vs. tiempo.	161
Tabla A.45. Cálculo del Área Unitaria. Ensayo de Laboratorio.	168
Tabla A.46. Factor a	170
Tabla A.47. Factor b	170
Tabla A.48. Factor c	170
Tabla A.49. Factor d	171
Tabla A.50. Factor e	171
Tabla A.51. Factor F	171
Tabla A.52. Clasificación de tránsito y tipo de adoquín.	187
Tabla A.53. Factores de corrección.	188
Tabla A.54. Especificaciones técnicas	192
Tabla A. 55. Especificaciones técnicas del filtro prensa.	194

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Producción de residuos peligrosos en España por sectores industriales.	2
Figura 1.2. Esquema del proceso de fundición de metales y ciclo de tratamiento de la arena del molde.	5
Figura 1.3. Árbol de decisiones sobre el estudio de viabilidad de tratamiento del residuo mediante E/S.	11
Figura 1.4. Interacciones entre las diferentes fases de manejo de los residuos industriales para promover su valorización integral.	12
Figura 1.5. Tamaños de partículas en los que se emplean los diferentes métodos de separación de sólidos.	13
Figura 1.6. Aberturas de tamices o cribas de diferentes dimensiones y formas.	14
Figura 1.7. Movimiento de las partículas sobre la superficie del tamiz o de la criba	15
Figura 1.8. Criba Fija	16
Figura 1.9. Criba Giratoria	16
Figura 1.10. Criba vibratoria	17
Figura 1.11. Tamizado por vía Húmeda	18
Figura 1.12. Proceso de tratamiento de agua	19
Figura 1.13. Proceso de filtración.	20
Figura 1.14. Filtro prensa de placa y marcos.	21
Figura 1.15. Velocidad inicial de la sedimentación y localización de zonas.	23
Figura 1.16. Velocidad inicial de la sedimentación vs. Concentración de sólidos.	24
Figura 1.17. Curva de sedimentación de una suspensión líquida (pulpa).	24
Figura 1.18. Atrapamiento de partículas en un floc.	25
Figura 1.19. Diagrama de Pourbaix para cinc a 25°C en medio acuoso.	26
Figura 1.20. Diagrama de Pourbaix del Cobre en medio acuoso	27
Figura 1.21. Diagrama de Pourbaix de Plomo en medio acuoso.	27

Figura 1.22. Esquema del mecanismo de la adsorción de polímeros y partículas coloidales para producir puentes entre las partículas	28
Figura 1.23. Procesos previos a la estabilización y solidificación.	32
Figura 1.24. Reacciones del cemento portland	38
Figura 1.25. Esquema de los sistemas de sellado y recogida de lixiviados en una instalación para disposición de residuos peligrosos.	42
Figura 2.1. Esquema del trabajo experimental.	46
Figura 2.2. Esquema de la caracterización de fracciones de residuos de fundición.	50
Figura 2.3. Esquema del proceso de tamizado y fundición de las fracciones mayores a 150 μm unidas.	52
Figura 2.4. Equipo para la clasificación por tamaño en húmedo.	54
Figura 2.5. Procedimiento para el ensayo de compresión de adoquines.	61
Figura 2.7. Equipo Suz Pecar Servosis utilizado para la compresión de adoquines.	62
Figura 2.7. Sistema de compactación	67
Figura 3.1. Fracción de residuos retenidos en cada malla.	74
Figura 3.2. Fracciones los residuos de fundición retenidas en cada malla posterior a la clasificación por tamaño en seco. a) malla No. 10 (2 mm); b) malla No. 50 (300 μm); c) malla No. 100 (150 μm); d) fondo (<150 μm).	75
Figura 3.3. Fracciones los residuos de fundición retenidas en cada malla posterior a la clasificación por tamaño en húmedo. a) malla No. 10 (2 mm); b) malla No. 50 (300 μm); c) malla No. 100 (150 μm); d) fondo (<150 μm).	82
Figura 3.4. Concentración de los elementos en la clasificación en húmedo, purificación del agua mediante filtración.	84
Figura 3.5. Ensayos de sedimentación con diferentes agentes floculantes.	87
Figura 3.6. Altura vs. tiempo. Agente floculante: poliacrilamida; 1 g/L.	89
Figura 3.7. Concentración de los elementos en la clasificación en húmedo, purificación del agua mediante sedimentación. Agente floculante: FeCl_3 , 1 g/L.	91
Figura 3.8. Esquema del proceso de estabilización de residuos mediante el uso de tamizado en seco.	102

Figura 3.9. Esquema del proceso de estabilización de residuos mediante el uso de tamizado en seco.	103
Figura 3.10. Esquema del proceso de estabilización de residuos mediante el uso de tamizado en húmedo con proceso de filtración.	103
Figura 3.11. Esquema del proceso de estabilización de residuos mediante el uso de tamizado en húmedo con proceso de sedimentación.	104
Figura 3.12. Balance de masa aplicado para el tratamiento de residuos de un día de trabajo.	105
Figura 3.13. Vista superior de la distribución de los equipos en el interior de la planta	111
Figura 3.14. Vista superior del dimensionamiento de la planta.	112
Figura A.1. Altura vs. tiempo. Sedimentación sin floculante.	163
Figura A.2. Altura vs. tiempo. Agente floculante: Sulfato de aluminio, 1g/L.	163
Figura A.3. Altura vs. tiempo. Agente floculante: sulfato de aluminio y cal.	164
Figura A.4. Altura vs. tiempo. Agente floculante: cal; 0,25 %.	164
Figura A.5. Altura vs. tiempo. Agente floculante: cal; 0,1 %.	165
Figura A.6. Altura vs. tiempo. Agente floculante: cal; 0,4 %.	165
Figura A.7. Altura vs. tiempo. Agente floculante: cal 0,5 %.	166
Figura A.8. Altura vs. tiempo. Agente floculante: 1 %.	166
Figura A.9. Altura vs. tiempo. Agente floculante: cloruro férrico; 1 g/L.	167
Figura A.10. Altura vs. tiempo. Agente floculante: poliacrilamida; 1 g/L.	167
Figura A.11. Tamiz Vibratorio Industrial.	191
Figura A.12. Funcionamiento del filtro prensa.	193
Figura A.13. Tablas de selección y capacidad.	194
Figura A.14. Dimensiones del filtro prensa.	194
Figura A.15. Modelo de vibrocompactadora.	196

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO I	
Determinación de la granulometría	133
ANEXO II	
Recirculación de agua en el proceso de clasificación por tamaño en húmedo	136
ANEXO III	
Recirculación de agua en el proceso de clasificación por tamaño en húmedo tratamiento por medio de filtración	138
ANEXO IV	
Recirculación de agua en el proceso de clasificación por tamaño en húmedo tratamiento por medio de sedimentación	140
ANEXO V	
Recirculación de agua en el proceso de clasificación por tamaño en húmedo tratamiento por medio de sedimentación	142
ANEXO VI	
Recirculación de agua en el proceso de clasificación por tamaño en húmedo tratamiento por medio de sedimentación	143
ANEXO VII	
Concentración de metales en el residuo menor a 150 μm	144
ANEXO VIII	
Determinación de la recuperación de metales provenientes de sedimentación por medio de lixiviación	145
ANEXO IX	
Ensayos de sedimentación con diferentes agentes floculantes	161
Determinación del área unitaria	168
ANEXO X	
Dimensiones del tamiz	170

ANEXO XI	
Dimensionamiento del tanque de sedimentación	172
ANEXO XII	
Norma oficial mexicana nom-crp-001-ecol/1993, que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.	173
ANEXO XIII	
Norma oficial mexicana nom-crp-002-ecol/1993, que establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente	181
ANEXO XIV	
Norma técnica ecuatoriana INEN 1 488 (1986-10)	187
Adoquines. Requisitos	187
ANEXO XV	
Norma técnica ecuatoriana INEN 1 485 (1986-10)	189
Adoquines. Determinación de la resistencia a la compresión	189
ANEXO XVI	
Catálogo	191
Tamiz vibratorio	191
Filtro	193
Vibrocompactadora	196

RESUMEN

El presente proyecto tuvo por objetivo el diseño de una planta de tratamiento de los residuos sólidos de fundición de latón provenientes de la elaboración de grifería. Estos residuos presentan un d_{80} de 2 000 μm (2 mm).

La caracterización físico química de estos residuos fue realizada mediante espectroscopia de absorción atómica (AA) y la caracterización mineralógica por difracción de rayos X (DRX).

Los residuos fueron llevados a tamizado en húmedo para evitar la generación de polvos, con las mallas No. 10 (2 mm), No. 50 (300 μm), No. 100 (150 μm) y tratados por medio de filtración y sedimentación. Sin embargo, el proceso de sedimentación con floculante produjo disolución de metales en el efluente y no estabilizaron el residuo. Por este motivo, el agua utilizada es separada de la fracción menor a 150 μm por filtración y recirculada al proceso de tamizado.

La fracción mayor a 150 μm fue sometida a fusión con cloruro de potasio a 900 °C para evitar la oxidación de cinc; mientras que la fracción menor a 150 μm fue fundida con bórax y carbonato de sodio. Las fracciones fundidas fueron sometidas a un análisis de espectrometría de chispa, los cuales presentaron concentraciones de Cu 65 %, de Zn 31 % y de Fe 0,5 % para las fracciones mayores a 150 μm ; y 90 % de Cu, 6 % de Zn y 3 % de Pb para la fracción menor a 150 μm .

La escoria proveniente de la fundición de la fracción menor a 150 μm fue estabilizada en bloques de cemento y arena, con el 20 % de escoria para su posterior confinamiento. Finalmente, se realizó el diseño del proceso de tratamiento junto con su evaluación económica. La inversión realizada para la planta de tratamiento es de 134 713,20 USD; del cual si se presta este servicio a otras empresas presenta una tasa interna de retorno del 64,15 % y un valor actual neto de 293 971,35 USD y recuperaría la inversión realizada en un año aproximadamente.

INTRODUCCIÓN

En Ecuador no se presentan registros de la generación de residuos metálicos a nivel industrial, sin embargo a partir del año 2003 se estableció y se adoptó el Texto Unificado de Legislación Ambiental (TULAS) cuyo objetivo es la prevención y control de la contaminación ambiental en todo el territorio nacional. El TULAS se refiere principalmente a la gestión integral de los residuos sólidos y un enfoque especial en su disposición final.

Por otro lado, la generación de residuos es inevitable en los procesos de fundición metálica y estos residuos no pueden disponerse directamente en rellenos sanitarios debido a la presencia de metales como Pb, Cu, Zn, entre otros. Generalmente estos materiales se acumulan en los alrededores de las plantas generadoras, pero tampoco pueden mantenerse allí indefinidamente debido a los costos involucrados en el mantenimiento del depósito, el transporte y el posterior tratamiento que deben seguir que a largo plazo resultan antieconómicos para la industria metálica (Valero y Ortiz, 2000, p. 425).

Otra de las alternativas existentes en la actualidad para la disposición final de este tipo de residuos es el uso de celdas de seguridad, es decir el confinamiento de estos materiales en ambientes de hormigón armado, sin embargo esta opción es difícil de aplicar, por el costo que una construcción de este tipo involucra para una sola empresa, sobre todo considerando los grandes volúmenes de material a confinar.

A manera de ejemplo se puede citar que una sola empresa ecuatoriana que produce artículos de grifería a gran escala, genera alrededor de 16 toneladas mensuales de residuos que contienen metales pesados como Pb, Cu, Zn, Fe en elevadas concentraciones y que deben ser estabilizados antes de ser desechados para que no produzcan ningún peligro de contaminación al ambiente circundante.

La determinación del riesgo de contaminación que puede generar un residuo al ser desechado directamente al ambiente se mide a través de ensayos de

toxicidad (Test TCLP, Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, EPA, método 1311) donde se establece si el extracto lixiviado (por 21 h a pH 4,5 controlado con ácido acético) presenta concentraciones de metales superiores a los límites establecidos para su descarga en la normativa ambiental vigente.

En el presente trabajo se busca diseñar una planta para el tratamiento de residuos generados en la fundición de latón provenientes de la elaboración de piezas de grifería. Estos residuos presentan concentraciones de Cu 65 %, Zn de 31 %, y Pb de 1,7 %, que constituyen un riesgo potencial al ambiente si son desechados sin tratamientos previos específicos. Se proponen alternativas para la valorización y posterior disposición final de residuos ya estabilizados y se determina la factibilidad técnica y económica de la aplicación del proyecto a una empresa productiva.

El residuo generado en la fundición de latón, usado en este estudio, presenta un amplio rango de granulometría, por lo que el trabajo inicia con la clasificación por tamaño (tamizado) del material, para determinar si existen fracciones que pueden recuperarse y purificarse para obtener nuevos productos metálicos de valor comercial factibles de reciclar. Las fracciones que no puedan recuperarse se llevan a estabilización previa a su disposición final.

El tamizado se realiza en seco y en húmedo. Cuando se usa el proceso en húmedo, el agua empleada es recirculada, por lo que previamente se trata por procesos de sedimentación y/o filtración. El contenido de metales pesados en el agua de recirculación es analizado constantemente, puesto que de igual manera debe cumplir con las legislaciones ambientales establecidas (TULAS) antes de ser descartado a un cuerpo de agua.

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1. RESIDUOS DE FUNDICIÓN Y SUS IMPLICACIONES AMBIENTALES

A nivel mundial, la protección al ambiente ha representado uno de los mayores retos que existen en el presente. En los procesos pirometalúrgicos de la industria metalúrgica, las fundiciones se utilizan ya sea para la recuperación de metales como para la elaboración de piezas metálicas. Sin embargo, en cada uno de los procesos utilizados, se generan residuos tales como la formación de escoria, los cuales necesitan un tratamiento y que no represente un peligro (Lovera, Arias, Coronado, 2004, p. 26).

La generación de residuos provenientes de la fundición, se producen en diversas etapas de los procesos y se relacionan directamente con el tipo de materia prima que utiliza (metales ferrosos o no ferrosos). La mayoría de éstos se depositan en los basureros o rellenos sanitarios y unos pocos son reciclados o retornan al proceso de fusión.

Un ejemplo citado en el XXV Congreso Del Instituto Argentino de Profesores Universitarios de Costos, en su tema “Los Residuos Industriales y el Medio Ambiente”, anteriormente no se medían las incidencias e impactos de los residuos, además de no tener conciencia sobre la importancia de preservación del medio ambiente, ni legislación al respecto. (Calle, 2002, p. 4)

El crecimiento constante de las industrias de fundición conllevaba a la necesidad de deshacerse de sus residuos, debido a que los espacios físicos internos, dentro de los cuales disponían, no se adecuaban para el depósito de dichos residuos; siendo un resultado antieconómico su mantenimiento y tratamiento.

Debido a este motivo, se buscó un fin productivo, mientras que el resto del que no se obtenía ningún uso, tenían como disposición final los basureros.

Según el Departamento de Tecnología Química y Medio ambiente de la fundación INASMET de España; las industrias metálicas generan alrededor del 10,2 % de residuos metálicos peligrosos como indica la Figura 1.1 (Valero y Ortiz, 2000, p. 425).

De acuerdo con el Programa de Saneamiento de Montevideo y Área Metropolitana en Uruguay, basándose en Gerdau Laisa (una de las mayores empresas de la industria de fundiciones ferrosas), tiene una generación aproximada de residuos metálicos de 450 ton / año, mientras que en las industrias de fundición no ferrosas, se generaron alrededor de 648 ton/año en total; en el que en ningún caso su disposición final fue la reducción, reutilización, reciclaje y la valorización energética; sino que fueron destinados hacia el almacenamiento y los sitios de disposición final (SDF) (Oficina de Planeamiento y Presupuesto de la República Oriental del Uruguay, 2004, p. 21).

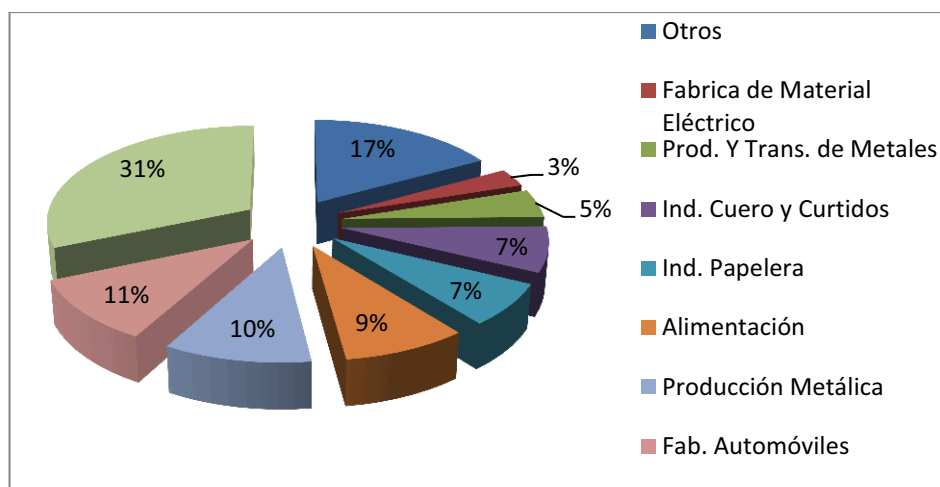


Figura 1.1. Producción de residuos peligrosos en España por sectores industriales (%).
(Valero y Ortiz, 2000)

Este hecho ocasionó problemas hacia los recursos naturales y la humanidad, motivo por el cual, se crearon legislaciones con el fin de preservar el medio ambiente. En Ecuador no se tienen registros de la generación de residuos a nivel de industrias de fundiciones metálicas. Sin embargo a manera de referencia, una de las empresas ecuatorianas de fundición de latón para la elaboración de grifería genera alrededor de 16 ton/mes de residuos que provienen directamente del

proceso de fundición de latón antes de ser colocado en los moldes. Estos residuos son escorias que se producen por la aireación que entra a los hornos y a los cuales se adicionan óxidos para disminuir el punto de fusión de latón.

A partir del año 2003 se adoptó el Texto Unificado de Legislación Ambiental (TULAS) cuyo objetivo es la prevención y control de la contaminación ambiental en todo el territorio nacional. Según el Título 2 de las Políticas Nacionales de Residuos Sólidos, en el art. 31 sobre el Ámbito de la Salud y el ambiente del TULAS; la prevención y la minimización de los impactos reside en la gestión integral de residuos sólidos, con un énfasis en la adecuada disposición final.

De igual manera en el art. 182 de la Sección 5a (de la Disposición Final) del Capítulo II (Autoridades Competentes), el método permitido de la disposición final son: “relleno, confinamiento controlado, inyección controlada, pozos profundos o incineración de acuerdo al tipo de desecho peligroso. El Ministerio del Ambiente puede autorizar otro método si lo considera pertinente”. (Ministerio del Ambiente de la República del Ecuador, 2003)

En el área de América Latina, países como México, Chile, Argentina y Colombia, se trabaja con el procesamiento y reutilización de las escorias o residuos, los cuales de acuerdo a las investigaciones realizadas en el Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología, se ha demostrado que pueden ser sustitutos de materia prima en la industria de materiales de construcción.

Sin embargo, antes de ser empleadas para el reciclaje, se debe garantizar a través de un análisis que el residuo no posea porcentajes inadmisibles de contaminantes (Queipo et al., 2011, p. 76).

1.1.1. PRINCIPALES ETAPAS EN LOS PROCESOS DE FUNDICIÓN

La fundición de metales y elaboración de piezas metálicas se lo define como el proceso en el que la materia prima es llevada desde un estado sólido a un estado

líquido y es vertido en moldes de dimensiones y características definidas (Fay, 2008, p. 11).

En ocasiones, se añade aleaciones las cuales cambian la composición química del metal, proporcionándole nuevas propiedades mecánicas al producto. Durante los procesos de fundición a nivel general se realizan las siguientes etapas:

1.1.1.1. Fabricación de moldes

En todo proceso de fundición y elaboración de piezas metálicas se necesitan moldes las cuales tienen la forma del producto a terminarse. Existen moldes de tipos recuperables y no recuperables. (International Finance Corporation – World Bank Group, 2007, p. 19)

Los tipos de moldes no recuperables son utilizados generalmente en las fundiciones de metales ferrosos (moldes de arena), los cuales se destruyen en la fase de desmoldeo (Pancorbo, 2009, p. 7).

Los moldes recuperables, son utilizados principalmente para metales no ferrosos, los cuales utilizan moldes permanentes que vuelven a utilizarse (moldes metálicos) (Comisión Nacional de Medio Ambiente - Región Metropolitana, 1998; Pancorbo, 2009, p. 8).

1.1.1.2. Fusión y llenado de moldes (Vaciado)

La fundición implica la fusión del metal junto con sus componentes adicionales, los cuales son vertidos en los moldes. El llenado de los moldes se realiza por gravedad o por inyección a bajas o altas presiones. En metales no ferrosos, las fundiciones se realizan a temperaturas de entre 500 - 1000 °C; mientras que en la fundición de los metales ferrosos, la temperatura de fusión se eleva hasta una

temperatura de 1600 °C (Comisión Ambiental Metropolitana y Sociedad Alemana de Cooperación Técnica, 1996, p. 13).

Actualmente, en fundiciones no ferrosas se utilizan principalmente hornos de crisol, reverbero, o resistencia e inducción eléctrica.

1.1.1.3. Proceso de limpieza y terminación (Desmoldeo)

Posterior al llenado en los moldes, se realiza el desmoldeo y enfriamiento controlado de la pieza. Los moldes de cera y los moldes de cáscara cerámica (que son moldes no recuperables) se destruyen durante el retiro de las piezas, lo cual genera residuos sólidos. En el caso de moldes permanentes, el molde se abre y la pieza se extrae sin destruir el molde después de la solidificación (International Finance Corporation – World Bank Group, 2007, p. 21).

El método más utilizado para limpieza de la pieza final es el granallado, que consiste en el lanzamiento de partículas abrasivas (acero) sobre la pieza fundida para retirar las impurezas presentes en la superficie. El esquema final del proceso de fundición de metales se lo puede observar en la Figura 1.2, el cual trata sobre el ciclo de la fundición de metales y el tratamiento de la arena del molde para la fusión. (Comisión Nacional de Medio Ambiente - Región Metropolitana, 1998, p.8).

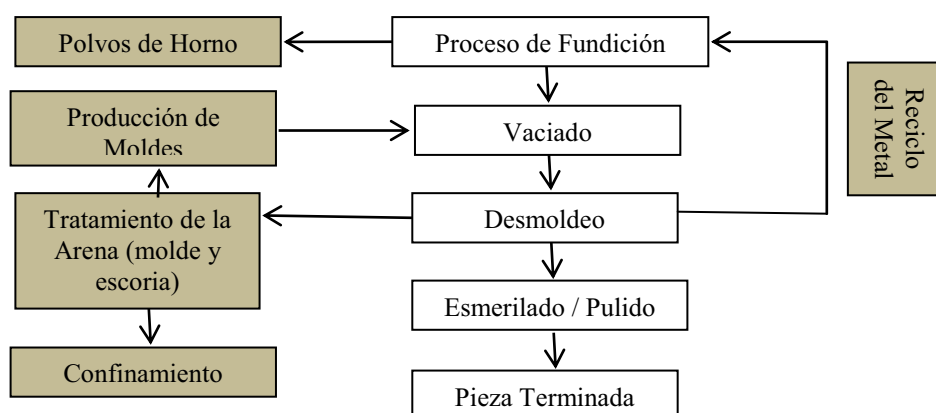


Figura 1.2. Esquema del proceso de fundición de metales y ciclo de tratamiento de la arena del molde. (International Finance Corporation – World Bank Group, 2007)

1.1.2. GENERACIÓN Y TIPOS DE RESIDUOS EN LAS INDUSTRIAS FUNDIDORAS DE METALES

Las industrias fundidoras de metales se dividen de acuerdo a la materia prima que utilizan. De esta manera se tiene industrias fundidoras de metales ferrosos y no ferrosos. La empresa de la cual se citó el ejemplo de generación de residuos de la fundición de latón, es una industria que tiene como materia prima metal no ferroso y se dedicada a la elaboración de grifería.

1.1.2.1. Fundición de metales no ferrosos

La fundición de metales no ferrosos comprende a todos los metales a excepción del hierro, refiriéndose a aleaciones del material principal a fundir (bronce, cobre, aluminio, cinc, plomo, estaño, níquel). Entre las aleaciones más frecuentes están: aleación cobre – cinc (latón), aleación cobre – estaño (bronce), aleación aluminio – cobre, aleación aluminio – silicio (Martínez, 2005, p. 75; Groover, 1997, p. 114).

Los metales no ferrosos tienen propiedades características como: bajo peso específico, resistencia a la oxidación en condiciones ambientales normales y fácil manipulación y ligereza.

Posterior al fundido de los metales y los diferentes elemento de aleación en los hornos de calentamiento; se realiza el vaciado del metal fundido, lo cual genera escorias debido al enfriamiento del material dentro del horno.

En la etapa de moldeo se generan remanentes de material como aglutinantes. En el desmoldeo se generan arenas gastadas o quemadas que están sometidas a diferentes temperaturas. (Martínez, 2005, p. 78)

La disposición de los residuos que se generan tanto en el moldeo como en el desmoldeo se realiza cuando las arenas no son sometidas a rellenos sanitarios o

basureros. Estas escorias y arenas, son incorporadas como material de construcción de pavimentos en carreteras.

Los residuos generados durante el proceso de fundición se presentan en la Tabla 1.1, los cuales deben ser analizados para ser catalogados o no como residuos peligrosos.

Tabla 1.1. Residuo generado en el proceso de fundición de metales no ferrosos

TIPO DE RESIDUO	SECTOR
Arena	Arenas de moldeo, desmoldeo (fabricados a base de aglutinante como bentonita, silicatos y resinas orgánicas).
Escorias	Escorias de aluminio, cobre, plomo, estaño, cinc, bronce, latón zamak.
Residuo de maquinado	Restos de esmerilado y pulido en el acabado
Residuo de metales	Metales, chatarras y aleaciones en ducto de inyección.

(Comisión Ambiental Metropolitana y Sociedad Alemana de Cooperación Técnica, 1996)

1.1.3. DETERMINACIÓN DE LA PELIGROSIDAD DE UN RESIDUO

La consideración de un residuo como peligroso se puede realizar por medio del test TCLP y la determinación de peligrosidad del mismo por medio de análisis CRETIB.

El análisis CRETIB define una caracterización de los residuos y resulta de una conjunción de cada una de las iniciales pertenecientes a las seis características que tienen las sustancias o materiales. Es una Norma Oficial Mexicana NOM–CRP–001–ECOL realizada en 1993. (Secretaría de Desarrollo Nacional, 1993) CRETIB viene representado por las siguientes características: “C” corresponde a la corrosividad, “R” representa la reactividad, “E” la explosividad, “T” la toxicidad, “I” a la inflamabilidad y “B” a biológico infeccioso. Para que un residuo se lo considere como peligroso basta con que supere una de las características de peligrosidad.

1.1.3.1. TCLP

El test TCLP, llamado así por sus iniciales de Test Characteristic Leaching Toxicity, es una prueba de lixiviación desarrollado por la Environmental Protection Agency (EPA) de los Estados Unidos y diseñada para la determinación de la movilidad de los compuestos orgánicos e inorgánicos presentes en los residuos sólidos y multifase, al igual que la determinación de la eficiencia de la estabilización.

Esta técnica es efectiva para el análisis de metales tales como plomo, cadmio, cobre, cinc, cromo, hierro; los cuales son considerados peligrosos. Dichos metales son analizados por medio de absorción atómica. (EPA, 2003)

Por medio del test TCLP y las lecturas por absorción atómica, se determina la concentración de los elementos y se realiza una comparación con la normativa vigente en cada región.

En Ecuador se aplica la normativa de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos el cual indica el parámetro de los metales considerados como los más peligrosos y sus valores límites presentes en un residuo, como se indica en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2. Límite máximo de la concentración de metales en sólidos para no ser considerado peligroso.

Parámetro	Expresado como	Límite máximo permisible (mg/L)
Arsénico	As	5,0
Bario	Ba	100,0
Cadmio	Cd	1,0
Cobre	Cu	5,0
Cromo	Cr	5,0
Mercurio	Hg	0,2
Plata	Ag	5,0
Plomo	Pb	5,0

Para líquidos, se aplica la normativa del Ministerio del Ambiente de la Presidencia de la República del Ecuador que es el Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria (TULAS) que establece los criterios de calidad ambiental y de descarga de efluentes ya sea al alcantarillado público o a un cuerpo de agua dulce.

Tabla 1.3. Límites de descarga al sistema de alcantarillado público.

Parámetro	Expresado como	Límite máximo permisible (mg/L)
Aluminio	Al	5,0
Arsénico	As	0,1
Bario	Ba	5,0
Cadmio	Cd	0,02
Cinc	Zn	10,0
Cobre	Cu	1,0
Cromo	Cr	0,5
Estaño	Sn	5,0
Hierro	Fe	25,0
Mercurio	Hg	0,01
Níquel	Ni	2,0
Plata	Ag	0,5
Plomo	Pb	0,5
Selenio	Se	0,5

Prueba estándar TCLP

El ensayo de lixiviación simula la acción de las peores condiciones ambientales a las cuales se encuentra expuesto un residuo, por lo que se generan lixiviados o metales que se solubilizan en un efluente en un relleno sanitario.

Este método consiste en la trituración del residuo o material hasta obtener un tamaño de partícula inferior a 9,5 mm.

Dicho material se mezcla con el efluente (agua potable) con una relación sólido – líquido de 1:20 y regulado el pH a 4,5 con ácido acético. Se mantiene una agitación continua a 30 rpm durante 18 – 24 horas.

Pasado el tiempo indicado, se filtra la solución; se toma una muestra del extracto lixiviado para analizar en busca de metales constituyentes peligrosos (metales pesados) y se realiza una comparación con la norma vigente para identificar si los mismos o uno de ellos superan los valores máximos permisibles (LaGrega, Buckingham, Evans, 1996, p. 743).

1.1.4. ANÁLISIS DE DECISIONES SOBRE LA VIABILIDAD DEL TRATAMIENTO DE UN RESIDUO

Entre los principales factores que se deben tomar en cuenta sobre la estabilización o solidificación (E/S) más adecuada que se pueda realizar a un residuo se encuentra:

- La procedencia del residuo
- Peligrosidad
- Propiedades físicas y químicas

Existen casos en que los residuos se pueden tratar fácilmente (polímeros), sin embargo, también existen ocasiones en que los residuos pueden ocasionar un riesgo para la salud o el medio ambiente (metales, sales, compuestos orgánicos).

De esta forma, es recomendable realizar un estudio de las posibilidades de tratamiento y siguiendo un estudio de su factibilidad como se muestra en la Figura 1.3.

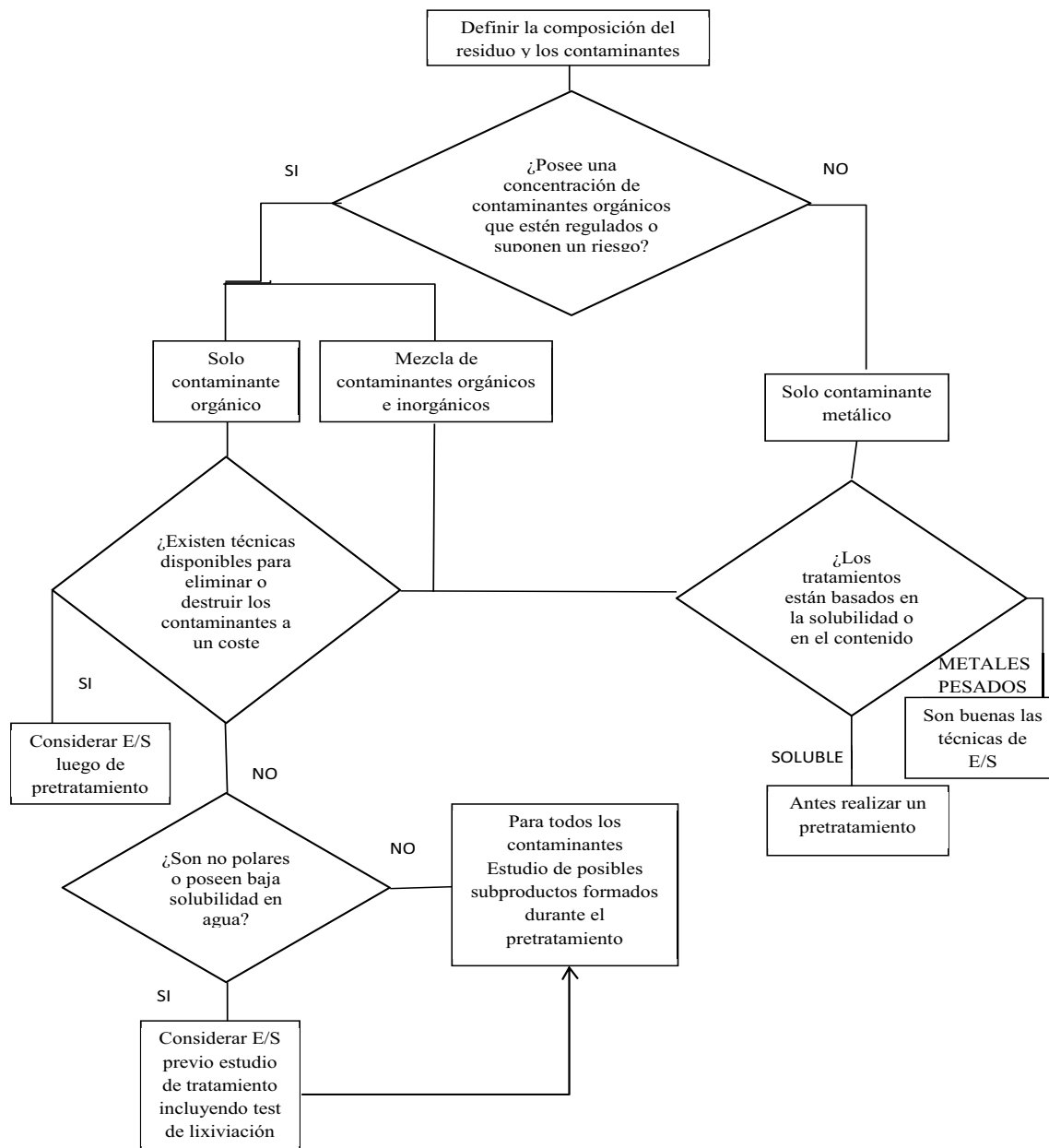


Figura 1.3. Árbol de decisiones sobre el estudio de viabilidad de tratamiento del residuo mediante E/S.

El manejo de los residuos metálicos industriales que resultan inevitables después de aplicar la estrategia explicada en la Figura 1.3, son recolectados, almacenados y transportados hacia lugares donde se realiza la disposición final del residuo como se muestra en la Figura 1.4.

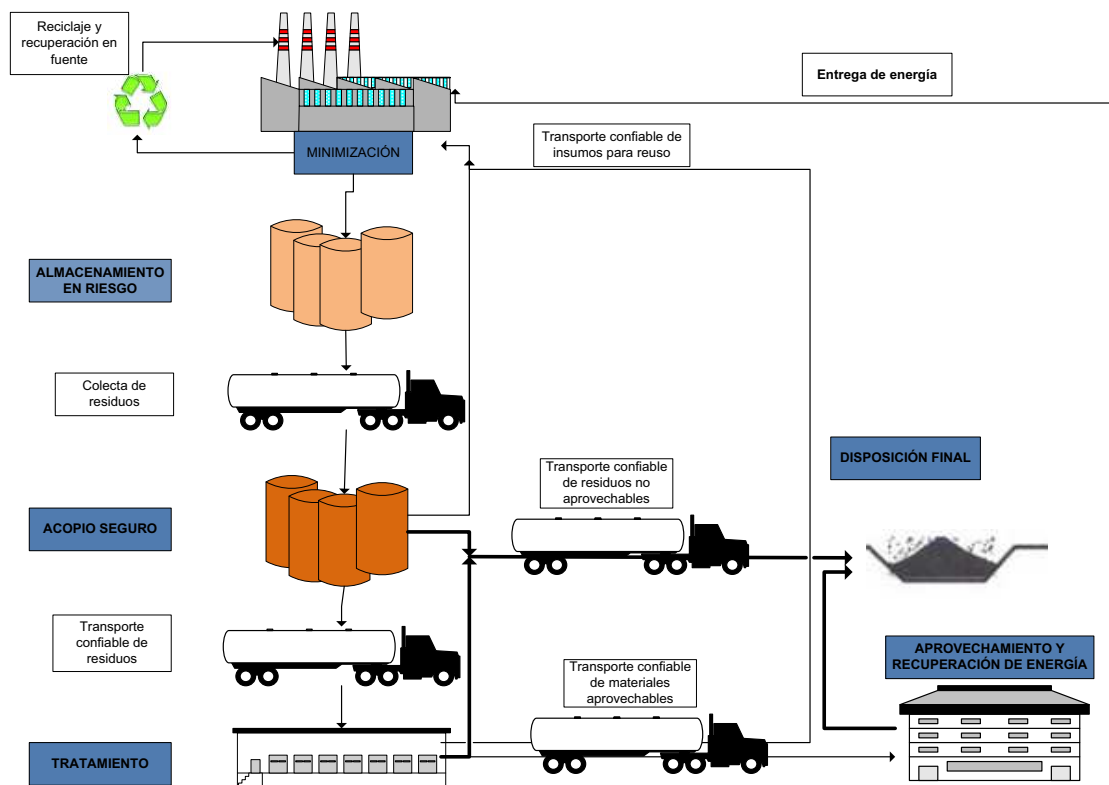


Figura 1.4. Interacciones entre las diferentes fases de manejo de los residuos industriales para promover su valorización integral. (Groover, 1997)

1.2. TAMIZADO, FILTRACIÓN Y SEDIMENTACIÓN DE RESIDUOS METÁLICOS INDUSTRIALES

A nivel industrial respecto a fundiciones metálicas suele ser necesaria la separación de ciertas fracciones las cuales son consideradas como residuos y tratar de recuperar aquellas que se pueden reutilizar; esto es, la aplicación de métodos de separación por su tamaño de partícula o basados en sus propiedades físicas para realizar una recuperación (Capó, 2007, p. 181).

De esta forma se pueden obtener una clasificación y separación que conlleva a tres tipos de productos (Pardavé, 2006, p. 43).

- Productos finales o concentrados secundarios, es decir, al menos un solo metal o al menos de manera predominante.

- Producto intermedio o “mixtos”, formados por dos o más metales que pueden requerir una separación posterior o una fundición.
- Productos residuales o finales que por su contenido metálico pueden ser considerados como no recuperables o no reciclables.

Así por ejemplo, cuando productos o materias primas que pueden purificarse por medio de eliminación de impurezas o material que se considera no recuperable, que lo contaminan o impiden la reutilización (recirculación al proceso de fundición).

Propiedad	Tamaño de las partículas (mm)					
	Física	0,001	0,01	0,1	1	10
Color y aspecto						Estrío
Sólo tamaño		Tamizado				
		Ciclones líquidos				
		Separación hidráulica - clasificadores				
		Centrífugas				
Sólo densidad			Medios densos con ciclones, conos y tanques			
Tamaño y densidad				Criba hidráulica		
			Mesa húmeda - espiral			
			Minerales – mesa seca			

Figura 1.5. Tamaños de partículas en los que se emplean los diferentes métodos de separación de sólidos. (Pardavé, 2006)

En la Figura 1.5 se señala los intervalos de tamaños de partículas en los que se pueden utilizar las diversas operaciones de concentración o tratamiento.

Los métodos de separación mecánica son técnicas que se basan en las diferencias físicas entre las partículas y son aplicables para separar líquidos de líquidos, sólidos de sólidos, y sólidos de líquidos. Dentro de los métodos de separación mecánicas más utilizadas se encuentran: tamizado o cribado, filtración

y el proceso de sedimentación por gravedad (Galicia, Zaldívar, Hernández, 2009, p. 7).

1.2.1. PROCESO DE TAMIZADO

El tamizado es una de las operaciones básicas más simples y comunes cuyo objetivo es la separación del residuo metálico o material en general que contiene una mezcla de partículas de diferentes tamaños. Es un método en el cual una masa de material pulverulenta o granulada es colocada en la parte superior de un tamiz y que por acción de la agitación permite la separación del material en función de la abertura del tamiz. Por ejemplo, un tamiz de malla 10, tiene 10 orificios en una pulgada y su abertura tendrá una longitud de 0,1 pulgadas menos el espesor del hilo (Advantech, 2001, pp. 1, 9).

Su diseño y utilización permite realizar el análisis granulométrico a nivel de laboratorio sobre los materiales provenientes del molino o residuos procedentes de fabricaciones de piezas metálicas.

El tamizado consiste en pasar el residuo metálico industrial por una serie de tamices que poseen orificios o mallas construidas en diferente forma como se muestra en la Figura 1.6 (construida con hilos metálicos o tejidos de alambre) y que van decreciendo de forma progresiva. Se realiza el tamizado manualmente o de forma mecánica durante una período de 15 – 20 minutos. Finalmente se pesa la fracción retenida en cada malla (Universidad de Oviedo, 2008, p. 21).

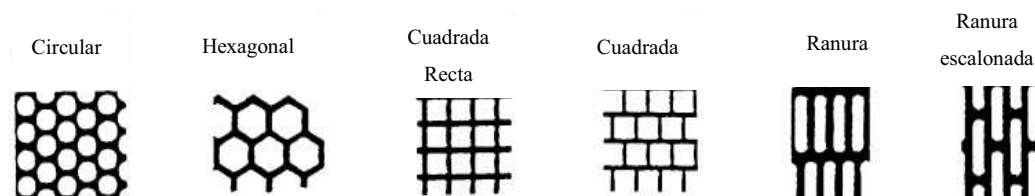


Figura 1.6. Aberturas de tamices o cribas de diferentes dimensiones y formas.
(Universidad de Oviedo, 2008)

La normalización y estandarización de los tamices fueron adaptadas internacionalmente, dentro de los cuales la estandarización Tyler y US (ASTM E11-70) son los que comúnmente se utilizan. La tabla 1.4 presenta los tamices estandarizados de diversas dimensiones y que son comúnmente utilizados (Galicia et al., 2009, p. 8).

Tabla 1.4. Aberturas y número de malla ASTM.

ASTM																
No. De malla	400	325	270	230	200	170	140	120	100	80	70	50	35	25	20	8
Abertura (μm)	38	45	53	63	75	90	106	125	150	180	212	300	500	710	850	2360

La clasificación se realiza mediante la confrontación del tamaño de la partícula con el de la abertura de la criba o tamiz como se presenta en la Figura 1.7.

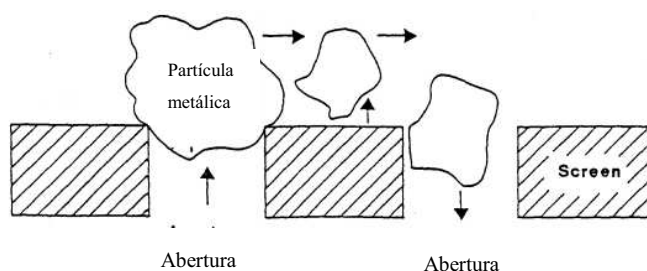


Figura 1.7. Movimiento de las partículas sobre la superficie del tamiz o de la criba

1.2.1.1. Tamizado en el sector industrial

A nivel industrial se dispone de dos tipos de separación por tamizado: las cribas o harneros y los clasificadores. El tipo de clasificación se realiza de acuerdo al tipo de material a separar por tamaño y las propiedades del mismo.

El clasificador es una técnica que aprovecha del principio de que las partículas de la misma densidad pero de diferentes tamaños se asientan en un fluido a velocidades diferentes por decantación (Pardavé, 2006, p. 33).

El proceso de cribado es uno de los más utilizados para separaciones de sólidos metálicos ya que consta de una superficie dura perforada con un determinado número de aberturas de dimensiones y forma fija, de modo que el material más fino cae a través de las aberturas y los que tienen mayor tamaño son transportados al extremo de descarga. Entre los tipos de cribas se tiene:

Criba fija. La criba fija es utilizada frecuentemente en circuito de trituración. Como se puede observar en la Figura 1.8, consta de barras fijas de forma paralela e inclinada de forma que el material con mayor tamaño salga por el lado de descarga y sea retornado al proceso de trituración.

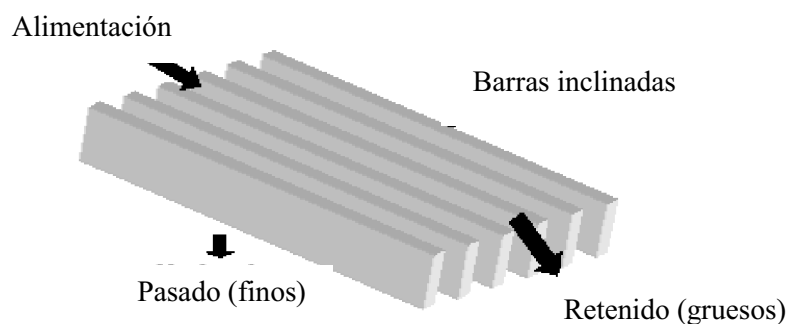


Figura 1.8. Criba Fija

Criba giratoria (Trommel). Su superficie de cribado es de forma cilíndrica e inclinada capaz de trabajar en seco o en húmedo como se indica en la Figura 1.9. El material es alimentado por uno de los extremos de clasificador giratorio y el underzise cae a través del tamiz mientras que el overzise es llevado hacia el otro extremo a través de la inclinación del trommel.

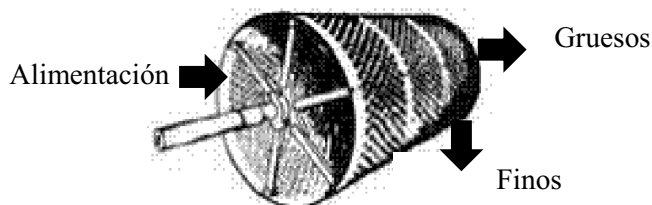


Figura 1.9. Criba Giratoria

Criba vibratoria. Este tipo de criba es una de las más utilizadas durante los procesos de clasificación por tamaño puesto que combina las características de las cribas vibratorias y rotativas, los cuales puede trabajar en seco o en húmedo como se menciona en el Anexo XVI (Figura 1.10).

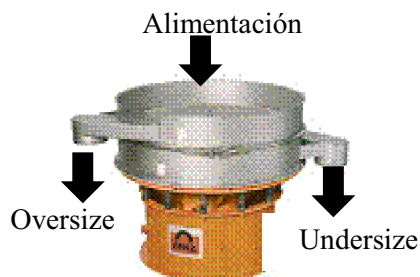


Figura 1.10. Criba vibratoria

Las partículas sólidas son generalmente tamizadas debido al tamaño de material que ingresa. Esta aplicación es utilizada en la industria minera, agricultura, construcción, fundiciones, residuos de la elaboración de piezas metálicas. La función principal en el sector metálico industrial es limpiar o remover los finos o contaminantes que se adhieren al metal que se utiliza como materia prima en los procesos originales de elaboración de piezas metálicas. (Endecotts, 2009, p. 20)

El proceso de tamizado a nivel de laboratorio corresponde a una operación diferente a escala industrial. En laboratorio se trabaja como un proceso batch, es decir, el tamizado se continúa hasta que llegue a un punto final en que exista una separación de tamaño en su totalidad. Sin embargo, a nivel industrial el tamizado se realiza de manera continua. El flujo de alimentación del material ingresa de forma constante de tal manera que se produce la clasificación de un tiempo corto y una separación imperfecta.

1.2.1.2. Tamizado por vía húmeda

Algunas de partículas finas no pueden ser separadas por medio de tamizado en seco puesto que ciertas partículas pueden “taponar” las aberturas de la malla del

tamiz. Si los finos no pueden ser separados de un material de interés de una forma eficiente durante el proceso de tamizado normal, es necesaria la utilización del proceso de tamizado por vía húmeda para producir la efectiva separación del material contaminante.

La clasificación por vía húmeda implica la formación de remolino por acción de la agitación; de esta forma el agua facilita una separación mecánica de los finos a las partículas más grandes. (Endecotts, 2009, p. 21)

Para el proceso de tamizado en húmedo se coloca el material con agua en un recipiente a fin de lavar las partículas gruesas de los finos antes de pasar al tamiz. El flujo de alimentación pasa a través del tamiz por lo que las partículas gruesas (oversize) quedan sobre el tamiz mientras que las partículas finas (undersize) pasan por la abertura como se muestra en la Figura 1.11.

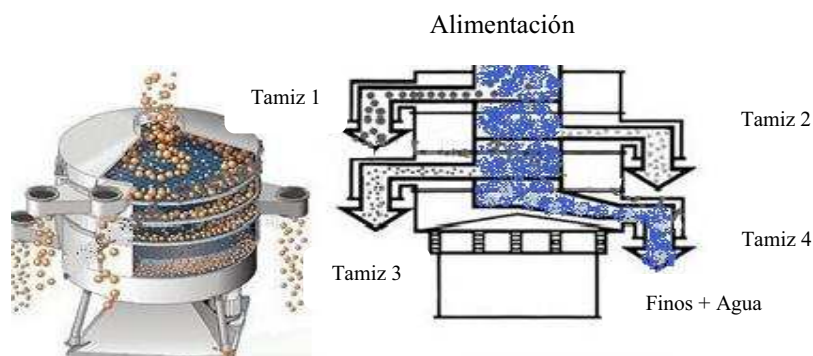


Figura 1.11. Tamizado por vía Húmeda

Después de permitir que las partículas finas se acentúen en el recipiente, el agua es separada por medio de decantación, mientras que las partículas gruesas que contienen cantidades de agua retenidas, son llevadas a un proceso de secado.

1.2.2. FILTRACIÓN EN RESIDUOS METÁLICOS INDUSTRIALES

La filtración es un proceso provocado por diferencia de presión, en el cual se realiza la separación de las partículas sólidas de un fluido al pasarlo a través de

un medio filtrante, sobre el cual se sedimenta el sólido. Esta operación es utilizada para la separación del sólido presente en la suspensión como para disminuir la turbidez del fluido. Frecuentemente es utilizada en la industria química, alimenticia, farmacéutica, minería, tratamiento de agua y tratamiento de agua residual (Galicia et al., 2009, p. 24; Sulpizio, 2009, p. 2).

Generalmente, el proceso típico para el tratamiento de agua, con o sin pretratamiento de coagulación y sedimentación; que contiene bajas concentraciones de residuos metálicos (polvo metálico) o partículas sólidas, se presenta en la Figura 1.12, puesto que el proceso de filtrado puede retener sólidos a partir de 5 μm hasta 200 μm .

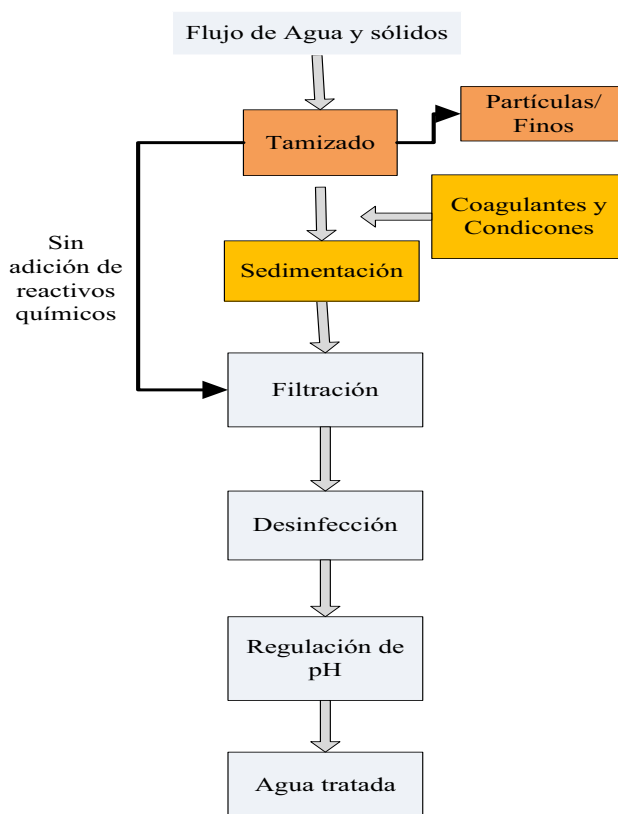


Figura 1.12. Proceso de tratamiento de agua

El tratamiento de residuos que contienen agua es un proceso en el cual la pulpa pasa (agua y residuos sólidos) a través del filtro de modo que separa el efluente y retiene las partículas (arcillas), impurezas o flóculos en los procesos de sedimentación como se aprecia en la Figura 1.13 (EPA, 1995, pp. 9, 10).

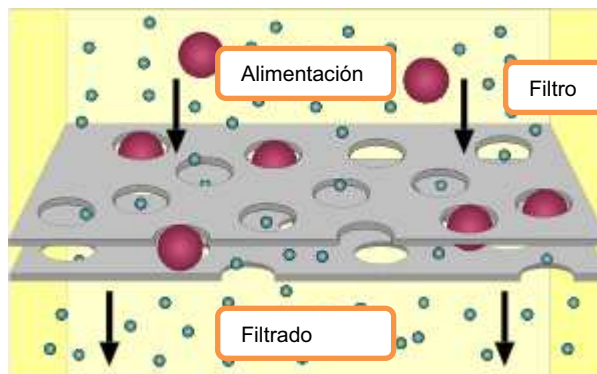


Figura 1.13. Proceso de filtración.

Entre de las principales variables que afectan proceso de filtración de residuos sólidos se encuentran la concentración de sólidos, tamaño de partícula, pH, viscosidad y densidad.

El flujo que sigue el agua durante su tratamiento es la ley de Darcy y es laminar para el lecho filtrante, el cual continúa hasta que este se obstruye debido a la acumulación de sólidos. Esta acumulación de sólidos disminuye las cavidades o poros del material de filtración y la velocidad de flujo aumenta a través de las mismas.

La ley de Darcy explica la pérdida de carga dentro del filtro a través de los materiales sólidos, el cual es proporcional a la velocidad de flujo superficial:

$$\vartheta = K_p * S_l \quad [1. 1]$$

De donde:

ϑ = velocidad de flujo superficial o velocidad de filtración, m/s.

K_p = coeficiente de permeabilidad, m/s.

S_l = gradiente hidráulico, h_f/L .

h_f = pérdida de carga, que es la pérdida de presión por metro del fluido.

L = Longitud del filtro, m.

Dicho de otra manera, cuando se requiere una velocidad de filtración constante, se necesita una mayor energía para que pase el agua a través del filtro y vencer la pérdida de carga. Sin embargo, a medida que aumenta la torta de filtración (sólidos acumulados en el filtro) puede llegar a ser impenetrable la salida de agua del filtro (Weber, 2003, p. 148).

Según Vollrath Hopp, la velocidad de filtración (v_F) también se puede expresar en metros cúbicos (m^3) de filtrado (V) por metro cuadrado de superficie filtrante (m^2) y el tiempo expresado en horas (h).

$$v_F = \frac{V}{A*t} \left[\frac{m^3}{m^2*h} \right] \quad [1.2]$$

Sin embargo la velocidad de filtración se puede aumentar mediante elevación de la temperatura (dependiendo del material sólido), aumento de la presión, adición de auxiliares para filtrar (floculantes) y disminución de la torta de filtración.

El tipo de filtro comúnmente utilizado para la separación de sólidos sedimentados es el filtro a presión que se presenta en la Figura 1.14. Este filtro es uno de los más versátiles y de bajo costo de mantenimiento por su resistencia a la corrosión. La fuerza impulsora es la presión dada por la fuerza motriz y se emplean en ciertos casos en los cuales la resistencia de la torta es elevada y obliga a desmonte frecuente de la prensa y un desgaste excesivo de las telas filtrantes. No está recomendado su uso para tratar grandes cantidades ya que es un filtro intermitente (Gaitán, 2008, pp. 37,38; Galicia et al., 2009, p. 25).

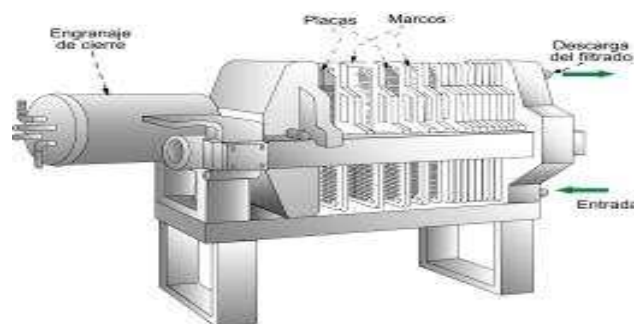


Figura 1.14. Filtro prensa de placa y marcos. (Gaitán, 2008)

Las variables a tomar en cuenta durante su diseño son el área de filtración, la caída de presión a través del filtro, resistencia del medio filtrante, flujo de filtrado, cantidad de sólidos retenidos y humedad de la torta.

Sin embargo para facilitar el dimensionamiento de un filtro, es necesario conocer la información de las corrientes de entrada y salida de un proceso. Basándose en el tipo de filtro a utilizar, se eligen el tamaño del equipo para la operación (Pall Corporation, 2007, p. 5).

Debido a la complejidad de dimensionamiento de un filtro, la compañía Siemens estableció la siguiente ecuación para la determinación del volumen de un filtro:

$$\text{Volumen de filtro prensa} \quad (ft^3 \text{ o } L) = \frac{\text{Volumen de alimentación} \cdot \% \text{ sólidos en la entrada} \cdot \text{densidad del agua} \cdot \text{peso específico del fango o lodo}}{\text{densidad de la torta del filtro húmeda} \cdot \% \text{ sólidos seco en la torta del filtro}} \quad [1.3]$$

$\left(\frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \text{ o } \frac{\text{Kg}}{\text{L}} \right)$

De donde el porcentaje de sólidos se expresó en forma decimal (por ejemplo: 30 % = 0,3) y la densidad del agua se reportó de acuerdo a las unidades utilizadas, el lb/gal o en Kg/L.

1.2.3. PROCESO DE SEDIMENTACIÓN

La sedimentación es una operación unitaria de separación sólido – líquido (pulpa) en que las partículas se separan de un efluente por diferencia de densidades entre dos fases presentes. Es comúnmente usada en el tratamiento de aguas residuales como de agua potable (Villacreses y Vega, 2006, p. 43).

El objetivo de una sedimentación es el asentamiento e incremento de la concentración de sólidos suspendidos en una corriente de alimentación y la clarificación del efluente. Los diseños de sedimentadores se obtienen de ensayos realizados en columnas de sedimentación que varían sus dimensiones, de

acuerdo a los análisis en tipo Batch o continuo, flujo de sólidos y concentración de estos.

En función de la concentración y la interacción de las partículas, se producen cuatro zonas de sedimentación: discreta, floculenta, retardada (o zonal) y compresión como se indica en la Figura 1.15.

La zona de compresión es la que más toma interés ya que las partículas se concentran de tal manera que forman una estructura como consecuencia a la compresión y que se produce por el peso de las partículas que se añaden a la estructura por sedimentación desde el líquido. Forma un lodo compacto y crecerá en espesor en función del tiempo.

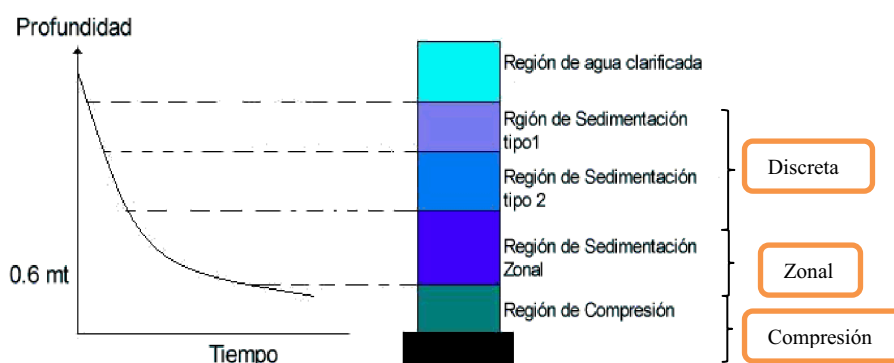


Figura 1.15. Velocidad inicial de la sedimentación y localización de zonas.

La velocidad de sedimentación disminuye a medida que las partículas se sedimentan (pasan de la zona de partícula discreta a la zona de compresión), es decir, la velocidad inicial de sedimentación es inversamente proporcional a la concentración de la pulpa, como se muestra en la Figura 1.16. El comportamiento de la velocidad de sedimentación está controlado por su densidad, tamaño y forma de las partículas.

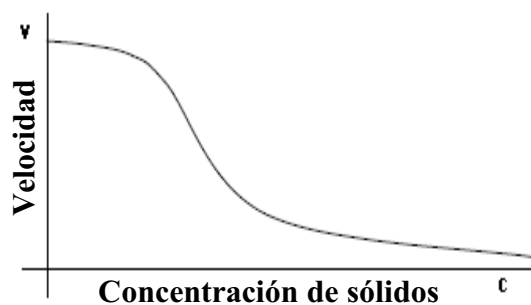


Figura 1.16. Velocidad inicial de la sedimentación vs. Concentración de sólidos.

La sedimentación establece que el nivel de interface (altura, H) agua – sólido varía con el tiempo transcurrido (t), (Tchobanoglous y Burton, 1995) tal como se muestra en la Figura 1.17.

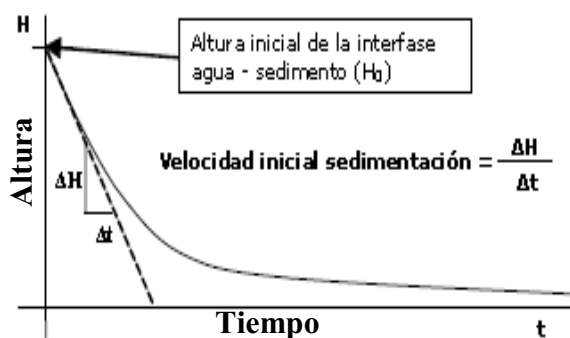


Figura 1.17. Curva de sedimentación de una suspensión líquida (pulpa)

La obtención de las curvas de sedimentación se logra a partir de cada tipo de muestra colocada en cilindros o probetas “graduados” (con medición de altura). A partir de las curvas, se determinan las velocidades de sedimentación como se muestra en la Figura 1.17 y se evalúan las influencias del uso de cada reactivo químico como agente floculante para acelerar el proceso de sedimentación.

La coagulación/floculación es un procedimiento químico y físico en el cual las partículas son pequeñas para separarse por sedimentación simple o discreta (sin uso de reactivos). Este proceso produce una desestabilización y una aglomeración para asentar las partículas de forma rápida.

1.2.3.1. Coagulación / Floculación

La coagulación es un proceso de desestabilización química que se produce debido a la adición de agentes químicos y la energía de mezcla, para neutralizar las cargas o fuerzas que mantienen separadas las partículas sólidas coloidales (partículas que no sedimentan y que están dispersas) presentes en el efluente y fomentar la floculación para obtener una buena sedimentación.

La floculación es un proceso seguido de la coagulación que consiste en la agitación y permitir la aglomeración de los flóculos de las partículas desestabilizadas con el fin de facilitar la sedimentación. Mientras que en la coagulación se produce por acción química (sección 1.2.3.2), la floculación se produce debido a la reunión de las partículas desestabilizadas cuyo peso específico sea mayor a la de agua, el cual produce una mejor remoción. (Aguilar, Sáenz, Llórens, Soler, Ortuño, 2002, p. 105)

Durante el proceso de coagulación con agentes químicos inorgánicos, se producen mecanismos de reacción como son la neutralización de cargas por adsorción como se ve en la Figura 1.18. Sin embargo, para sales de aluminio y férricas, el mecanismo de coagulación es controlado por la hidrólisis.

Al utilizar sales metálicas tales como sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) o cloruro férrico (FeCl_3), que son las que principalmente se utilizan; se produce la formación de hidróxidos los cuales pueden precipitar y atrapar las partículas coloidales formando un floc (aglomeración).

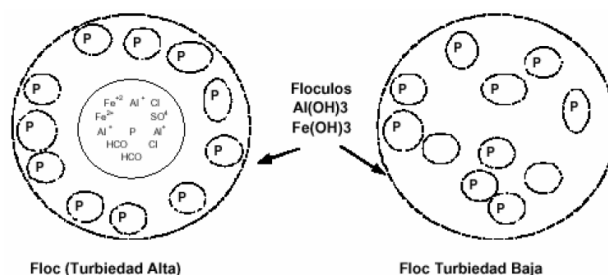
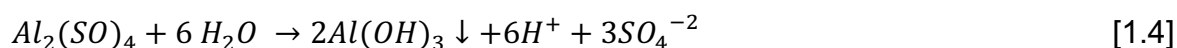
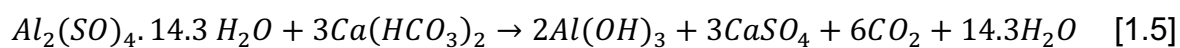


Figura 1.18. Atrapamiento de partículas en un floc.

En este caso la sal de aluminio se ioniza en el agua y produce iones Al^{+3} y SO_4^{-4} . Los iones Al^{+3} se combinan con OH^- del agua formando el hidróxido $\text{Al}(\text{OH})_3$ los cuales adsorben los iones positivos de la solución como se presenta en la ecuación 1.4.



Sin embargo la presencia de iones H^+ en exceso tiende a acidificar o a bajar el pH y se daría lugar a la formación de $\text{Al}(\text{OH})_3$ y generalmente este exceso es controlado por la alcalinidad presente en el agua o cuando se agrega CaO .



El pH óptimo para la coagulación con $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ es entre 6 y 8. Cuando se utiliza otro reactivo, se debe medir el pH de la solución y el potencial (Eh) para su determinación de la reacción mediante los diagramas de Pourbaix (Henry y Heinke, 1999, p. 399).

Por ejemplo en la Figura 1.19, el cinc a pH neutro (pH entre 6,5 y 7) y un potencial cercano a cero, se encuentra como Zn^{2+} que en medio acuoso se disuelven en el efluente formándose hidróxido de cinc ($\text{Zn}(\text{OH})_2$); ya que los complejos $\text{Zn}(\text{OH})_3^-$ y $\text{Zn}(\text{OH})_4^{2-}$ se forman en medios alcalinos (Beverkog y Puigdomenech, 1997, p. 107).

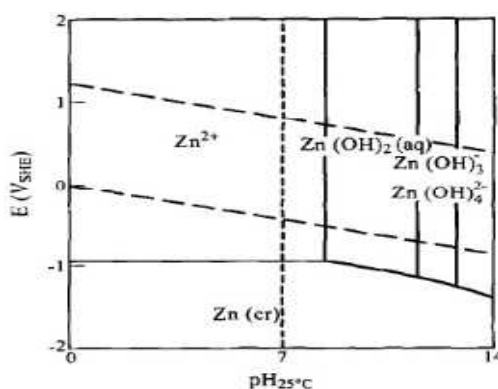


Figura 1.19. Diagrama de Pourbaix para cinc a 25°C en medio acuoso.

Como indica la Figura 1.20, el cobre en un medio acuoso, con pH neutro y potencial igual a cero, se encuentra como cobre libre (Cu) y muy cercano a óxido cúprico (Cu_2O), por lo que parte de cobre se disuelve en pequeñas cantidades en el efluente.

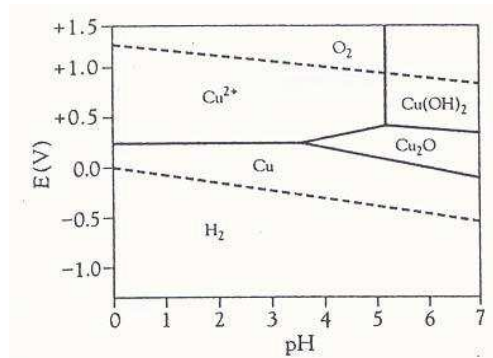


Figura 1.20. Diagrama de Pourbaix del Cobre en medio acuoso

El diagrama de Pourbaix que presenta el plomo en la Figura 1.21, muestra que a pH neutro y potencial de cero, el plomo se encuentra cercano a Pb^{2+} y en su mayoría como un complejo de hidróxido de plomo ($\text{Pb}(\text{OH})_2(\text{e})$), que se forma con medios alcalinos como la cal (CaO) o NaOH .

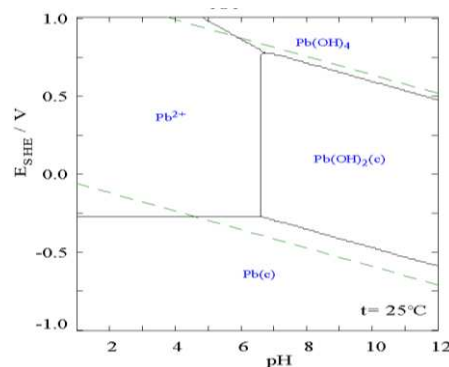


Figura 1.21. Diagrama de Pourbaix de Plomo en medio acuoso.

El uso de polímeros orgánicos como indica la Figura 1.22 muestra la adsorción que se produce con las partículas coloidales la formación de puentes interparticulares, las cuales se estabilizan con la adición del coagulante.

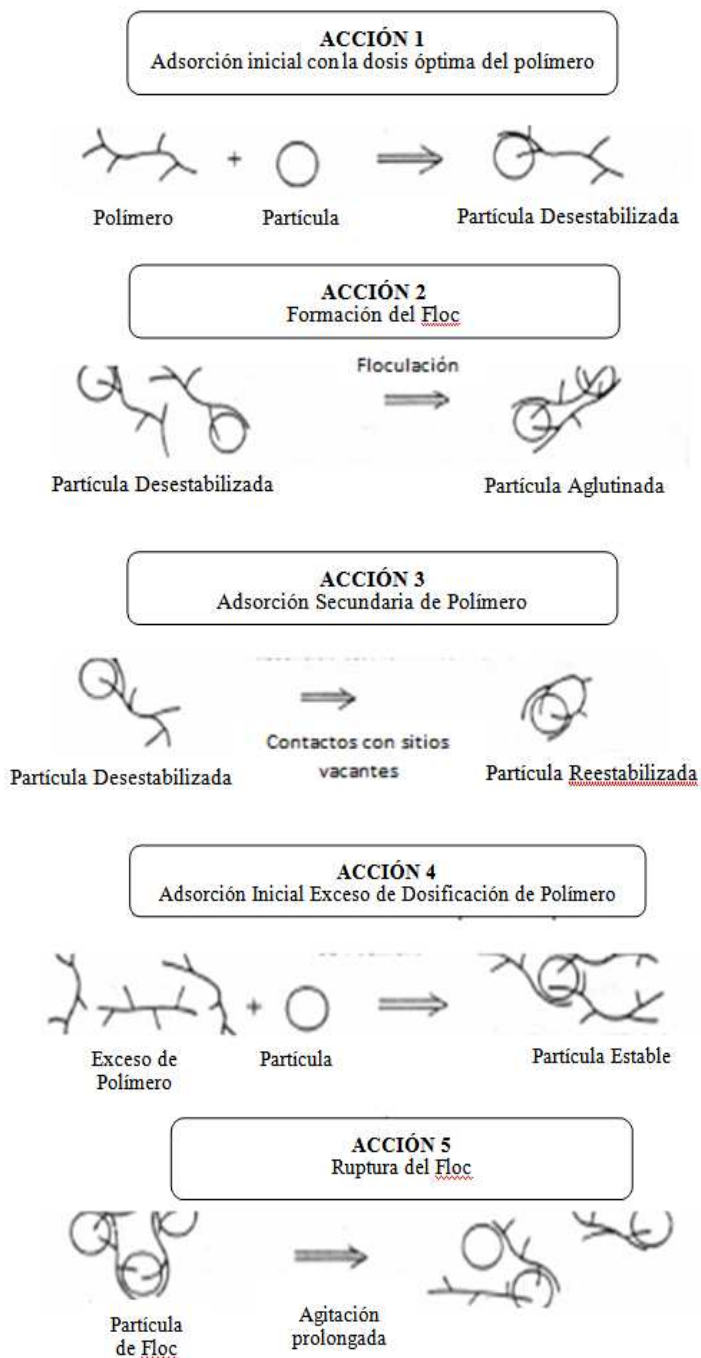


Figura 1.22. Esquema del mecanismo de la adsorción de polímeros y partículas coloidales para producir puentes entre las partículas.

Modelo Químico de la Coagulación.

La carga de las partículas se da por ionización de los grupos hidroxilos, carboxilos, fosfatos o sulfatos que pueden estar en las superficies coloidales. Bajo

el punto de vista químico, cuando reaccionan estos grupos con los iones metálicos, pueden formar precipitados. De acuerdo a este proceso se presenta la teoría del Puente Químico propuesto formulada por La Mer:

La teoría describe la suposición de que una molécula polimérica se une en uno o más sitios de la superficie del coloide, lo que permite que existan espacios libres que pueden ser ocupados por otros coloides y generar de esta forma un puente químico. Esto genera un aumento de tamaño y consigo, precipitación.

$$\theta = \frac{b(P_0 - P)N}{sS_0} \quad [1.6]$$

Sea:

P_0 : concentración del polímero añadido.

P : concentración del polímero residual después de la adsorción.

b : número de segmentos adsorbidos por la molécula.

$P_0 - P$: concentración adsorbida.

$(P_0 - P)N$: número de moléculas concentradas en la interface (N: No. avogadro)

$b(P_0 - P)N$: número de sitios cubiertos.

s : número de sitios de adsorción por unidad de área.

S_0 : área de la superficie de los coloides.

La posibilidad de que los coloides se unan y floculen es proporcional a θ y a $(1-\theta)$. Por lo tanto si se considera la tasa de formación de flocs o la disminución del número de partículas sin floccular se tiene:

$$-\frac{dn_o}{dt} = K_1 n_o^2 \theta (1 - \theta) \quad [1.7]$$

Donde:

n_o : No. de partículas sin floccular

$n_o\theta$: superficie total con polímero

$n_o(1 - \theta)$: superficie total no cubierta con polímero

K_1 : constante de eficiencia de formación de flocs ($0 \leq K_1 \leq 1$)

La tasa es máxima cuando θ es igual a 0,5. Cuando la constante de eficiencia es igual a 1, existe un exceso de coagulante y los sitios de adsorción quedan cubiertos (Soto, 2001, p. 1).

1.2.3.2. Tipos de floculantes

La utilización de floculantes facilita la sedimentación y mejoran la clarificación de las pulpas. Según su naturaleza, los agentes floculantes pueden ser inorgánicos, orgánicos y sintéticos.

Floculantes inorgánicos. Producen una desestabilización de partículas lo que disminuye las fuerzas de repulsión entre partículas (reducción de la doble capa).

Entre los agentes floculantes más utilizados están:

- Sulfato de aluminio (o sulfato de alúmina, $Al_2(SO_4)_3$)
- Sulfato ferroso, $FeSO_4$
- Sulfato férrico, $Fe_2(SO_4)_3$
- Cloruro férrico, $FeCl_3$

Su acción efectiva durante el proceso de sedimentación depende directamente del pH que posee la pulpa o solución a tratar.

Por ejemplo, el sulfato de aluminio tiene un rango de pH óptimo a la cual trabaja entre 5 – 7,5; el sulfato ferroso a pH 9,5; sulfato férrico a pH 4 – 7 y cloruro férrico a pH 4 – 6. Sin embargo en ciertos casos, la utilización de cada coagulante y la dosis necesaria depende de ensayos de laboratorios.

Floculantes orgánicos. También conocido como naturales los cuales se emplean en el tratamiento de las aguas residuales. Están constituidos por polisacáridos y su principal representante es el almidón. Sin embargo, tendían a

perder efectividad con el tiempo por lo fueron remplazados con la introducción de floculantes sintéticos.

Floculantes sintéticos. Son polímeros lineales de elevado peso molecular. El principal mecanismo de floculación es la formación de puentes que forman una estabilización de la partícula.

El principal agente floculante sintético es la poliacrilamida la cual es efectiva a bajas concentraciones y su efectividad de la velocidad de sedimentación es alta. (García y Rojas, 2006, p. 41)

1.3. ESTABILIZACION DE LOS RESIDUOS METÁLICOS INDUSTRIALES

La estabilización de residuos es un proceso de tratamiento en el que el residuo es tratado con un agente estabilizante o aditivo con el objeto de inmovilizar la velocidad de migración de los constituyentes tóxicos (metales pesados) hacia el exterior. Para reducir la naturaleza peligrosa del residuo, transforman sus constituyentes peligrosos en bloques (Sánchez, Vergara, Castro, 2000, p. 375).

De acuerdo a la USEPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos) define lo define como una técnica que disminuye el potencial de peligrosidad de un residuo, transformándolo en su forma menos soluble, tóxica o móvil. En la actualidad se suelen utilizar los términos de estabilización y fijación como uno solo, ya que no tienen por qué alterarse sus características y propiedades (Elías, 2000, p. 83).

Una de las esquematizaciones más comunes que se presentan antes del proceso de estabilización para tratamientos de aguas residuales se muestra en la Figura 1.23.

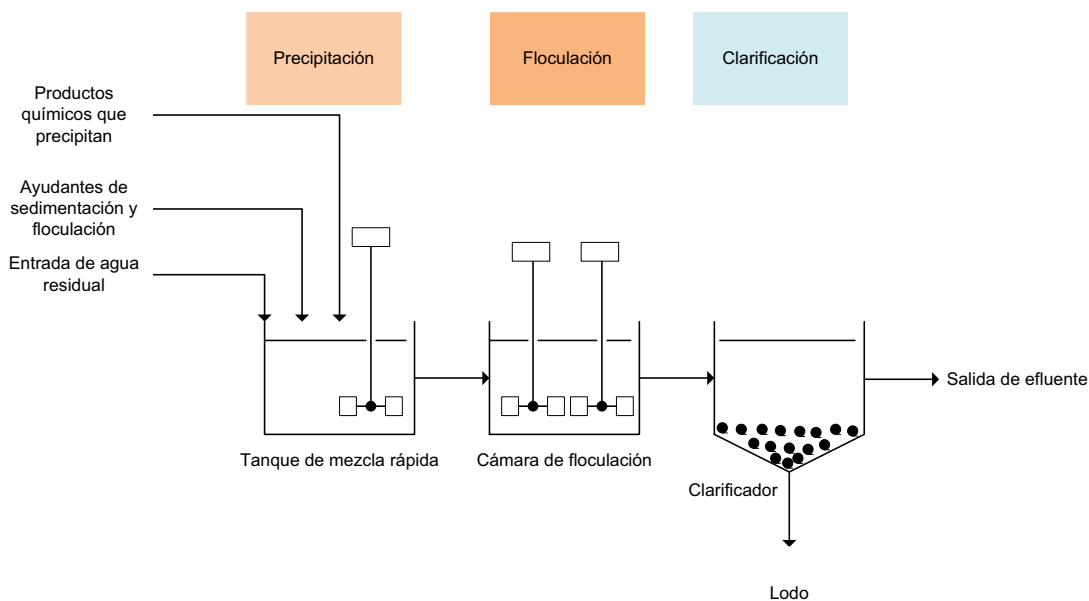


Figura 1.23. Procesos previos a la estabilización y solidificación.

El lodo que se presenta en la Figura 1.23., es llevado al proceso de estabilización que se utiliza cuando existen residuos cuya tendencia es disolverse en agua como son los metales pesados.

Esta tecnología es aplicada a la recuperación de vertederos peligrosos, al tratamiento de residuos y al tratamiento de terrenos o suelos contaminados.

Dentro de los agentes estabilizantes comúnmente utilizados están: cemento Portland, cal o componentes básicos. (Espinoza, 2003, p. 11)

La acción que cumplen estos agentes son:

- Mejoran el manejo y las características físicas del residuo.
- Disminuyen la superficie en el cual se puede transferir o perder contaminantes.
- Limita la solubilidad de cualquier contaminante.
- Reduce la toxicidad de contaminantes.

Si el residuo llega a formar una parte del nuevo compuesto, su resistencia y propiedades serán buenas; pero, si el residuo es solamente retenido de manera física sin cambiar su estructura morfológica y/o química, la encapsulación/estabilización realizada dependerá más del medio en que se encuentre que de su resistencia.

Por otra parte la solidificación, es el proceso en el que se añade la cantidad suficiente de material solidificante a los materiales peligrosos para originar una masa estable e inerte.

A nivel general, la estabilización y solidificación de residuos presenta las siguientes ventajas y desventajas que se presentan en la Tabla 1.5.

Tabla 1.5. Ventajas y desventajas del proceso de estabilización y solidificación.

ATRIBUTOS DE LA ESTABILIZACION Y SOLIDIFICACION	
Ventajas	Reducción de la peligrosidad del residuo. Reduce la movilidad migratoria de los contaminantes. Permite un confinamiento con menor impacto ambiental potencial.
Desventajas	Altos costos de insumos fijadores/ solidificantes. Complejidad operacional. Es complicado a gran escala de operación.

Los metales son los únicos contaminantes tóxicos y constituyentes de residuos que no pueden ser transformados por métodos térmicos o químicos; por lo tanto deben ser llevados a una estabilización.

Sin embargo, el costo y el método de tratamiento dependen de la forma en la que se encuentra el metal en el residuo, así como de la cantidad presente. En la Tabla 1.6 se presentan los metales que son considerados peligrosos por distintas legislaciones.

Tabla 1.6. Relación de metales tóxicos

Metal	EEUU (EPA)	España	Ecuador
Antimonio	x	x	x
Arsénico	x	x	x
Cadmio	x	x	x
Zinc	x	x	x
Cobalto	x	x	x
Cobre	x	x	x
Cromo	x	x	x
Estaño	-	x	x
Mercurio	x	x	x
Plomo	x	x	x
Selenio	x	x	x

(Elías, 2000)

La pérdida de contaminantes tóxicos de una masa estabilizada se realiza por medio de ensayos de lixiviación. La lixiviación es el proceso por el cual los contaminantes se transfieren desde una matriz estabilizada hacia un medio líquido.

Las matrices sólidas más utilizadas son: cemento, asfalto, vidrio y polímeros plásticos. La inmovilización permite incrementar los niveles de seguridad ya que reduce sustancialmente la capacidad de transporte de los contaminantes fuera del lugar de confinamiento (LaGrega et al., 1996, p. 748).

La estabilización de residuos industriales mejora las propiedades de resistencia y compresibilidad y la integridad estructural del compuesto.

La Tabla 1.7 corresponde a la solidificación de residuos en el que se adiciona cemento o cal para la neutralización y estabilidad del material, lo cual mejora la calidad del medio ambiente.

Tabla 1.7. Estudio de distintos casos de tecnologías de estabilización (Modificado de EPA Estados Unidos).

Terreno/Contratista	Contaminante	Volumen de tratamiento	Aglomerante	% Aglomerante
Midwest, U.S Plating Company, Envirite Marathon Steel Phoenix, Silicate	Cu, Cr, Ni, Pb, Cd	12 239 m ³	Cemento Portland	20
N.E Refinery ENRECO	Lodos de aceite, Pb, Cr, As	76 460 m ³	Polvo de horno (alto contenido de CaO)	15-30
Pepper Steel and Alloy	Aceite sat. Suelo, Pb (1 000 ppm)	47 405 m ³	Puzolánicas y patente	30
Vickery, Chemical Waste Management	Residuo ácido PCB, dioxinas	179 680 m ³	Polvo de horno y cal	15 % CaO, 5 % polvo de horno

1.3.1. MECANISMOS DE ESTABILIZACIÓN

La determinación de la estabilidad del residuo se realiza por medio de mecanismos físicos o químicos para evaluar y controlar el éxito o fracaso de estos procesos. Dentro de las técnicas más utilizadas están:

- Macroencapsulación
- Microencapsulación
- Absorción
- Adsorción
- Detoxificación

1.3.1.1. Macroencapsulación de Residuos

Es uno de los mecanismos por el cual los componentes tóxicos o constituyentes del residuo peligroso se retienen físicamente en los poros del agente estabilizante. Cuando se produce una degradación física debido a tensiones medioambientales (humectación y desecación; congelamiento y deshielo; penetración de fluidos y percolación), se descompone la masa estabilizada con el tiempo.

1.3.1.2. Microencapsulación de Residuos

Al igual que en la macroencapsulación, los constituyentes del residuo son retenidos en el interior de la estructura cristalina de la matriz solidificada a nivel microscópico. La ventaja de realizar microencapsulación es que cuando se degradan los materiales estabilizados a menores tamaños de partículas, la mayor parte del residuo peligroso queda atrapado.

1.3.1.3. Mecanismo de Absorción

Es el proceso en el cual los constituyentes contaminantes son tomados por el sorbente. En este caso se aplica un material sólido (absorbente) que absorba los líquidos libres del residuo. Sin embargo, la absorción es empleado como una medida temporal para la mejora de las características de manejo.

Dentro de los absorbentes más comunes están: suelo, polvo de hornos de cemento, polvo de hornos de cal, heno, paja.

1.3.1.4. Mecanismo de Detoxificación

Algunas de las reacciones químicas que se producen en el residuo al adicionar el estabilizante, dan lugar a una menor toxicidad, es decir, modifica los constituyentes tóxicos en otro no tóxico (Cr de valencia 6 a Cr de valencia 3).

1.3.2. TECNOLOGÍA DE ESTABILIZACIÓN

La tecnología de estabilización de los residuos se realiza mediante la adición de reactivos (aditivos), en algunos casos son denominados como aglomerantes.

Dentro de los aditivos que se agregan, en algunos casos suelen emplearse más de uno durante el proceso de estabilización.

Como referencia de la utilización de los reactivos de estabilización, se muestra la Tabla 1.8, la cual puede ser como primera selección y desarrollo de ensayos.

Tabla 1.8. Aplicación de reactivos para la estabilización de residuos

Componente de residuo	Tipo de cemento	Tipo puzolanas	Termoplásticos
Orgánicos no polares: aceites, hidrocarburos, aromáticos, hidrocarburos halogenados	Pueden impedir el fraguado. Disminuye la durabilidad en periodos largos de tiempo.	Pueden impedir el fraguado. Disminuye la durabilidad en periodos largos de tiempo.	Los compuestos orgánicos pueden evaporarse durante el calentamiento.
Alcoholes, fenoles, ácidos orgánicos, glicoles.	Los fenoles retrasan el fraguado y disminuyen la durabilidad a corto plazo	Los alcoholes pueden retrasar el fraguado	Los compuestos orgánicos pueden evaporarse durante el calentamiento.
Ácido clorhídrico, ácido fluorhídrico.	Ningún efecto sobre el fraguado. El cemento neutraliza los ácidos. Cemento portland tipo I y II presentan mejores características de durabilidad	Ningún efecto sobre el fraguado. Compatible, neutralizará los ácidos	Pueden neutralizarse antes de su incorporación
Oxidantes: hipoclorito sódico, permanganato de sodio, dicromato de potasio.	Compatible	Compatible	Pueden provocar rotura de la matriz, fuego.
Metales pesados: plomo, cromo, cadmio, arsénico, mercurio.	Puede aumentar el tiempo de fraguado. Eficacia demostrada.	Eficacia demostrada sobre estos elementos.	Eficacia demostrada sobre estos elementos.

1.3.2.1. Estabilización con cemento

Se lo emplea como el principal agente estabilizante de los residuos peligrosos y el más común es el cemento portland. Durante la estabilización, los residuos se mezclan con cemento y se añade agua para su hidratación. La hidratación origina una estructura cristalina aluminosilicato cálcico que muestra una serie de reacciones como se observa en la Figura 1.24.

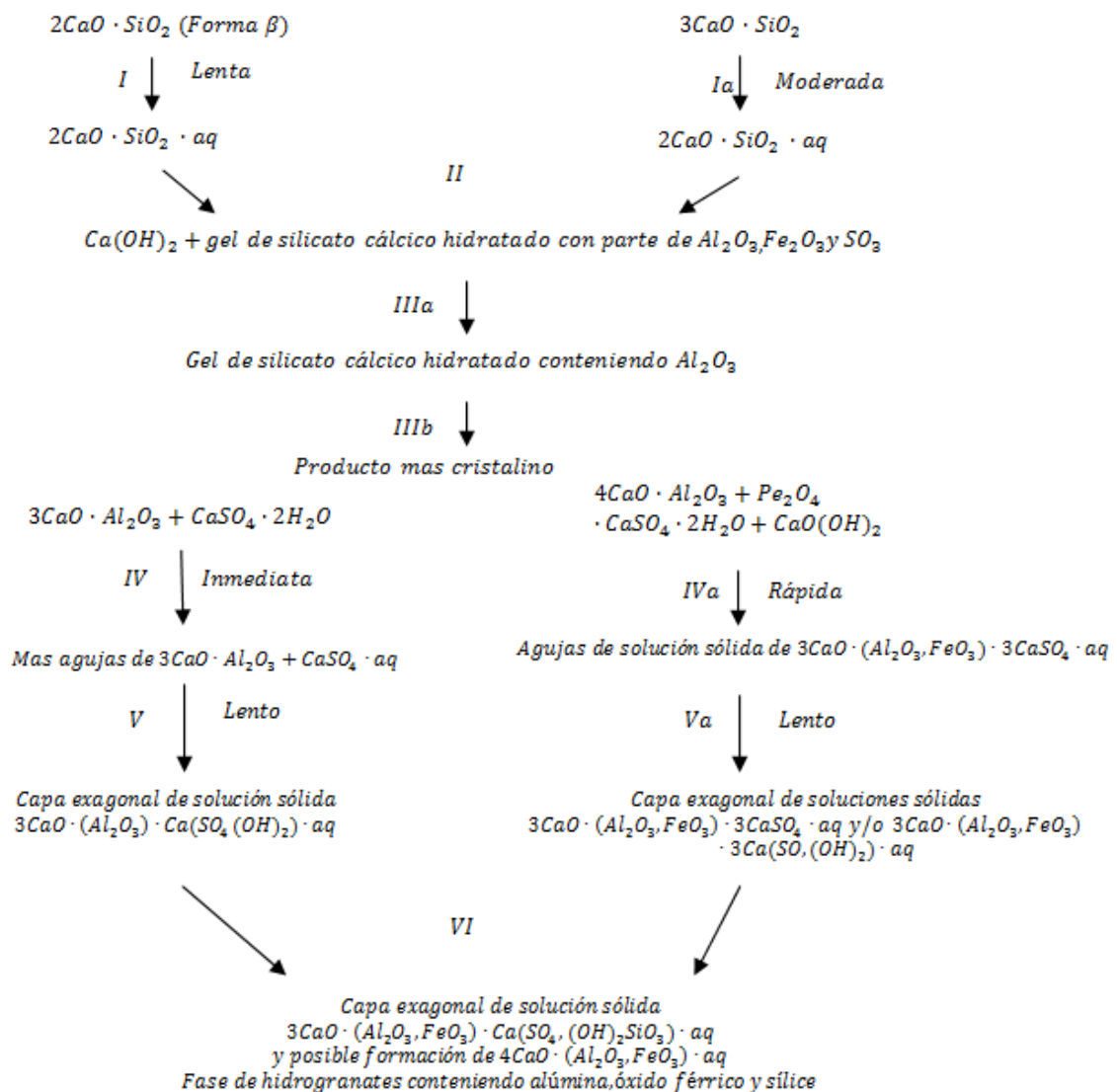
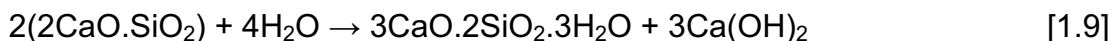
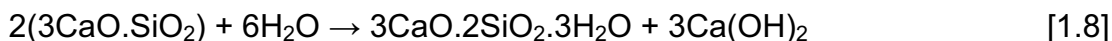


Figura 1.24. Reacciones del cemento portland. (Elías, 2009)

En la forma más sencilla, la reacción del silicato tricálcico y silicato bicálcico se pueden expresar en las ecuaciones 1.8 y 1.9, respectivamente:



La estabilización con cemento es el más adecuado para residuos inorgánicos en especial aquellos que contienen metales pesados tales como plomo, cobre, cinc, estaño y cadmio. (Elías, 2009, p. 560)

Como resultado de la hidratación, produce un pH elevado por el cemento y los metales quedan retenidos como hidróxidos insolubles o carbonatos en la estructura endurecida. El cemento es muy utilizado en el campo de la construcción, por lo que el coste del material es bajo.

1.3.2.2. Estabilización con puzolanas

Es un material en conjunto con agua, reacciona con la cal para producir la cementación del material. Entre las materias puzolánicas están las cenizas volantes, escorias de incineración, y polvo de hornos de cemento.

1.3.2.3. Estabilización con cal

La cal, en conjunto con el agua forma el hidróxido de calcio; al reaccionar con los metales presentes en el residuo forma silicato cálcico, alúmina cálcica o aluminosilicato cálcico hidratados.

Hay que tomar en cuenta que la cal también se utiliza, a parte de estabilizante, como un agente para elevar el pH de los lodos ácidos que contienen un gran contenido de metales. (Elías, 2009, p. 569)

1.3.2.4. Estabilización con polímeros orgánicos termoestables

Este aditivo tiene una mayor aplicación en la solidificación de residuos peligrosos orgánicos, no volátiles, líquidos; así se retiene en la matriz partículas sólidas del residuo (macroencapsulación).

1.3.3. CONFINAMIENTO DE LOS RESIDUOS COMO DISPOSICIÓN FINAL

El confinamiento que se realiza a los residuos sólidos peligrosos no es un proceso adecuado, puesto a que requiere de un tratamiento previo que logre de cierta forma, su inertización o su reducción de migración de los metales pesados que se consideran contaminantes hacia el medio ambiente. En estos casos se debe seleccionar un lugar que sea apropiado para garantizar una barrera permanente entre los residuos y el entorno. (Sánchez, 2003, p. 62)

Dentro de la aplicación de un sistema de limpieza de suelos, el confinamiento es una de las posibilidades a realizarse.

De acuerdo a Lagrega et al. (1996), las tecnologías son clasificadas como componentes activos o pasivos de los sistemas de limpieza.

- Los componentes activos del sistema requieren esfuerzos y entrada de energía para su funcionamiento (pozos de bombeo).
- Los componentes pasivos del sistema trabajan sin demasiada atención, salvo el caso de realizar su mantenimiento (como una cubierta).

1.3.3.1. Sistema pasivo de control

El principal objetivo del sistema de control pasivo es la minimización de la velocidad de migración o de transporte de los contaminantes. La migración de los contaminantes se produce por infiltración dentro de los residuos lo cual genera

lixiviados; luego son transportadas por medio de las aguas subterráneas y son descargadas en aguas superficiales. (Sánchez, 2003, p. 67)

La necesidad de prevenir el transporte de los metales pesados o por generación de lixiviados es para controlar la contaminación hacia fuera de la zona donde son incorporados vertederos; con este propósito, se colocan cubiertas o envolturas y se efectúan operaciones que producen una estabilidad del residuo o minimización de los residuos metálicos antes de ser trasladados a confinamiento.

Las tecnologías de control aplicadas a las aguas superficiales, son componentes de limpieza global dentro del proceso de minimización de contaminantes. Dentro de los cuales se encuentra los sistemas de cobertura de los residuos, materiales utilizados para su confinamiento (Sánchez, 2003, p. 70).

1.3.3.2. Sistema de sellado y recogido de lixiviados

El sellado se refiere a colocar un material cuya función sea el actuar como una barrera que minimice la migración de los contaminantes.

Un sellado ideal sería aquel que actúe con una eficacia de 100 por ciento y proporcione el impedimento de migración o desplazamiento de metales, sin embargo, esto no sucede en la realidad debido a que siempre se producen lixiviados. Por esta razón, se toma en cuenta una o varias capas de materiales que actúen como barreras para los contaminantes.

Se entiende por lixiviado como una mezcla de la infiltración directa de los contaminantes y cualquier líquido o efluente que pasa por los residuos, de forma que transporta materia en suspensión y sólidos disueltos.

La forma más general de elaboración de capas para evitar la contaminación del ambiente y disminución de contaminantes se presenta en la Figura 1.25 el cual presenta la siguiente estructura:

Zona de filtrado. Puede ser un geotextil o grava dentro de las cuales se produce una filtración de las partículas. También adicionar una geomembrana que proporciona una estabilidad estructural.

Zona primaria de recogida de lixiviado. Se coloca una tubería la cual recoge el lixiviado libre de contaminantes particulados.

Capa de barrera primaria. Recubre la zona primaria; por lo general es una geomembrana o una membrana sintética flexible.

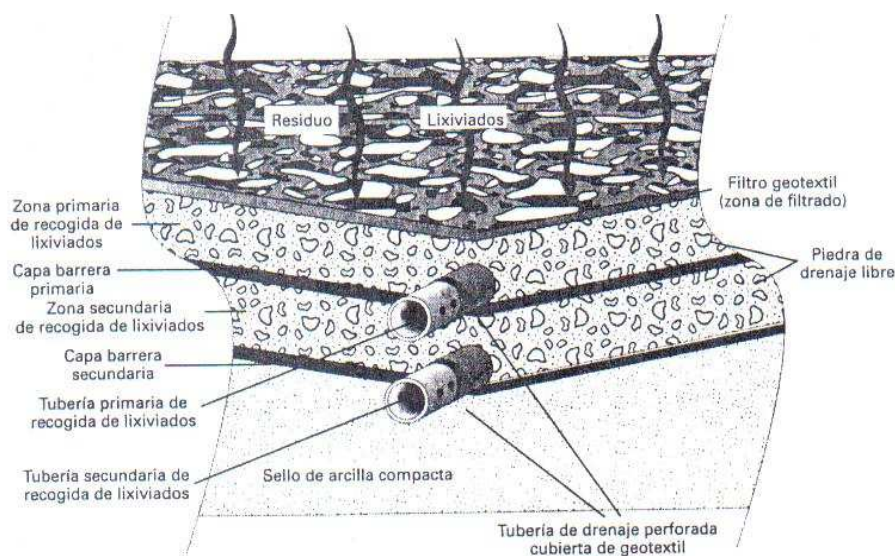


Figura 1.25. Esquema de los sistemas de sellado y recogida de lixiviados en una instalación para disposición de residuos peligrosos.

En sistemas generales, la utilización de estas tres capas sería suficientes para la formación de barreras en el confinamiento, sin embargo, existen casos en los que los sellos se pierden con el tiempo dependiendo de los residuos que se lixivian. Para ello se utilizan una zona secundaria de recogida de lixiviados y una capa de barrera secundaria para asegurar la penetración de los contaminantes hacia el terreno. Finalmente se coloca una capa de arcilla compacta o mezclada con el subsuelo natural.

No obstante, las combinaciones o variaciones de las capas para el sistema de sellado dependen del confinamiento de residuos sólidos urbanos o residuos industriales metálicos y la generación de lixiviados.

Por ejemplo, un sistema de sellado para retardar constituyentes inorgánicos es colocar bentonita cálcica, bentonita sódica y zeolita; así como para retardar los componentes orgánicos se utiliza arcillas modificadas orgánicamente.

1.3.3.3. Materiales utilizados para confinamiento

La construcción de componentes para el sellado y regida de lixiviados se emplean una variedad de materiales.

Geomembrana. Es un polímero geosintético que actúa como un impermeable y que proviene de materiales plásticos manufacturados como goma butílica, goma etilo-propileno (neopreno), polietileno (alta y baja densidad) y policloruro de vinilo (PVC).

En la Tabla 1.9 se presentan el tipo de geomembranas y sus principales usos.

Tabla 1.9. Tipos de geomembrana

TIPO	USO
Polietileno de alta densidad (HDPE)	Excelente resistencia a degradación química y ampliamente utilizado en vertederos de residuos urbanos y peligrosos.
Cloruro de polivinilo (PVC)	Adecuado si se entierra, sujeto a degradación por ozono y UV, no adecuado para aceites.
Polietileno clorosulfonado (Hypalon)	Segundo más común tras el PVC, buena resistencia a la corrosión por productos químicos, no adecuado para aceites o solventes.
Polietileno de baja densidad (LDPE)	Fácil de perforar, soldar, no apto para residuos por resistencia química.
Neopreno	Excelente resistencia a los aceites, condiciones meteorológicas, ozono, UV, daños mecánicos, caro.
Elastómero de poliéster	Buena resistencia al aceite, fuel y productos químicos.

La Tabla 1.10 representa las propiedades que se evalúan para la el rendimiento de las barreras.

Tabla 1.10. Propiedades de geomembrana.

Propiedades Físicas	Propiedades Mecánicas
Espesor	Comportamiento a tracción
Densidad	Comportamiento a soldadura
Transmisión vapor de agua	Resistencia a impacto
Transmisión vapor solvente	Resistencia a desgarro
Propiedades Químicas	Propiedades Biológicas
Resistencia a UV	Resistencia a animales
Resistencia a hinchamiento	Resistencia a hongos
Resistencia a Ozono	Resistencia a bacterias
Propiedades Térmicas	
Comportamiento a alta y baja temperatura	Dilatación térmica

Geotextil. Es un geosintético fabricado para ser permeable que presenta dos propiedades hidráulicas: filtración (eliminación de sólidos suspendidos que fluye) y drenaje (transporte de líquidos por la superficie del material).

Arcillas compactadas. Utilizado para la mejora de sellos de geomembrana. Los suelos presentan arcillas naturales, arcillas limosas, arcillas arenosas y limo arcillosas.

Mezclas de bentonita. Se utiliza junto con los suelos naturales para aumentar la capacidad de adsorción. Existen bentonitas cálcicas y sódicas las cuales pueden intercambiar con metales pesados como cobre (Cu), níquel (Ni) y plomo (Pb). Por tanto reduce la velocidad de transporte debido a la adsorción de los iones metálicos.

Zeolita. Son alumino-silicatos naturales o procesados con una estructura tipo jaula que actúa como una criba molecular, la cual atrapa o retiene iones metálicos por intercambio iónico preferentemente arsénico (As), plomo (Pb) y cadmio (Cd).

2. PARTE EXPERIMENTAL

Dentro del presente trabajo se investigó el diseño de un sistema de tratamiento de los residuos de fundición de latón que provienen de la elaboración de grifería, los cuales poseen concentraciones elevadas de metales pesados como son cobre, cinc, plomo, hierro, estaño y que se encuentran sobre el límite permisible planteado por la EPA.

Se realizó la caracterización química de residuos por medio de espectroscopia de absorción atómica (AA) y mineralógica por difracción de rayos X (DRX).

De esta manera se utilizó el proceso de tamizado en seco y ensayos de fusión con cada una de las fracciones retenidas en cada malla, y a partir de estos, se aplicaron tres opciones de tratamiento de los residuos:

- a. Tratamiento de residuos mediante clasificación por tamaño (tamizado) en seco.
- b. Tratamiento de residuos mediante clasificación por tamaño en húmedo y separación sólido – líquido por medio de filtración.
- c. Tratamiento de residuos mediante clasificación por tamaño en húmedo y separación sólido – líquido mediante sedimentación.

El agua utilizada en los procesos de tamizado en húmedo (b y c) se recirculó en cada nuevo proceso de clasificación por tamaño.

Por otro lado, los tratamientos de residuos mencionados en b y c; fueron lixiviados en medio ácido y básico.

Finalmente, los residuos tratados en seco y en húmedo fueron estabilizados mediante la elaboración de adoquines.

Posterior a 28 días, como requiere la norma respecto a ensayos de compresión de adoquines (NTE INEN 1488:87), se determinó la resistencia de estos y se analizó la mejor opción de tratamiento.

El resumen de la metodología experimental se detalla a continuación en la Figura 2.1.

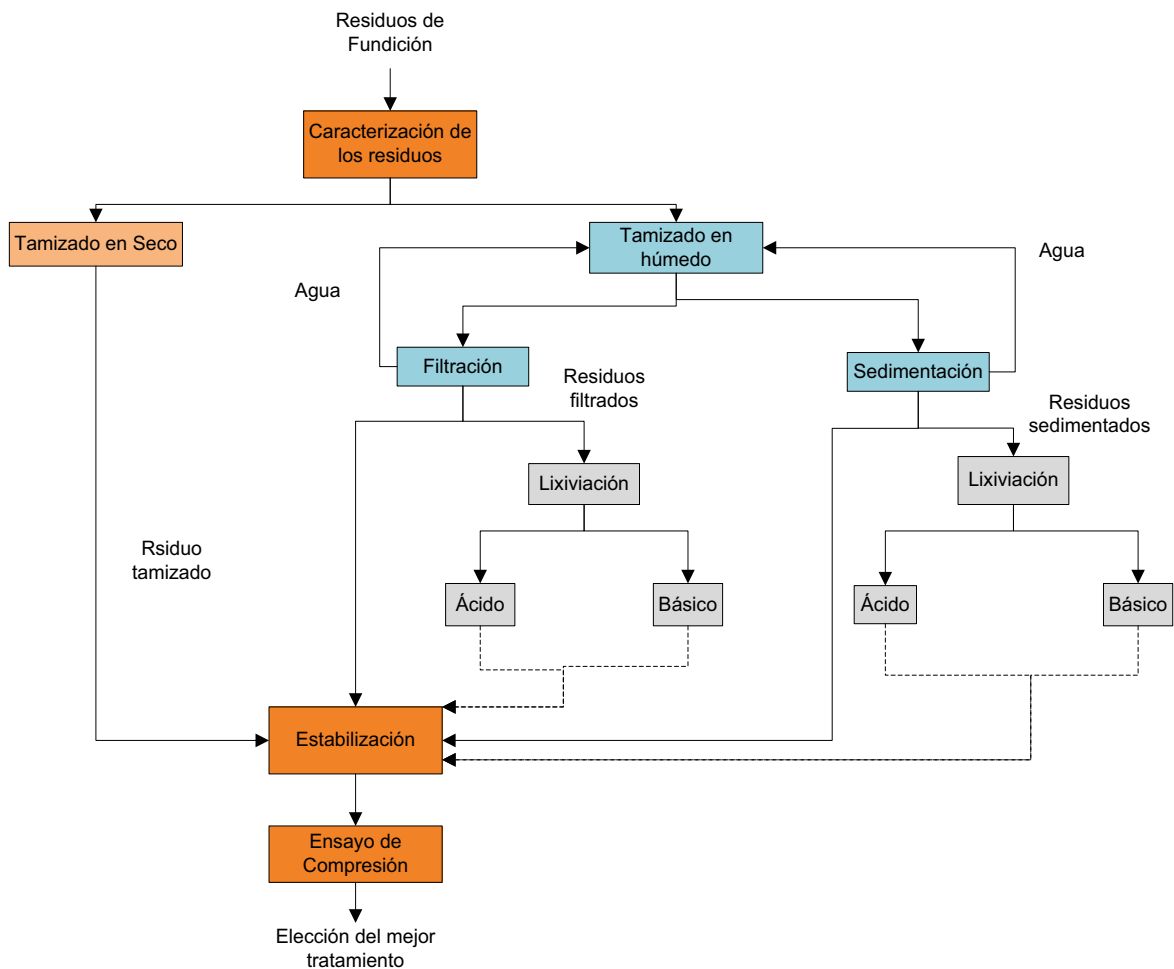


Figura 2.1. Esquema del trabajo experimental.

Las líneas segmentadas de la Figura 2.1 pertenecen a la mejor opción de tratamiento mediante lixiviación a los residuos filtrados y sedimentados, para continuar con el proceso de estabilización.

2.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICO - QUÍMICA Y MINERALÓGICA DE RESIDUOS SÓLIDOS DE FUNDICIÓN DE LATÓN

Antes de realizar la caracterización de los residuos sólidos de fundición se homogenizó el material y se cuarteó tomando muestras de 1 Kg, las mismas que fueron tratadas para los procesos de clasificación por tamaño (tamizado) en seco y en húmedo.

2.1.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICA

2.1.1.1. Densidad aparente

Se determinó la densidad aparente con el uso de una probeta de 1 L. (Norma ASTM C 128-04)

- Se pesó la probeta y se colocó el material sin compactarlo.
- Se registró su peso y el volumen que ocupó el material en la probeta.

La determinación de la densidad aparente se determinó a partir de la siguiente ecuación:

$$d_a = \frac{M}{V} \quad [2.1]$$

Donde:

d_a , es la densidad aparente en g/L.

M, es la masa del residuo sin compactar en g.

V, el volumen ocupado dentro de la probeta en L.

2.1.1.2. Densidad real

La densidad real se determinó por medio del método de picnómetro (Norma ASTM C 128-04) que se describe a continuación:

- Se limpió el picnómetro con agua y se secó en la estufa a 110°C por 30 minutos. Se registró su peso seco, vacío y tapado (W_1).
- Se añadió la muestra de residuos hasta $\frac{1}{4}$ del picnómetro y se registró nuevamente su peso (W_2).
- Se adicionó agua destilada hasta los $\frac{3}{4}$ de la capacidad y se removió el aire contenido mediante calentamiento por 10 minutos.
- Se enfrió el picnómetro a temperatura ambiente y se adicionó agua destilada hasta cubrir su volumen total. Se registró su peso (W_3).
- Finalmente, se vació todo el contenido y se llenó nuevamente el picnómetro con agua destilada. Se registró el peso (W_4).

La determinación de la densidad real de la muestra de residuos se realizó por medio de la siguiente ecuación:

$$d_R = \frac{W_2 - W_1}{(W_4 - W_1) - (W_3 - W_2)} \times d_L \quad [2.2]$$

La ecuación [2.2] está expresada en Kg/L, donde:

$W_1 - W_2$	=	Peso del mineral, Kg.
$(W_4 - W_1) - (W_3 - W_2)$	=	Peso del mineral en agua, Kg.
d_L	=	Densidad del agua, g/mL.

2.1.1.3. Granulometría

- Se tamizó 1 Kg de material durante un período de 20 min con los tamices estándares No. 4 (4,75 mm), No. 6 (3,35 mm), No. 8 (2,36 mm), No. 10

(2mm), No. 16 (1 mm), No. 30 (550 μm), No. 50 (300 μm), No. 70 (208 μm), No. 100 (150 μm), No. 150 (104 μm) y No. 200 (74 μm).

- Se registraron los pesos de cada fracción de residuos que fueron retenidos.
- Con los datos obtenidos, se determinó el retenido acumulado y el pasado acumulado.

2.1.1.4. Determinación de pH

Se preparó una solución al 50% de sólidos (1 kg de residuo en 1 L de agua) y se sometió a agitación constante durante un período de 2 horas. Transcurrido el tiempo indicado, se midió el pH de la solución.

2.1.2. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA

La caracterización química fue realizada por medio del método de disgregación ácida a los residuos de fundición y su análisis por absorción atómica. Para ello, se hizo el siguiente procedimiento.

- Se pesó 100 mg de muestra en un reactor de teflón.
- Se adicionó 3 ml de ácido nítrico en el reactor y se cerró la tapa del reactor.
- Se colocó el reactor en un horno microondas durante un período de 2,5 minutos. Transcurrido el tiempo se enfrió el reactor con hielo durante un período de 20 minutos.
- Se abrió la tapa de reactor y se adicionó 3 ml de ácido fluorhídrico. Se cerró la tapa del reactor y se realizó el mismo procedimiento anterior (2,5 minutos en el microondas y enfriamiento por 20 minutos).
- Se adicionó 5 ml de ácido clorhídrico y se hizo el mismo procedimiento descrito anteriormente.
- Finalmente, los residuos disueltos se traspasaron a un matraz de 250 ml y se aforó con agua destilada. Mediante espectrofotometría de absorción atómica se determinó las concentraciones de Cu, Zn, Fe, Pb, Al, Sn, Cr, As,

Ba, Cd, Hg, Ni, Ag, Se, con un equipo AAnalyst 300 localizado en el Departamento de Metalurgia Extractiva.

2.1.3. CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA

La caracterización mineralógica de muestras pulverizadas ($<100 \mu\text{m}$) se realizó por difracción de rayos X en un equipo D8 Advance, Bruker.

2.2. EVALUACIÓN DEL PROCESO DE CLASIFICACIÓN POR TAMAÑO EN SECO Y CARACTERIZACIÓN DE FRACCIONES

El resumen de la caracterización de las fracciones retenidas durante la clasificación de tamaño en seco se presenta en la Figura 2.2.

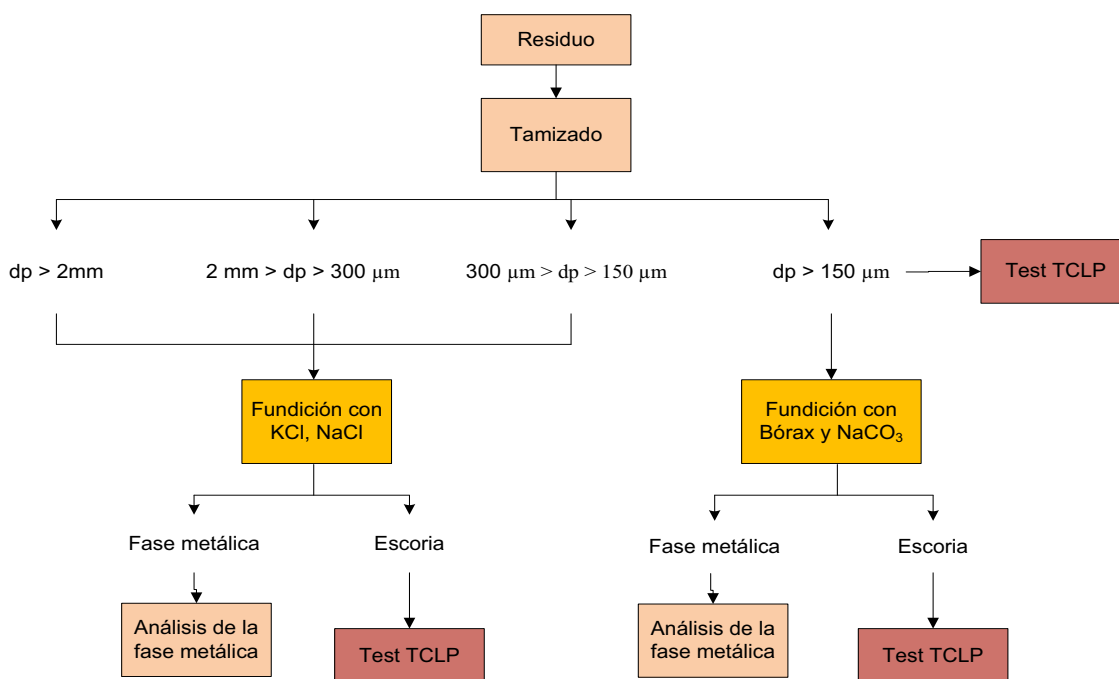


Figura 2.2. Esquema de la caracterización de fracciones de residuos de fundición.

El tamizado en seco de los residuos sólidos de fundición de latón se realizó con 1 kg de muestra y los tamices estándares No. 10 (2mm), No. 50 (300 μm) y No. 100 (150 μm).

Se utilizó el equipo ATM Arrow, que realiza un movimiento elíptico y sujeta la serie de tamices por medio de una tapa. El material cae de la abertura de cada tamiz debido al movimiento y al golpeteo que se realiza en la parte superior del equipo.

Las fracciones retenidas en cada una de las mallas mencionadas fueron pesadas y sometidas a ensayos de fundición. La escoria proveniente de los ensayos fueron llevadas a un test de toxicidad TCLP.

2.2.1. ENSAYO DE FUSIÓN

2.2.1.1. Fundición de las fracciones mayores a 150 μm por separado

Los ensayos de fundición realizados con las fracciones mayores a 150 μm , realizaron el siguiente procedimiento:

- Se pesó 50 g en crisoles de barro, de cada fracción retenida (malla No. 10, No. 50, No. 100 y menor a la malla No. 100), con una relación de 75 % de residuos y 25 % de carga fundente (50 g del residuo tamizado y 15 g de carga fundente).
- Se agregó 15 g de cloruro de potasio (KCl) como carga fundente (LLumiquinga, 2011, p. 118).
- Se sometieron los crisoles de barro a una temperatura de 900°C en un horno eléctrico (STS Ing. de 0,064 m³ de capacidad) durante un período de 90 minutos.

2.2.1.2. Fundición de las fracciones mayores a 150 μm unido

- Se realizó ensayos de fundición con la unión de las fracciones mayores a 150 μm como se muestra en la Figura 2.3.

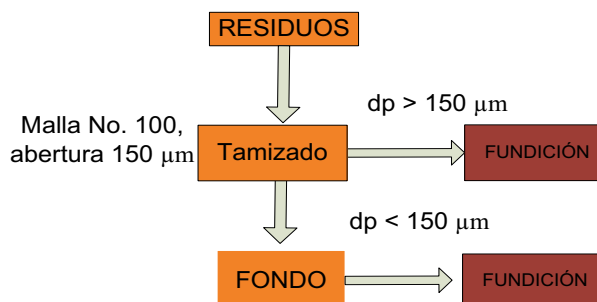


Figura 2.3. Esquema del proceso de tamizado y fundición de las fracciones mayores a 150 μm unidas.

- Se varió la carga fundente con cloruro de potasio y cloruro de sodio como se indica en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Combinación de las fracciones retenidas en las mallas 10, 50, 100. Temperatura 900 °C. Uso de diferentes cargas fundentes.

Cantidad de residuos > 150 μm (g)	Carga Fundente		
	KCl	NaCl	NaCl, KCl relación 1:1
60	15,00	-	-
60	-	15,00	-
60	-	-	15,00

Concluida la fundición de las fracciones, se determinaron los metales presentes por medio de un análisis de espectrometría de chispa en un equipo Q4 Tasman, en el laboratorio de Metalurgia Extractiva de la Escuela Politécnica Nacional. Para el análisis mencionado, se pulieron las superficies de tal forma que queden totalmente lisas.

2.2.1.3. Fundición de la fracción menor a 150 μm

El ensayo de fundición realizado a la fracción menor a 150 μm , siguió el procedimiento que se describe a continuación:

- Se pesó 30 g de la fracción menor a 150 μm y se lo colocó en un crisol de barro, con una relación de 33 % de residuos y 67 % de carga fundente.
- Se agregó 60 g de carga fundente conformado por bórax y carbonato de sodio en relación 1:1 (por cada gramo de carbonato, se añade un gramo de bórax).
- Se sometió el crisol a una temperatura de 900°C en un horno eléctrico durante un período de 90 minutos.

2.2.2. TEST TCLP

Se realizó el test de toxicidad de la escoria de fundición de las fracciones mayores a 150 μm (malla No. 100) y menores al tamaño mencionado. De igual forma se determinó la toxicidad de los residuos menores a 150 μm sin someterse a fundición y se realizó el siguiente procedimiento:

- Se mezcló el residuo sólido con agua en una relación sólido: líquido de 1:20, es decir, por cada gramo de sólido se colocó 20 ml de agua.
- Se reguló el pH a 4,5 con ácido acético. La solución se sometió a agitación continua (400 rpm) durante un período de 18 - 21 horas.
- Transcurrido el tiempo, se separó la fase sólida del extracto líquido.
- Se tomó una alícuota de 50 ml del extracto líquido y se analizó el contenido de metales pesados como Ag, Cd, Co, Cr, Pb, Zn, Mn, Hg, mediante el uso de un espectrofotómetro de absorción atómica con un equipo AAnalyst 300.
- Se determinó la peligrosidad del residuo mediante la comparación con el Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria (TULAS) para descargas líquidas. Si uno de los parámetros de los metales pesados

supera el límite máximo permisible, se considera el residuo como peligroso.

2.3. EVALUACIÓN DEL PROCESO DE CLASIFICACIÓN POR TAMAÑO EN HÚMEDO

Debido a la generación de polvos en el proceso de clasificación de tamaño en seco se procedió al tamizado por vía húmeda al 10% de sólidos (1 Kg de residuos en 10 L de agua). La separación y recirculación del agua que contiene los residuos menores a 150 μm , se realizó mediante los métodos de filtración y sedimentación que se describen en las secciones 2.4 y 2.5 respectivamente.

Al igual que el proceso de tamizado en seco, se realizó con el uso de los tamices estándares No. 10 (2mm), No. 50 (300 μm) y No. 100 (150 μm).

- Se tamizó por vía húmeda 1 Kg de residuos sólidos en un equipo FRITSCH Analysette durante un período de 20 min.
- Una vez tamizados, se secaron las fracciones retenidas en cada malla en una estufa a 110 °C por 3 horas. Posterior a ello, se registraron los pesos de cada fracción de residuos.

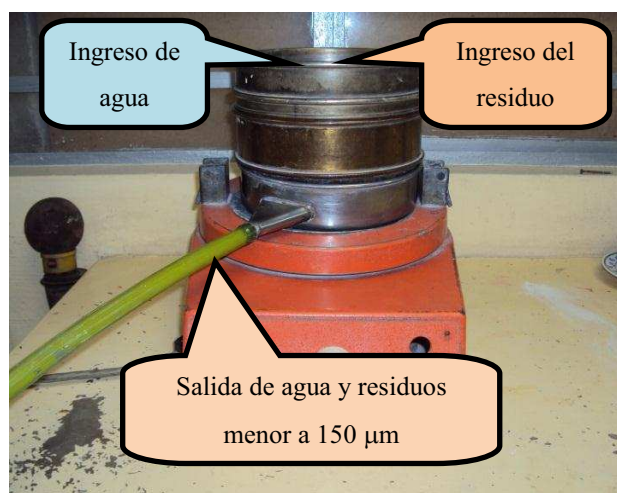


Figura 2.4. Equipo para la clasificación por tamaño en húmedo.

- Se separó la fracción menor a 150 μm contenida en el agua por medio de decantación y se secó a 110°C por 3 horas. Se registraron los pesos de cada fracción.
- Los residuos menores a 150 μm fueron almacenados y se recirculó el agua utilizada hacia un nuevo proceso de tamizado en húmedo.

2.4. INFLUENCIA DE LA FILTRACIÓN EN LA RECIRCULACIÓN DEL AGUA DEL TAMIZADO EN HÚMEDO

Los procesos de separación y purificación de agua, que contiene los residuos de fundición con tamaño de partícula menor a 150 μm , se realizaron por medio de filtración.

- Posterior a la clasificación por tamaño en húmedo, se filtró la solución en un equipo Sepor de 15 L de capacidad a 30 psi.
- Se tomó 50 ml del agua proveniente de la filtración.
- El agua filtrada fue recirculada hacia un nuevo ensayo de tamizado por vía húmeda.
- Se analizó la concentración de Cu, Zn, Fe, Pb, Al, Sn, Cr, As, Ba, Cd, Hg, Ni, Ag, Se, presentes en el efluente, por absorción atómica.

El proceso de tamizado, purificación y recirculación del agua por medio de filtración, se continuó con una nueva muestra de sólido, hasta que el contenido de metales en el efluente sea constante y superior a los valores establecidos en el TULAS para descargas líquidas.

2.5. INFLUENCIA DE LA SEDIMENTACIÓN EN LA RECIRCULACIÓN DE AGUA DEL TAMIZADO EN HÚMEDO

Se evaluó el uso de la recirculación de agua tratada mediante sedimentación por medio del uso de floculantes y sin el uso de estos.

Se realizaron pruebas de sedimentación en probetas, que por medio de la medición de altura de la interface en la pulpa se determinó la velocidad de sedimentación.

2.5.1. ENSAYOS DE SEDIMENTACIÓN CON FLOCULANTES

Concluido el proceso de tamizado en húmedo, se homogenizó la solución (agua que contiene los residuos menor a 150 μm) y se tomaron muestras en probetas de vidrio de 2 L de capacidad. Se efectuó 10 ensayos de sedimentación con floculantes y se realizó mediciones de alturas (ubicación de la interface entre el sólido y el agua respecto al tiempo) en cada una de las probetas para la determinación de la velocidad de sedimentación.

Se utilizaron los siguientes agentes floculantes, como se indica en la Tabla 2.2.:

Tabla 2.2. Tabla de floculantes y concentraciones.

Agente Floculante	Concentración (g/L)	Agente Floculante	Concentración (%)
Sulfato de aluminio	0,5	Cal	0,1
Cloruro férrico	1		0,25
	0,5		0,4
Poliacrilamida	1		0,5

Se midió el pH de cada solución contenida en las probetas respectivas.

Transcurridas 24 horas del ensayo de sedimentación, se tomó una muestra de efluente de cada probeta y se realizó un análisis de los metales pesados: Cu, Zn, Fe, Pb, Al, Sn, Cr, As, Ba, Cd, Hg, Ni, Ag, Se, por espectrofotometría de absorción atómica a fin de determinar la dilución de metales pesados en el efluente respecto al agente floculante utilizado.

2.5.1.1. Determinación de la velocidad de sedimentación

Para determinar la velocidad de sedimentación, se trasladó los datos de altura respecto al tiempo en su respectiva gráfica.

Se trazó una recta, tangente a la gráfica iniciada en el tiempo cero. El cruce entre la recta y el eje de las abscisas (que corresponde al tiempo), formará una pendiente del cual se obtuvo la velocidad de sedimentación como se indicó en la Figura 1.17 de la Sección 1.2.3. (Tchobanoglous y Burton, 1995, p. 220)

2.5.1.2. Determinación del mejor floculante en la sedimentación de los residuos sólidos de fundición

Se seleccionó el mejor agente floculante bajo los siguientes parámetros que se mencionan a continuación:

- La velocidad de sedimentación sea mayor en comparación al resto de los agentes floculantes que se describen en la Tabla 2.2. (sección 2.5.1).
- El pH de la solución no varíe (pH cercano a 7) al adicionar el agente floculante, para facilitar el tratamiento y descarga del efluente.

2.5.2. SEDIMENTACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS DE FUNDICIÓN Y RECIRCULACIÓN DE AGUA

- Posterior a la clasificación por tamaño en húmedo, se adicionó el mejor agente floculante determinado en la sección 2.5.2.
- Transcurridas 24 horas, se tomó una alícuota del efluente proveniente de la sedimentación.
- Se recirculó el efluente hacia un nuevo ensayo de tamizado por vía húmeda.
- Se analizó la concentración de Cu, Zn, Fe, Pb, Al, Sn, Cr, As, Ba, Cd, Hg, Ni, Ag, Se, presentes en el efluente, por espectrofotometría de absorción atómica.

En el proceso de tamizado, purificación y recirculación del agua por medio de sedimentación, se continuó con una nueva muestra de sólido, hasta que el contenido de metales en el efluente sea constante y superior a los valores establecidos en el TULAS para descargas líquidas y su posterior tratamiento. El tratamiento del efluente se realiza ya que los metales se saturan en el mismo e impide el tratamiento del residuo.

2.5.3. LIXIVIACIÓN A LOS RESIDUOS TRATADOS POR FILTRACIÓN Y SEDIMENTACIÓN

El proceso de lixiviación se realizó a los residuos tratados previamente por filtración y sedimentación.

- Se realizó lixiviación ácida con una solución de 120 g/L de ácido sulfúrico (H_2SO_4) y lixiviación básica con una solución de 100 g/L de hidróxido de sodio (NaOH).
- La lixiviación se realizó con una preparación de la solución al 10 % y 30 % de sólidos a 400 rpm por un periodo de 24 horas, como indica la Tabla 2.3.
- Transcurrido el tiempo de lixiviación se filtró las soluciones y se midió la cantidad de efluente recolectado con una probeta (a la que se llamará en adelante **solución fuerte**).

- Se lavó el residuo filtrado con agua destilada (mitad del agua respecto a la solución ácida o básica utilizada en la lixiviación). El agua utilizada para el lavado se llamará en adelante **solución de lavado**.
- Se tomó una alícuota de la solución tanto de filtrado como de lavado y se realizó un análisis de Cu, Fe, Pb y Zn mediante absorción atómica.
- Los residuos lixiviados, fueron recolectados y pesados en una balanza para determinar la recuperación que se produce con cada uno de los medios de lixiviación colocados (lixiviación en medio ácido ó básico).

Tabla 2.3. Porcentaje de sólidos y tipo de lixiviación.

Tipo de residuo tratado	Tipo de lixiviación	Porcentaje de sólidos (%)	Tipo de residuo tratado	Tipo de lixiviación	Porcentaje de sólidos (%)
Sedimentación	H ₂ SO ₄	10	Filtración	H ₂ SO ₄	10
	120 g/L	30		120 g/L	30
	NaOH	10		NaOH	10
	100 g/L	30		100 g/L	30

- Terminado el proceso de recolección de la solución fuerte y de lavado, se recolectó 10 g de la muestra de residuos.
- Se sometió al proceso de toxicidad TCLP por medio de la metodología descrita en la sección 2.2.1.2.

De los resultados obtenidos del test TCLP, se determinó y se seleccionó el proceso que generó menor liberación de metales al ambiente, puesto que mostraría una estabilización del residuo durante el tratamiento.

2.6. ESTABILIZACIÓN DE LOS RESIDUOS TAMIZADOS NO RECUPERABLES

La estabilización de residuos se realizó con el uso de cemento y áridos finos como agentes estabilizantes a fin de inmovilizar la migración de los metales

pesados (Cu, Fe, Pb, Zn) hacia el medio ambiente. La reducción de la peligrosidad del residuo, se hizo por medio de la elaboración de bloques o adoquines (Sánchez et al., 2000, p. 383).

2.6.1. MATERIALES Y FORMULACIÓN DE LOS RESIDUOS PARA LA ELABORACIÓN DE ADOQUINES

Se utilizó como agentes estabilizantes cemento y áridos finos. Se fabricaron adoquines con los residuos que se presentan a continuación:

- Escoria proveniente del proceso de fundición.
- Residuos de fundición menor a 150 μm provenientes del tamizado en seco.
- Residuos de fundición menor a 150 μm provenientes del tamizado en húmedo y tratados por filtración o sedimentación.
- Residuo proveniente de la lixiviación y que liberó la menor cantidad de metales en el test TCLP mencionado en la sección 2.5.4.

De éstos se realizó la composición de los adoquines como se indica en la Tabla 2.4 (Flores, 2006, p. 30).

Tabla 2.4. Composición de los adoquines.

Materiales	Composición (%)		
	Residuos	5	10
Cemento	28	25	20
Áridos Finos	52	50	45
Agua	15	15	15

En función a la Norma Técnica Ecuatoriana (NTE INEN) 1488:87; se elaboró adoquines de 18 cm de largo, 6,5 cm de alto y 12 cm de espesor.

2.6.2. ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Concluida la elaboración de los adoquines, se expusieron por un período de 28 días a condiciones ambientales. Transcurrido el tiempo mencionado, se realizaron pruebas de resistencia a la compresión como indicó la norma NTE INEN 1488:87 (Anexo XV). Los ensayos de compresión se realizaron en el laboratorio de Ensayos de Materiales de la Carrera de Ingeniería Civil. El resumen del ensayo de compresión se presenta en la Figura 2.5.



Figura 2.5. Procedimiento para el ensayo de compresión de adoquines.

2.6.2.1. Preparación de la muestra para el ensayo de compresión

De acuerdo con la Norma INEN 1488:87; posterior a su almacenamiento de 24 horas en agua a temperatura ambiente como se presenta en la Figura 2.5, los adoquines se sometieron al ensayo de compresión en condiciones húmedas.

2.6.2.2. Ensayo de compresión

Los ensayos de compresión se realizaron mediante un equipo Suz Pecar Servosis.

El equipo mencionado es una máquina equipada con dos placas planas de acero por el lado superior e inferior y la sección intermedia en donde se colocó el adoquín, como se indica en la Figura 2.6.



Figura 2.6. Equipo Suz Pecar Servosis utilizado para la compresión de adoquines.

Las placas comprimieron al adoquín hasta que éste se fracture. El equipo presenta los datos de resistencia y el tiempo de resistencia.

2.6.3. ANÁLISIS DE TCLP DE LOS ADOQUINES

- Se tomó 10 g de muestra de cada adoquín cuya composición fue de 5, 10 y 20%.
- Luego de ello, se realizaron test de TCLP con una relación de 1:20 (10 g de adoquines en 200 ml de agua) de cada uno de ellos; siguiendo el procedimiento detallado en la sección 1.1.3.2.

- Se separó la fase sólida del extracto líquido y se analizó el contenido de metales pesados como Ag, Cd, Co, Cr, Pb, Zn, Mn, Hg mediante el uso de un espectrofotómetro de absorción atómica.

2.7. DIAGRAMA DE FLUJO Y DIMENSIONAMIENTO DE EQUIPOS

2.7.1. DIAGRAMA DE FLUJO

Se realizó el diagrama de flujo de los procesos descritos en las secciones 2.2, 2.3, 2.4 y 2.5 que se enlistan a continuación:

- Proceso de clasificación por tamaño en seco.
- Proceso de clasificación por tamaño en húmedo.
- Influencia de la filtración en la recirculación de agua del tamizado en húmedo.
- Influencia de la sedimentación en la recirculación de agua del tamizado en húmedo.

La selección del diagrama de flujo, se determinó en base al siguiente criterio:

- La estabilización de los residuos tratados por medio de la conformación de adoquines, presenta una gran resistencia al ensayo de compresión.
- En las pruebas de TCLP las concentraciones de los metales pesados, analizados por absorción atómica, son bajos y cumplen con las normas establecidas por la EPA. (Tabla 1.3, sección 1.1.3.2)
- En el proceso de tamizado en húmedo exista la mayor cantidad de recirculaciones de agua posible y no disuelva los metales pesados en el efluente.

2.7.2. DISEÑO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS DE FUNDICIÓN

El diseño conceptual de una planta de tratamiento de residuos sólidos de fundición se realizó en base al diagrama de flujo determinado en la sección 2.7.1 para el dimensionamiento de los equipos, correspondientes a las operaciones necesarias para el tratamiento. Adicionalmente, el dimensionamiento y capacidad de los equipos fue realizado en función de la cantidad de residuos sólidos de fundición que serán tratados.

La obtención de los flujos de cada operación del diagrama, se hizo calculando las corrientes principales mediante balances de masa de acuerdo con la ecuación de la conservación de la materia que se describe en la ecuación 2.3.

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

Del cual:

A = Acumulación, E = Entra, S = Sale, C = Consume y G = Genera

Sin embargo, no existe reacciones dentro del proceso, por tanto la ecuación 2.3 se definió como:

$$A = E \quad [2.4]$$

2.7.3. DIMENSIONAMIENTO Y CAPACIDAD DE LOS EQUIPOS

La selección de los equipos se realizó en base al diagrama de flujo seleccionado y el dimensionamiento de estos en función a la cantidad de residuos que se tratarán mensualmente. Se estableció la capacidad de los equipos requeridos tales como son: tanque de mezclado, tamiz vibratorio, filtro prensa, equipo de vibrocompactación.

2.7.3.1. Tanque de mezclado

La capacidad del tanque utilizado para mezclar el sólido con el efluente (agua) se dimensionó a partir del flujo volumétrico que se trata, y el tiempo de residencia, por lo que la ecuación se determinó de la siguiente forma:

$$C = Q * tr \quad [2.5]$$

En donde:

C = capacidad del tanque, m³

Q = Caudal o flujo volumétrico, m³/h

tr = tiempo de residencia, h.

El diámetro del tanque se determinó por medio de la ecuación:

$$C = A_s * H \quad [2.6]$$

En el que A_s es el área superficial (en m²) y H es la altura (m) del tanque. A_s se puede determinar como:

$$A_s = \pi * D^2 / 4 \quad [2.7]$$

Donde D es el diámetro, en m.

2.7.3.2. Tamizado

La capacidad y dimensión de tamizado se determinó con el cálculo del área que se presenta en la siguiente ecuación:

$$\text{Área (ft}^2\text{)} = \frac{\text{Alimentación-Sobretamaño}}{a*b*c*d*e*F} \quad [2.8]$$

Donde:

- a = corrección por la forma de las aberturas.
- b = porcentaje de alimentación al deck que es la mitad del tamaño de la abertura de la abertura de la superficie del harnero.
- c = factor de corrección obtenido para una eficiencia del tamiz de 94 %, con un valor de uno.
- d = corrección por el material fino de alimentación.
- e = corrección por la posición del tamiz en el sistema.
- F = por lo general se da un valor de uno, dependiendo del piso de tamiz.

2.7.3.3. Filtro

El dimensionamiento del filtro se realizó por medio de la información de las corrientes de entrada y de salida del proceso. En base al tipo de filtro a utilizarse, se eligen las dimensiones promedio para el equipo y el tamaño del filtro.

Un filtro prensa se utiliza en los procesos por lotes, pero no se emplean para procesos de alto rendimiento. Se manejan con gran facilidad, son versátiles y de operación flexible y se pueden utilizar a altas presiones si es necesario, con soluciones viscosas o cuando la torta del filtro tiene una gran resistencia.

Para determinar el volumen total del filtro prensa, se utilizó la ecuación propuesta por la compañía Siemens para los J-Press ® filtro prensa para remover líquidos industriales y municipales:

$$\begin{aligned}
 \text{Volumen total} \\
 \text{del} \\
 \text{filtro prensa} \\
 (\text{ft}^3 \text{ o } L)
 \end{aligned}
 = \frac{\text{Volumen de} \\
 \text{alimentación} \\
 (\text{gal o } L) \cdot \% \text{ sólidos en} \\
 \text{la entrada} \cdot \text{densidad} \\
 \text{del agua} \cdot \text{peso específico} \\
 \text{del fango o lodo}}{\text{densidad de la} \\
 \text{torta del filtro húmeda} \cdot \% \text{ sólidos seco en} \\
 \text{la torta del filtro}}
 \quad [2.9]$$

En donde el % de sólidos se expresó en forma decimal (por ejemplo: 30% = 0,3) y la densidad del agua se reportó de acuerdo a las unidades utilizadas, el lb/gal o en Kg/L.

De acuerdo con la ecuación [2.9], se registró el volumen del filtro prensa como:

$$\begin{aligned} \text{Volumen total} \\ \text{del} \\ \text{filtro prensa} \\ (\text{ft}^3 \text{ o L}) \end{aligned} = \frac{\begin{array}{c} \text{sólidos secos} \\ (\text{lb o Kg}) \\ \text{densidad de la torta} \\ \text{y \% de sólidos} \end{array}}{\begin{array}{c} (\text{ft}^3 \text{ o Kg/L}) \end{array}} \quad [2.10]$$

En base al volumen requerido, se dimensionó el filtro prensa por medio de catálogos.

2.7.3.4. Equipo de compactación

El sistema de compactación consta de: tanque mezclador y el vibrocompactador como se indica en la Figura 2.7

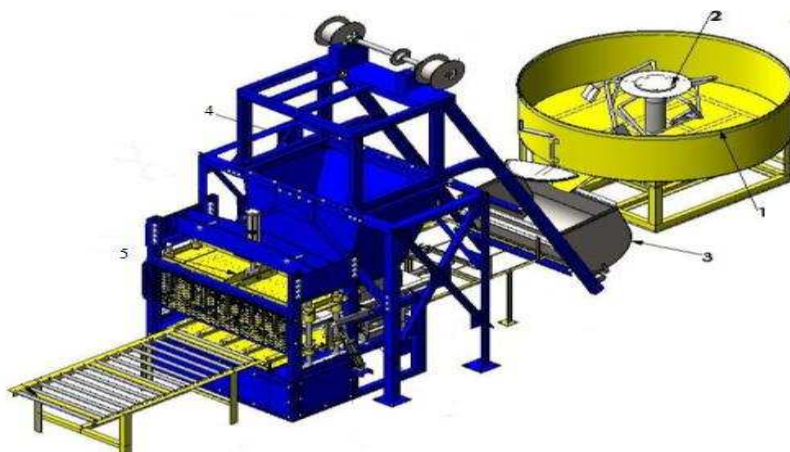


Figura 2.7. Sistema de compactación

De la Figura 2.7 se determinan los siguientes equipos que son principales para el sistema de conformación de bloques automática.

1. Tanque de mezclado.
2. Paleta para mezclado.
3. Cangilón para alimentación.
4. Tolva de alimentación.
5. Vibrocompactador.

Tanque de mezclado. Se determinó la capacidad del tanque de mezclado mediante la ecuación de volumen que ocupa la mezcla por medio de la siguiente dosificación de las materias mencionadas en la Tabla 2.4 de la sección 2.6.1.

$$V_{tanque} = m_{mezcla} / \delta_{mezcla} \quad [2.11]$$

En donde m_{mezcla} está en Kg, y δ_{mezcla} en Kg/m³.

Vibrocompactador. El vibrocompactador se diseñó de acuerdo a las dimensiones del bloque que se elaborará y de acuerdo con la capacidad de bloques que se formarán en el equipo.

$$V_{bloque} = \text{dimensiones del bloque, m}^3 \quad [2.12]$$

La masa del bloque se determinó por medio de la densidad de la mezcla.

$$m_{bloque} = V_{bloque} * \delta_{mezcla} \quad [2.13]$$

De acuerdo a la ecuación [2.12] y [2.13] se determinó el número de bloques que se elaborarán. La selección del equipo requerido fue tomada en cuenta por su capacidad de procesamiento de bloques.

2.8. EVALUACIÓN ECONÓMICA PRELIMINAR

La evaluación preliminar respecto al diseño de la planta de tratamiento se realizó por medio de la recopilación de las informaciones técnicas de cada equipo requerido y del espacio físico necesario para los mismos; de igual manera, se estimó la inversión y los costos de operación de la planta de tratamiento. Esta evaluación es aquella que va a decidir la factibilidad del proyecto y su respectiva construcción.

La factibilidad económica se determinó mediante el cálculo del valor actual neto, mejor conocido como VAN, y de la tasa interna de retorno, conocido como TIR.

El VAN se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$VAN = -A + \sum_{t=1}^n Ft * (1 + i)^{-t} \quad [2.14]$$

De donde:

Ft = es el valor neto de los diversos flujos de caja, es decir, la diferencia entre los valores positivos y negativos.

i = tasa de retorno del período.

El TIR se obtiene cuando hace que una inversión sea igual a cero.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICO - QUÍMICA Y MINERALÓGICA DE RESIDUOS SÓLIDOS DE FUNDICIÓN DE LATÓN

La caracterización de los residuos fue realizada de acuerdo al procedimiento que se expuso en la sección 2.1.1. Sin embargo, la caracterización química y mineralógica se determinó a partir de la fracción de residuos menor a 150 μm como se explica en la sección 3.2.1.1.

3.1.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICA

3.1.1.1. Densidad aparente, densidad real y determinación de pH de los residuos sólidos

La densidad aparente se determinó por medio de la ecuación 2.1, de la sección 2.1.1.1; de igual forma la densidad real se realizó con el método del picnómetro descrito en la sección 2.1.1.2. El resultado de la densidad real, aparente y pH de los residuos de fundición de latón se presenta en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Densidad real, aparente y pH de los residuos de fundición.

Parámetro	Valor	Unidades
Densidad real	3,6	g/mL
Densidad aparente	1,2	g/mL
pH	7	-

Como se puede observar en la Tabla 3.1 la densidad real del residuo de fundición es 3,6 g/mL, esto podría indicar que el material no solamente contiene latón (8,6 g/mL) sino que posee otros metales en su composición.

Como se indicó en la sección 2.1.1.4, la determinación del pH de los residuos sólidos de fundición de latón se realizó preparando una solución al 50 % de sólidos. En este caso el valor de pH permanece neutro, eso se debe a que luego de la fundición en un reverbero abierto, el latón tiende a oxidarse y es separado en forma de “nata” de la superficie de fundición. De esta forma, el contacto del residuo con el agua no se ve afectado y su valor es de 7.

3.1.1.2. Granulometría de los residuos sólidos

De acuerdo al procedimiento de la sección 2.1.1.3, respecto a la determinación de la granulometría del residuo de fundición por medio del uso de los tamices mencionados, se obtiene la Tabla A.1 del Anexo I y se presenta un resumen en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Análisis Granulométrico

Número de malla (# mesh)	Abertura de la malla (μm)	Pasado acumulado (%)
4	4750	91,1
6	3350	87,7
8	2360	83,9
10	2000	81,2
16	1000	55,7
30	550	44,8
50	300	29,7
70	208	22,1
100	150	16,0
150	104	10,8
200	74	5,9
-200	-74	0,0

La Tabla 3.2 muestra el análisis granulométrico y presenta un d_{80} de 2000 μm (2 mm) para el residuo.

De igual manera se puede observar que el 30 % de los residuos pasan la malla cuya abertura es de 300 μm y alrededor del 16 % son menores a 150 μm , por lo que los residuos contienen fracciones con tamaños de partícula pequeños y que resultan complicados de separarlos en su totalidad mediante tamizado en seco, debido a que se adhieren a los residuos de mayor tamaño de partícula.

3.1.2. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS

Para la caracterización química se separó los residuos en dos fracciones, mayor a 150 μm y menor al tamaño mencionado.

La concentración de los metales presentes se indica en la Tabla 3.3, el cual siguió el procedimiento descrito en la sección 2.1.2.

Tabla 3.3. Análisis Químico de residuo.

Elementos	Residuo > 150 μm	Residuo < 150 μm
Al (%)	1,20	7,81
Ba (%)	0,01	0,01
Zn (%)	33,23	47,89
Cu (%)	61,09	43,65
Fe (%)	3,54	0,41
Ni (%)	0,20	0,29
Pb (%)	0,63	1,05
As (mg/Kg)	38,12	68,90
Cr (mg/Kg)	0,03	0,05
Ag (mg/Kg)	4,01	49,85

Los residuos de tamaño superior a 150 μm presentan concentraciones de cobre de 61,09 % y de cinc de 33,23 %, los cuales poseen características del latón comercial (65 % de Cu y >35 % de Zn).

La fracción inferior a 150 μm está compuesta por cinc (47,9 %) y cobre (43,7 %). Este resultado indica que a partir de la fracción de residuo mencionada no posee la característica del latón comercial y que contiene una mayor cantidad de cinc. Adicionalmente, ambas fracciones analizadas contienen aluminio y menores cantidades de plomo, hierro y arsénico los cuales indican la posible adición de fundentes para la fundición de latón en la empresa que elabora grifería.

3.1.3. CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA

Los resultados de la caracterización mineralógica de los residuos de tamaño menor a 150 μm mediante difracción de rayos X se presentan en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Análisis por Difracción de Rayos X, fracción de residuo menor a 150 μm .

Compuesto	Fórmula	Contenido (%)
Cincita	ZnO	80
Cobre	Cu	10
Cinc	Zn	4
Cuarzo	SiO ₂	1
Gahnite	ZnAlO ₄	2
Wuestita	FeO	1
Betehtinite	Pb ₂ Cu ₂₁ S ₁₅	1
Níquel-Cinc-Cobre	Ni, Cu, Zn	1

La Tabla 3.4 corresponde a los compuestos contenidos en la fracción menor a 150 μm . Como podemos observar la mayor cantidad es cincita (80 %) ya que durante la fundición de latón se adiciona óxidos para disminuir la temperatura de fusión. Adicionalmente, pequeñas cantidades de cobre (10 %) y cinc (4 %) se encuentran de forma metálica y que quedaron retenidas en la fracción menor a 150 μm . De igual manera se presencia aleaciones en pequeñas cantidades como cuarzo, gahnite, westita que se produce por la oxidación con el ambiente ya que la fundición en reverberos se realiza al ambiente.

3.2. EVALUACIÓN DEL PROCESO DE CLASIFICACIÓN POR TAMAÑO EN SECO Y CARACTERIZACIÓN DE FRACCIONES

De acuerdo al proceso de tamizado en seco se registró los porcentajes correspondientes a cada fracción de residuos retenido en las mallas como indica la Figura 3.1.

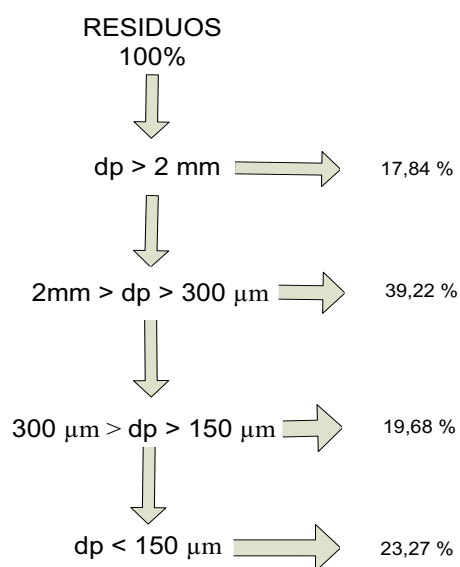


Figura 3.1. Fracción de residuos retenidos en cada malla.

La mayor cantidad del residuo tiene un tamaño entre 2 mm y 300 μm (39 %). Sin embargo, como se mencionó en la Tabla 3.3 respecto a la caracterización química, las fracciones mayores a 150 μm poseen porcentajes de Cu (65 %) y Zn (33 %) correspondientes al latón comercial y que pueden regresar a procesos de fundición para la elaboración de grifería.

Por otro lado el 23 % de los residuos tienen un tamaño inferior a 150 μm y que posee características diferentes al latón comercial (indicado en la Tabla 3.3). Esta fracción del residuo presenta en su composición la mayor cantidad de cinc en forma de óxido (80% de cincita, indicado en la Tabla 3.4).

3.2.1. CARACTERIZACIÓN DE LAS FRACCIONES RETENIDAS EN CADA MALLA

La caracterización de cada una de las fracciones retenidas posterior a la clasificación por tamaño en seco; se presentan en las secciones 3.2.1.1, 3.2.1.2:



a)



b)



c)



d)

Figura 3.2. Fracciones los residuos de fundición retenidas en cada malla posterior a la clasificación por tamaño en seco. a) malla No. 10 (2 mm); b) malla No. 50 (300 µm); c) malla No. 100 (150 µm); d) fondo (<150 µm).

La Figura 3.2 presenta las fracciones retenidas en cada malla posterior al tamizado en seco. Como se puede observar en la Figura 3.2 a y b, existen pequeñas cantidades de residuos menores a 150 µm que están adheridas a las fracciones mayores a 150 µm que le dan un color opaco diferente al color característico de latón (dorado).

3.2.1.1. Ensayo de fusión

- **Fundición de las fracciones mayores a 150 μm por separado**

Durante las pruebas de fusión en crisoles de arcilla a 900 °C en un horno eléctrico, se adicionaron cantidades de carga fundente (KCl) que se presentan en la Tabla 3.5. De estos se determinó los porcentajes de recuperación de la fase metálica.

Tabla 3.5. Recuperación de la fase metálica del residuo por proceso de fusión.
Temperatura de fusión: 900 °C.

Abertura malla (μm)	Muestra residuo (%)	KCl (%)	Recuperación de la fase metálica (%)
2000	77,0	23,0	70,0
300	77,0	23,0	69,0
150	77,0	23,0	54,0
<150	77,0	23,0	No se funde

Como se puede observar, las fracciones mayores a 150 μm , no presentaron problemas de fundición con la adición de KCl, y representan un promedio de la recuperación metálica de 64,3 %.

La fracción menor a 150 μm presentó problemas en la fundición; esto se debe a que las sales de cloro son utilizadas para evitar la oxidación de zinc en su fase metálica y como se indicó en la caracterización mineralógica, la fracción menor a 150 μm posee el mayor porcentaje en forma de cincita.

- **Fundición de la mezcla de las fracciones mayores a 150 μm**

La mezcla de las fracciones mayores a 150 μm para el ensayo de fusión y la variación de fundentes, se presenta en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6. Recuperación de la fase metálica de las fracciones + 2 mm, + 300 μm y + 150 μm unidos utilizando diferentes fundentes. Temperatura 900°C

Tipo de fundente	Muestra (%)	Fundente (%)	Recuperación de la fase metálica (%)
KCl	77,0	23,0	69,45
NaCl	77,0	23,0	67,27
NaCl KCl	77,0	12,5 12,5	63,82

Como se puede observar en la Tabla 3.6, la variación de cloruros, representan una similitud en cuanto a la recuperación de la fase metálica de los residuos de fundición (67%), sin embargo la combinación de NaCl y KCl produce una disminución en la recuperación metálica.

La comparación realizada entre la Tabla 3.5 y la Tabla 3.6, se observa que existe una similitud de la recuperación de la fase metálica. Este hecho indica que para el proceso de fundición se puede utilizar KCl como carga fundente y obtener los mismos resultados al mezclar las fracciones mayores a 150 μm .

- **Fundición de la fracción menor a 150 μm**

La fracción menor a 150 μm se sometió a un ensayo de fundición con bórax y carbonato de sodio como fundentes al 67 % respecto a la muestra; el cual muestra una recuperación máxima de 30 %, de acuerdo a la Tabla 3.7.

Tabla 3.7. Recuperación metálica en la fundición, fracción menor a 150 μm

Tipo de fundente	Tamaño de partícula < 150 μm (%)	Fundente (%)	Recuperación de la fase metálica (%)
Bórax Carbonato de Sodio	33,0	33,5 33,5	30,30

Las fracciones mayores a 150 μm no presentaron problemas de fundición con KCl como carga fundente como se indico en la Tabla 3.6, por lo que pueden retornar al proceso de fundición original para la elaboración de grifería.

Por otro lado la fracción menor a 150 μm se fundió con el uso de bórax y carbonato de sodio como fundentes adicionales, lo cual permitió recuperar la fracción metálica indicada en la Tabla 3.4 de la caracterización mineralógica.

Se realizó un análisis por espectrofotometría de chispa para determinar el contenido de cinc y cobre presente en cada fracción como se indica en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8. Concentración de los elementos analizados de la fracción mayor de 150 y la fracción menor a 150 μm .

Elemento (%)	MUESTRA						
	Fundente KCl			Malla + No. 10, + No. 50, + No. 100 unidos			Fundente Bórax, NaCO ₃
	+ No. De malla (Abertura)			Carga Fundente			- No. De malla (Abertura)
	No. 10 (> 2mm)	No. 50 (> 300 μm)	No. 100 (> 150 μm)	KCl	NaCl	KCl NaCl	No. 100 (< 150 μm)
Cu	65,25	65,78	66,37	62,98	65,91	63,84	90,08
Zn	31,75	31,39	30,61	34,20	31,25	33,36	6,11
Pb	1,724	1,648	1,841	1,654	1,711	1,636	3,35
Fe	0,528	0,606	0,582	0,588	0,558	0,615	0,01
Sn	0,299	0,345	0,38	0,353	0,35	0,322	0,23
Ni	0,091	0,105	0,106	0,097	0,096	0,099	0,09
Sb	0,028	0,027	0,027	0,031	0,027	0,028	0,01
Te	0,027	0,028	0,023	0,029	0,024	0,028	0,03
Si	0,008	0,02	< 0,005	0,019	0,012	0,018	-
Nb	0,003	0,003	0,004	0,003	0,004	0,010	-
Ag	0,008	0,009	0,01	0,009	0,010	0,010	-
As	0,005	0,005	0,005	0,006	0,005	0,010	-

La concentración de cobre representa alrededor del 65 %, cinc el 31 %, plomo 1,7 % y hierro 0,6 % para los residuos mayores a 150 μm . Estos valores cumplen con las características del latón comercial como se indicó anteriormente en la caracterización química.

La fracción menor a 150 μm , presenta una mayor cantidad de cobre (90 %) y de cinc (6%), lo cual no corresponde a las características de latón comercial y que son pertenecientes a bronce (>85 % de Cu y <6 % de Zn).

Existen de igual forma presencia de otros metales como Si, Nb, Ag y As en porcentajes menores a 0,008 % por lo que no presentan mucha importancia.

Debido a que la fracción menor a 150 μm presentó problemas en la fundición utilizando sales de cloro, se realizó el tratamiento de éstos mediante tamizado en húmedo y la estabilización de los residuos resultantes de este proceso.

3.2.1.2. Test TCLP a la fracción de residuo menor de 150 μm

Se determinó la peligrosidad al ambiente a la escoria proveniente de la fundición (TCLP 2) y la fracción del residuo menor a 150 μm sin someterse al ensayo de fusión (TCLP 1), con el procedimiento descrito en la sección 2.2.2 y mediante la comparación con los límites máximos permisibles de los metales que se describen en la Tabla 1.2 de la sección 1.1.3.1.

De igual forma se realizó el análisis de toxicidad para la escoria procedente de la fusión de las fracciones mayores a 150 μm (TCLP 3). De esta manera, se obtuvo los resultados que se presentan en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9. Concentración de los elementos por test TCLP. Fracción del residuo menor a 150 μm .

Elemento	TCLP 1 Residuo < 150 μm Sin fundición	TCLP 2 Residuo < 150 μm Escoria de fundición	TCLP 3 Residuo > 150 μm Escoria de fundición	Límite máximo permisible*
Zn (mg/L)	10300	134	9	10
Cu (mg/L)	1 000	0,40	0,07	5,0
Cr (mg/L)	<0,01	<0,01	<0,01	5,0
Ba (mg/L)	<0,1	<0,1	<0,1	100,0
Ni (mg/L)	0,2	0,14	0,08	2,0
Ag (mg/L)	<0,01	<0,01	<0,01	5,0
Pb (mg/L)	162	0,60	0,10	5,0
Se ($\mu\text{g/L}$)	<0,1	<0,1	<0,1	1,0
As ($\mu\text{g/L}$)	<0,1	<0,1	<0,1	5,0
Hg ($\mu\text{g/L}$)	<0,1	<0,1	<0,1	0,2

(*EPA, 2003)

La Tabla 3.9 presenta los análisis de toxicidad mediante el ensayo de TCLP en los cuales TCLP 1 es referente al análisis de toxicidad de los residuos menores a 150 μm que no fueron sometidos al ensayo de fusión; mientras que, TCLP 2 es la prueba de toxicidad realizada a la escoria proveniente de la fundición de los residuos menores a 150 μm .

El resultado de TCLP hacia la escoria del ensayo de fundición de la fracción mayor a 150 μm (TCLP 3) posee concentraciones por debajo de los límites establecidos por la EPA, por tanto toman el carácter de no peligroso.

Sin embargo, como se puede observar en los análisis de TCLP a la fracción menor a 150 μm , las concentraciones de Pb, Zn y Cu (Pb en el residuo no sometido a fundición) superan la Norma vigente de la EPA. Por lo tanto, la fracción del residuo menor a 150 μm toma el carácter de peligroso.

Las elevadas concentraciones presentadas, muestran que los residuos requieren de un tratamiento de estabilización previo a su disposición final.

3.3. EVALUACIÓN DEL PROCESO DE CLASIFICACIÓN POR TAMAÑO EN HÚMEDO

Como se indicó en la sección 2.3, se realizó el proceso de tamizado en húmedo debido a la generación de polvos.

3.3.1. GRANULOMETRÍA EN EL TAMIZADO EN HÚMEDO

La granulometría realizada por medio de tamizado en húmedo, se muestra en la Tabla A.2 que se presenta en el ensayo No. 2 del Anexo I; y en la Tabla 3.10.

Si realizamos una comparación con la sección 3.1.1.2, respecto a su granulometría en clasificación de tamaño en seco, se observa que el proceso de tamizado en húmedo redujo la generación de polvos, permitió la limpieza de los residuos en cada fracción retenida.

Tabla 3.10. Análisis granulométrico

Tamiz malla #	Abertura (µm)	Pasado acumulado (%)
4	4750	91,4
6	3350	88,2
8	2360	84,8
10	2000	82,2
16	1000	57,1
30	550	48,9
50	300	36,8
70	208	29,2
100	150	24,3
150	104	16,8
200	74	8,6
-200	0	0,0

De acuerdo con la Tabla 3.10, los residuos presentan un d_{80} de alrededor de 2 000 μm . Por tanto, existe una similitud entre la granulometría del tamizado en húmedo y en seco (sección 3.1.1.2); sin embargo, al utilizar agua se evitó la generación de polvos o partículas finas de la fracción inferior a 150 μm que se adhieren a las otras fracciones como se observa claramente en la Figura 3.3.

En la Figura 3.3 se puede observar las fracciones mayores a 150 μm , presentan fracciones más limpias (fracción menor a 150 μm no adherida a las otras fracciones) en comparación con la Figura 3.2 de la sección 3.2.1. Sin embargo el porcentaje que representa la fracción menor a 150 μm , se mantiene en aproximadamente 23 %.

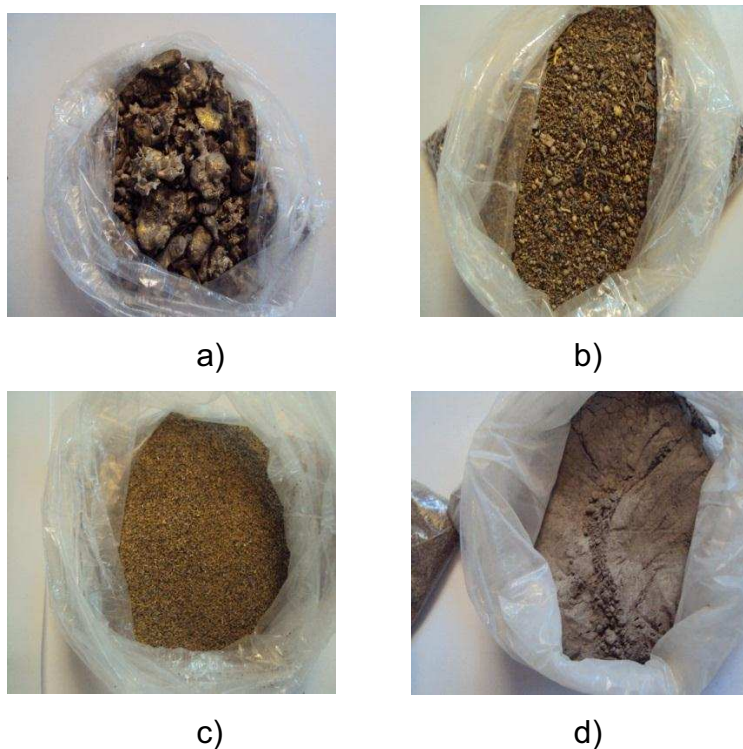


Figura 3.3. Fracciones los residuos de fundición retenidas en cada malla posterior a la clasificación por tamaño en húmedo. a) malla No. 10 (2 mm); b) malla No. 50 (300 μm); c) malla No. 100 (150 μm); d) fondo (<150 μm).

El hecho de utilizar tamizado en húmedo permite la facilidad de fundición de las fracciones con las sales de cloro y de la disminución de escoria formada en la fusión.

3.4. INFLUENCIA DE LA FILTRACIÓN EN LA RECIRCULACIÓN DEL AGUA DEL TAMIZADO EN HÚMEDO

Posterior al proceso de clasificación por tamaño en húmedo, se realizó la separación entre el agua y sólidos. La influencia del proceso de purificación del agua por medio de filtración se determinó por medio del análisis de la concentración de metales presentes en el efluente, como se indica en la Tabla 3.11.

De acuerdo a la concentración de metales, se determinó el número de reciclo de agua que se puede realizar.

Tabla 3.11. Concentración de los elementos en la clasificación en húmedo, purificación del agua mediante filtración.

Elemento	MUESTRA						
	Agua Residuo de Fundición						
	Agua Original	Primer Reciclo	Segundo Reciclo	Tercer Reciclo	Cuarto Reciclo	Quinto Reciclo	Sexto Reciclo
Al (mg/l)	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1
Cu (mg/l)	0,1	0,11	0,13	0,1	0,08	0,08	0,07
Fe (mg/l)	<0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01
Zn (mg/l)	2,2	3	3,2	2,8	2,4	2,6	3
Sn (mg/l)	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Cr (mg/l)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Ba (mg/l)	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Cd (mg/l)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Ni (mg/l)	0,01	0,03	0,02	0,03	0,01	<0,01	<0,01
Ag (mg/l)	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Pb (mg/l)	0,1	0,1	0,13	0,1	0,1	0,1	0,1
Se (µg/l)	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
As (µg/l)	<0,1	8,7	3,4	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Hg (µg/l)	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1

La Tabla 3.11 presenta la concentración de los metales analizados. Inicialmente se observa que parte del cinc, cobre y plomo se disuelven en el efluente sin necesidad de adicionar reactivos químicos o agentes floculantes.

Se realizaron seis recirculaciones debido a que a partir de la quinta recirculación, las concentraciones de metales tanto de plomo como de cinc y cobre, tienden a permanecer constantes.

Al realizar una comparación con la Tabla 1.3 de la sección 1.1.3.2 respecto a los límites máximos permisibles de descarga de efluentes, se observa que las concentraciones de metales en el agua son menores a los máximos permisibles establecidos por el TULAS, por tanto, el número de recirculaciones de agua y tratados mediante filtración es indefinida.

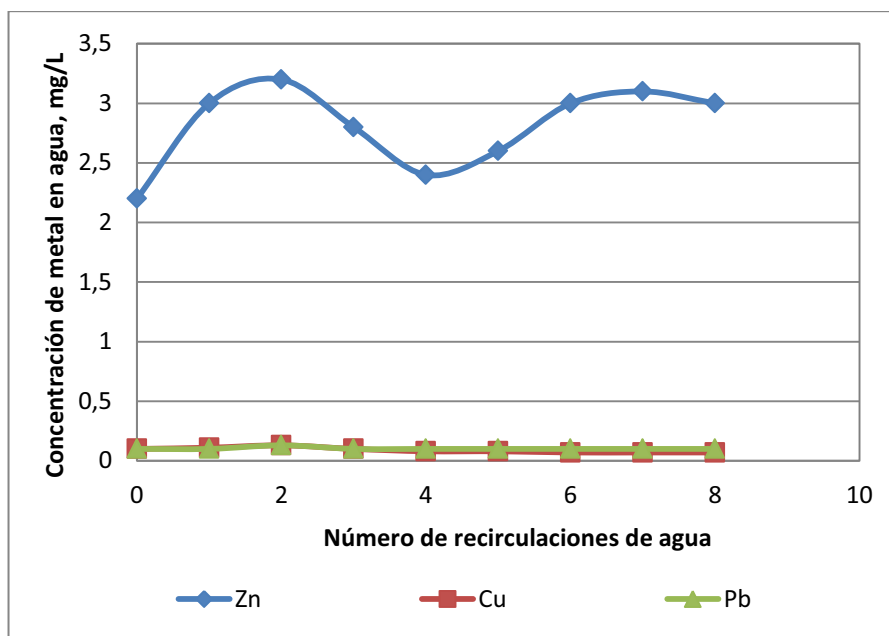


Figura 3.4. Concentración de los elementos en la clasificación en húmedo, purificación del agua mediante filtración.

Las concentraciones de Cu y Pb, son pequeñas y no sobrepasan los 0,11 mg/L como indica la Figura 3.4. Al igual que el Zn, la concentración se mantiene en 3 mg/L durante cada reciclo realizado hasta la octava recirculación de agua.

Las concentraciones de Al, Sn, Ba, Se, As, Hg, son menores a 0,1 mg/L, mientras que Fe, Cr, Cd, Ni, Ag, son menores a 0,01 mg/L y permanecen prácticamente constantes durante las recirculaciones de agua.

3.5. INFLUENCIA DE LA SEDIMENTACIÓN EN LA RECIRCULACIÓN DE AGUA DEL TAMIZADO EN HÚMEDO

La influencia de la sedimentación en el agua se determinó, al igual que en el proceso de filtración, por medio de la medición de las concentraciones de los metales presentes en el efluente; los cuales se describieron en la Tabla 2.3 de la sección 2.5.1.

3.5.1. ENSAYOS DE SEDIMENTACIÓN CON FLOCULANTES

3.5.1.1. Concentración de metales en la sedimentación

Los resultados de la Tabla 3.12, muestran la concentración de los metales pesados que se disuelven en el agua de sedimentación.

El uso de sulfato de aluminio (0,5 g/L) y sulfato de aluminio con cal (1/3 de la cantidad de sulfato utilizado), presentan una menor concentración de los metales en el efluente en comparación con el uso de cloruro férrico (1 g/L). A pesar de que los dos agentes floculantes mantienen el pH neutro de la pulpa (pH 7), el cloruro férrico actúa de una manera más efectiva que el sulfato de aluminio.

El uso de cal como agente floculante, aumenta el pH de la pulpa a 12 (alcalino), pero produce una desestabilización del residuo en cuanto a cantidades de plomo a medida que se aumenta la concentración del floculante.

La utilización de un agente sintético como es el caso de poliacrilamida, presenta menores concentraciones de metales en el efluente. Pero permite una disolución de cinc, níquel y mínimas cantidades de cobre.

La sedimentación implica la determinación de la velocidad con la que deposita el sólido en la base, y que se describe en la sección 3.5.1.2.

3.5.1.2. Determinación de la velocidad de sedimentación

Como se explicó en la sección 1.2.3, la velocidad de sedimentación es la pendiente de la tangente a la curva en la zona inicial (es prácticamente una recta). La velocidad de sedimentación se obtuvo a partir de los ensayos en probetas y que se representan en el Anexo IX.

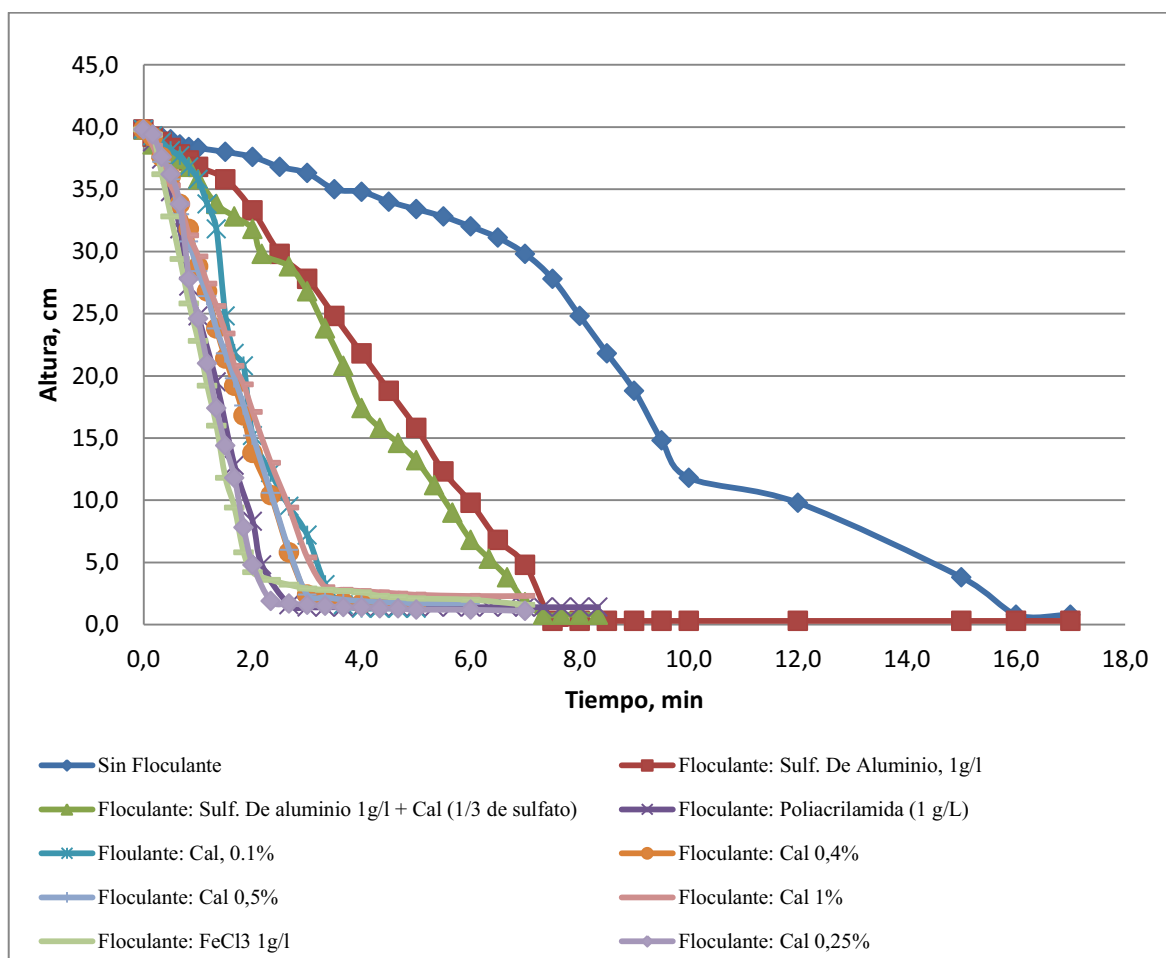


Figura 3.5. Ensayos de sedimentación con diferentes agentes floculantes

Las Figura 3.5 es la unión de las Figuras A.1 a la Figura A.10 determinadas a partir de los datos experimentales realizados en laboratorio y que se presentan en el Anexo IX.

Como se puede observar en la Figura 3.5, la sedimentación sin la acción de un floculante alcanza la zona de compactación o compresión (explicado en la sección

1.2.3.1) aproximadamente a los 16 minutos, no así, la acción de agentes floculantes que disminuyen notablemente el tiempo de compactación del residuo en la zona de compresión. Entre los mejores agentes floculantes se encuentran:

- Cal 0,25 %
- Cloruro férrico 1 g/L
- Poliacrilamida 1 g/L

Adicionalmente se obtienen los resultados de las velocidades de sedimentación, los cuales se presentan en la Tabla 3.13.

Tabla 3.13. Velocidad de sedimentación con y sin el uso de floculante.

Agente Floculante	Altura (cm)	Tiempo (min)	Velocidad de sedimentación (cm/min)
Sin floculante	39,8	15,5	2,57
Sulfato de aluminio	39,8	7,5	5,31
Sulfato y cal	39,8	6,9	5,77
Cal 0,1%	39,8	3,2	12,44
Cal 0,4 %	39,8	3,1	12,84
Cal 0,5 %	39,8	3	13,27
Cal 1 %	39,8	3,4	11,71
Cal 0,25 %	39,8	2,3	17,30
Cloruro férrico	39,8	2,2	18,09
Poliacrilamida	39,8	2,4	16,58

Como se puede notar, es indiscutible que cuando el sólido de la pulpa alcanza la zona de compresión en un menor tiempo, tendrá una mayor velocidad de sedimentación. Por tanto, los tres agentes floculantes antes mencionados son los mejores a utilizarse para la sedimentación.

3.5.1.3. Determinación del mejor floculante en la sedimentación de los residuos sólidos de fundición

Como se señaló en la sección 3.5.1.2, la selección del mejor agente floculante se realizó entre el cloruro férrico (1 g/L), poliacrilamida (1 g/L) y cal 0,25%.

La utilización de cal 0,25 % produce una elevación del pH de la pulpa a 12. En el diagrama de Pourbaix de la sección 1.2.3.1, respecto al estado del plomo en medio acuoso con pH alcalino y potencial igual a 0, se presenta el plomo como hidróxido de plomo ($Pb(OH)_2$), lo cual produce una desestabilización del residuo en cantidades de plomo que se disuelven en agua. El cloruro férrico produce grandes disoluciones de cinc que se puede comprobar en la sección 1.2.3.1 respecto al diagrama de Pourbaix. Sin embargo, no existe este tipo de cambios de pH ni potencial al utilizar cloruro férrico o poliacrilamida.

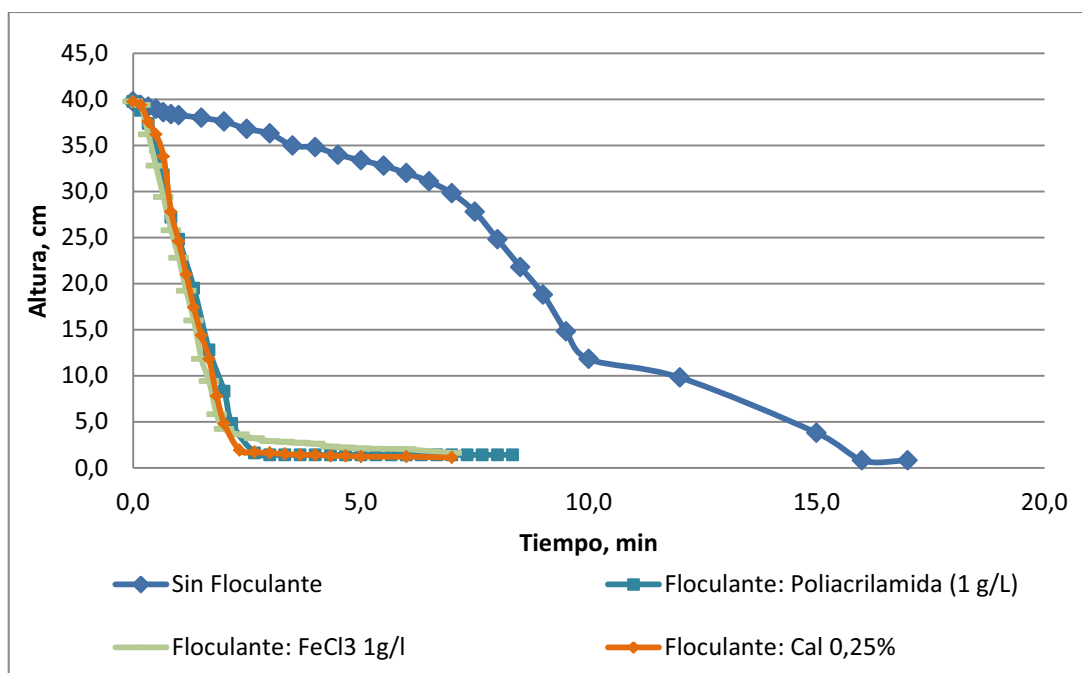


Figura 3.6. Altura vs. tiempo. Agente floculante: poliacrilamida; 1 g/L.

Como se puede observar en la Figura 3.6, los tres agentes floculantes le dan una elevada velocidad de sedimentación para poder separar el lodo del efluente rápidamente.

Por lo tanto, la cal a pesar de ser un buen floculante, tiene problemas en cuestión de pH de la pulpa y producirá una mayor desestabilización de plomo al realizar la estabilización (pH sigue alcalino).

La poliacrilamida, es al igual que el cloruro férrico un agente floculante que no cambia el pH de la pulpa y con el cual se puede realizar la estabilización.

Debido a este motivo, el mejor agente floculante a utilizarse fue el cloruro férrico de concentración 1 g/L.

3.5.2. SEDIMENTACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS DE FUNDICIÓN Y RECIRCULACIÓN DE AGUA

Debido a que la velocidad de sedimentación obtenida en la Tabla 3.5 de la sección 3.5.1.2, se realizó una toma de muestras del efluente después de 4 h y a las 24 h, para realizar una comparación y determinar el tiempo necesario para sedimentación.

3.5.2.1. Sedimentación durante 24 horas

Los resultados del uso de cloruro férrico como agente floculante en la sedimentación por un periodo de 24 horas, se presentan en la Tabla 3.14.

Como se puede observar en la Tabla 3.14, el cinc, cadmio, cobre y parte de níquel se disuelven en el efluente los cuales tienden a decrecer o mantenerse constantes a partir del cuarto a quinto reciclo de agua, por lo que el agua puede recircularse para los procesos de sedimentación. De igual manera cabe resaltar que las cantidades de plomo no se disuelven en comparación del uso de cal como floculante (Tabla 3.12 de la sección 3.5.1.1).

Tabla 3.14. Concentración de elementos en el efluente en el proceso de sedimentación. Agente floculante: cloruro férrico, 1 g/L. Tiempo de sedimentación: 24 h.

Elemento	MUESTRA						
	Agua Residuo de Fundición en la Sedimentación						
	Agua Inicial	Primer Reciclo	Segundo Reciclo	Tercer Reciclo	Cuarto Reciclo	Quinto Reciclo	Sexto Reciclo
Cu (mg/L)	0,26	0,6	0,11	0,13	1,44	1,04	1,23
Fe (mg/L)	0,22	0,02	0,12	0,02	0,03	0,02	0,04
Zn (mg/L)	113	121	120	123	124	125	125
Cd (mg/L)	0,01	0,12	0,31	0,29	0,3	0,41	0,51
Ni (mg/L)	0,02	0,27	0,52	0,43	0,37	0,65	0,58
Pb (mg/L)	0,1	0,2	0,8	0,2	1,3	1,5	1,6

De igual forma los metales tales como Al, Sn, Ba, Se, As, Hg no se colocaron en la Tabla 3.14 ya que presentan concentraciones menores a 0,1 mg/L y Ag y Cr menores a 0,01 mg/L.

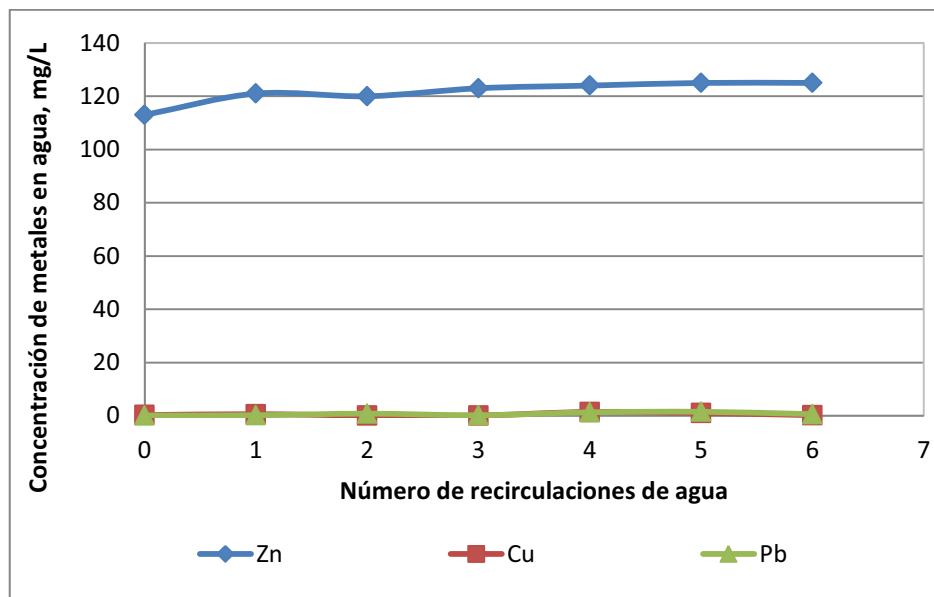


Figura 3.7. Concentración de los elementos en la clasificación en húmedo, purificación del agua mediante sedimentación. Agente floculante: FeCl_3 , 1 g/L.

En la Figura 3.7, la concentración máxima de Zn en el efluente es de 125 mg/L, la cual se mantiene constante en el proceso a partir de la sexta recirculación. Por

ello, el número máximo de recirculaciones de agua en el proceso de clasificación por tamaño en húmedo es de 6.

Las concentraciones tanto de cobre como de cinc son mínimas y están cercanas a 1 mg/L.

3.5.2.2. Sedimentación durante 4 horas

Los resultados del uso de cloruro férrico como agente floculante en la sedimentación por un periodo de 4 horas, se presentan en la Tabla 3.15.

Tabla 3.15. Concentración de elementos en el efluente en el proceso de sedimentación. Agente floculante: cloruro férrico, 1 g/L. Tiempo de sedimentación: 4 h.

Elemento	MUESTRA						
	Agua Residuo de Fundición en la Sedimentación						
	Agua Inicial	Primer Reciclo	Segundo Reciclo	Tercer Reciclo	Cuarto Reciclo	Quinto Reciclo	Sexto Reciclo
Cu (mg/L)	0,25	0,20	0,16	0,13	1,40	1,40	0,30
Fe (mg/L)	0,20	0,10	0,05	0,02	0,04	0,02	0,04
Zn (mg/L)	109	114	118	121	124	124	124
Cd (mg/L)	0,01	0,10	0,31	0,25	0,30	0,30	0,41
Ni (mg/L)	0,02	0,21	0,52	0,43	0,37	0,52	0,45
Pb (mg/L)	0,1	0,1	0,8	0,2	0,4	0,5	0,5

Se puede observar que existe una similitud con la Tabla 3.14 respecto a la concentración de metales en el efluente, de manera especial el cinc y cobre que son los que mayor concentración tienen.

3.5.3. LIXIVIACIÓN DE LOS RESIDUOS TRATADOS MEDIANTE FILTRACIÓN Y SEDIMENTACIÓN

3.5.3.1. Ensayo de lixiviación

Los ensayos de lixiviación realizados a los residuos tratados por medio de sedimentación y aquellos tratados por filtración, obtuvieron los siguientes resultados de la concentración de metales de cobre (Cu), hierro (Fe), plomo (Pb) y cinc (Zn) en las soluciones fuertes y de lavado.

Tabla 3.16. Lixiviación ácida y básica a los residuos tratados por sedimentación y filtración.

Residuo tratado	Tipo de lixiviación	Tipo de solución	Cu (mg/L)	Fe (mg/L)	Pb (mg/L)	Zn (mg/L)	
FILTRACIÓN	H ₂ SO ₄ 10% sólidos	Fuerte	191	13,67	30	21300	
		Lavado	65	11,10	2,70	1000	
	H ₂ SO ₄ 30% sólidos	Fuerte	2,17	1,73	30	80000	
		Lavado	0,45	1,72	5,10	19400	
	NaOH 10% sólidos	Fuerte	0,38	3,43	120	49	
		Lavado	0,62	1,46	30	169	
	NaOH 30% sólidos	Fuerte	1,30	3,71	420	658	
		Lavado	1,92	1,01	60	35	
	SEDIMENTACIÓN	H ₂ SO ₄ 10% sólidos	Fuerte	17,13	29,82	30	23800
			Lavado	86,20	22	2,90	3000
H ₂ SO ₄ 30% sólidos		Fuerte	5,61	1,80	20	93600	
		Lavado	3,02	1,00	22	8000	
NaOH 10% sólidos		Fuerte	1,71	4,08	100	78	
		Lavado	2,04	1,27	30	42	
NaOH 30% sólidos		Fuerte	0,40	3,83	290	92	
		Lavado	0,74	2,27	130	16	

Como se observa en la Tabla 3.16 la mayor concentración de metales en las soluciones es de cinc al realizar lixiviación en medio ácido. A mayor porcentaje de sólidos, mayor es la cantidad de metales presentes en la solución. De igual forma, se aprecia directamente que la solución fuerte posee mayores concentraciones de metales que en la solución de lavado. Los residuos que fueron lixiviados con

hidróxido de sodio (NaOH), indican una menor concentración de cinc en la solución fuerte y lavado respecto a los lixiviados en medio ácido, por lo que estos residuos expresan una posible estabilización.

3.5.3.2. Test TCLP

El test de toxicidad realizado a cada uno de los relaves (sólido filtrado después de la lixiviación) que fueron sometidos a lixiviaciones tanto ácidas como básicas y a diferentes concentraciones de sólidos, se presenta en la Tabla 3.17.

Tabla 3.17. Test TCLP al relave.

Residuo tratado	Tipo de lixiviación	Cu (mg/L)	Fe (mg/L)	Pb (mg/L)	Zn (mg/L)
FILTRACIÓN	H ₂ SO ₄ 10 % sólidos	85,8	3,19	30	711
	H ₂ SO ₄ 30 % sólidos	20,87	0,08	40	1 210
	NaOH 10 % sólidos	6,72	0,05	20	1 720
	NaOH 30 % sólidos	5,73	0,07	40	1 500
SEDIMENTACIÓN	H ₂ SO ₄ 10 % sólidos	50,1	3,35	60	544
	H ₂ SO ₄ 30 % sólidos	2,44	0,12	30	1 710
	NaOH 10 % sólidos	2,45	0,1	20	1 060
	NaOH 30 % sólidos	2,31	0,2	10,3	970

Los resultados del test TCLP muestran una disminución en las concentraciones de cinc en comparación a la Tabla 3.9 de la sección 3.2.1.2; respecto al TCLP realizado a los residuos menores a 150 µm que no fueron llevados a fundición, y dentro de los cuales todavía no se llega a la estabilización. Sin embargo, la peligrosidad de los metales permanece vigente debido a que el cinc continúa con

grandes concentraciones en relación a los límites permitidos (Tabla 1.3 de la sección 1.1.3.1).

3.5.3.3. Porcentaje de recuperación de metales

De acuerdo al balance realizado en el Anexo VIII, se determinó el proceso de lixiviación más adecuado para obtener la mayor recuperación cinc, debido a que se encuentra con mayor concentración.

Tabla 3.18. Porcentaje de recuperación de metales en las soluciones de filtrado, lavado y relave. Residuos tratados por medio de filtración.

Residuo tratado	Tipo de lixiviación	Tipo de solución	Porcentaje de recuperación (%)				
			Cobre	Hierro	Plomo	Cinc	
FILTRACIÓN	H ₂ SO ₄ 10% sólidos	Filtrado	0,34	2,00	1,71	33,73	
		Lavado	0,08	1,08	0,10	1,06	
		Relave	99,58	96,92	98,18	65,22	
	H ₂ SO ₄ 30% sólidos	Filtrado	0,00	0,02	0,13	9,85	
		Lavado	0,00	0,04	0,05	4,95	
		Relave	100,00	99,94	99,82	85,20	
	NaOH 10% sólidos	Filtrado	0,00	0,61	8,38	0,09	
		Lavado	0,00	0,15	1,22	0,19	
		Relave	100,00	99,23	90,40	99,71	
	NaOH 30% sólidos	Filtrado	0,00	0,11	4,93	0,21	
		Lavado	0,00	0,03	0,59	0,01	
		Relave	100,00	99,86	94,48	99,78	

La Tabla 3.18 y 3.19 representan los porcentajes de recuperación de los 4 metales que se encuentran en mayor concentración dentro del residuo sólido de fundición, como se observó en la Tabla 3.3, de la sección 3.1.2.

En la Tabla 3.18, la recuperación de cinc en el residuo tratado por filtración y lixiviado en un medio ácido al 10 % de sólidos, presenta un porcentaje de 33 % y el 77 % queda contenido en el relave.

Tabla 3.19. Porcentaje de recuperación de metales en las soluciones de filtrado, lavado y relave. Residuos tratados por medio de sedimentación.

Residuo tratado	Tipo de lixiviación	Tipo de solución	Porcentaje de recuperación (%)				
			Cobre	Hierro	Plomo	Cinc	
SEDIMENTACIÓN	H ₂ SO ₄ 10% sólidos	Filtrado	0,03	4,36	1,71	37,69	
		Lavado	0,10	2,18	0,11	3,22	
		Relave	99,87	93,45	98,17	59,09	
	H ₂ SO ₄ 30% sólidos	Filtrado	0,00	0,02	0,11	14,00	
		Lavado	0,00	0,02	0,21	2,11	
		Relave	100,00	99,95	99,68	83,89	
	NaOH 10% sólidos	Filtrado	0,00	0,66	6,35	0,14	
		Lavado	0,00	0,13	1,22	0,05	
		Relave	99,99	99,20	92,43	99,82	
	NaOH 30% sólidos	Filtrado	0,00	0,11	2,95	0,03	
		Lavado	0,00	0,04	1,49	0,01	
		Relave	100,00	99,86	95,57	99,97	

Como se puede ver en la Tabla 3.19 la recuperación de cinc en el residuo tratado por sedimentación y lixiviado en un medio ácido al 10 % de sólidos es de aproximadamente un 40 % y el 60 % queda contenido en el relave (sólido filtrado después de la lixiviación).

Para fines de confinamiento y estabilización del residuo se utilizó el proceso de lixiviación en medio alcalino (con NaOH). Este proceso aplicado a los residuos tratados por sedimentación, no presentó recuperaciones de cinc en las soluciones fuertes y lavado.

Adicionalmente se tomó en cuenta la Tabla 3.17 respecto a la toxicidad del residuo lixiviado en medio básico, la cual presenta pequeñas concentraciones de los cuatro metales mencionados, lo cual se presume una estabilización antes de realizar el confinamiento.

3.6. ESTABILIZACIÓN DE LOS RESIDUOS TAMIZADOS NO RECUPERABLES

3.6.1. MATERIALES Y FORMULACIÓN DE LOS RESIDUOS PARA LA ELABORACIÓN DE ADOQUINES

La formulación para la elaboración de adoquines depende del material que se utiliza; por lo tanto se tomó una relación entre áridos finos y cemento de 2:1 (por cada gramo de cemento, se coloca dos gramos de arena).

De acuerdo a la formulación establecida en la sección 2.6.1 se realizó los ensayos de compresión de adoquines que se presentan en la sección 3.6.2 y 3.6.3.

3.6.2. ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Los resultados de los ensayos realizados en el laboratorio de Ensayos de Materiales de la Carrera de Ingeniería Civil se presentan en la Tabla 3.20.

Tabla 3.20. Ensayos de Compresión de Adoquines

Descripción	Esfuerzo Rotura (MPa)	Descripción	Esfuerzo Rotura (MPa)
0	21,09	FIL – 20	2,18
FS – 5	3,77	M – 5	2,42
FS – 10	2,20	M – 10	2,55
FS – 20	4,87	M – 20	2,01
FIL – 5	3,02	FSLB-20	10,01
FIL – 10	2,85	EF - 20	17,62

La Tabla 3.21 presenta el tipo de tratamiento al que fue sometido el residuo y el porcentaje añadido en el adoquín:

Tabla 3.21. Descripción de la compresión de adoquines.

Descripción	Tipo de tratamiento	Residuo añadido (%)
0	Sin residuo	0
FS – 5	Sedimentación	5
FS – 10	Sedimentación	10
FS – 20	Sedimentación	20
M – 5	Sin tratamiento	5
M – 10	Sin tratamiento	10
M – 20	Sin tratamiento	20
FSLB - 20	Sedimentación, lixiviación básica	20
EF – 20	Escoria de fundición	20

Como se puede observar en la Tabla 3.20, el esfuerzo de rotura realizado hacia el adoquín original (sin residuos) posee una elevada resistencia a la compresión (hasta 21 MPa), el cual cumple con la norma INEN 1488:87 establecida en el Anexo XIV.

El adoquín cuyo tratamiento mediante sedimentación y lixiviación en medio básico (NaOH), presenta la mayor resistencia a la compresión (10,01 MPa) respecto a los residuos cuyo tratamiento fue únicamente por medio de sedimentación o filtración.

La escoria proveniente de la fundición de los residuos menores a 150 μm , presenta la mayor resistencia al ensayo de compresión realizado correspondiente a 17,62 MPa.

Pese a la resistencia obtenida de los adoquines que se adicionaron escoria de fundición, no cumplen con la Norma 1488:87 (resistencia permitida de 20 MPa),

por lo que se realizará una planta de confinamiento con bloques de la misma composición.

3.6.3. ANÁLISIS DE TCLP DE LOS ADOQUINES

De acuerdo a los ensayos de toxicidad (test TCLP), se muestran la concentración de los metales presentes; de esta forma se confirmó la estabilización de los residuos de fundición en los adoquines.

Tabla 3.22. TCLP de los adoquines.

Muestra	Tipo de tratamiento	Cu (mg/L)	Fe (mg/L)	Pb (mg/L)	Zn (mg/L)
0	Sin residuo	0,26	2,05	0,4	8,1
M – 5	Sedimentación	1,30	0,1	0,5	410
M– 10	Sedimentación	0,75	0,04	0,5	306
M– 20	Sedimentación	2,84	0,02	1,2	1 142
FS – 5	Sin tratamiento	9,94	0,1	1,7	356
FS – 10	Sin tratamiento	0,84	0,08	1,1	1 106
FS – 20	Sin tratamiento	6,86	0,10	1,7	834
FSLB-20	Sedimentación, lixiviación básica	3,0	0,02	0,5	70
EF - 20	Escoria de fundición	2,5	0,01	0,4	12

Como se puede ver en la Tabla 3.22, los niveles de concentración de cinc, plomo y cobre son los más elevados en relación a Al, Sn, Ba, Se, As, Hg, que presentan concentraciones menores a 0,1 mg/L y Cr, Cd, Ni, Ag muestran concentraciones menores a 0,01 mg/L.

El adoquín 0 que no posee residuos y el adoquín EF-20 al que se agregaron escorias de fundición (mostrado en la Tabla 3.21 de la sección 3.6.2), si se comparan con la Tabla 1.3 de la sección 1.1.3.1 respecto al límite máximo permisible de la concentración de metales, se encuentran dentro de la norma no así el uso de residuos en distintas concentraciones.

M-5, M-10 y M-20 son adoquines con residuos sin tratamiento en los cuales, se indican que las concentraciones de Zn aumenta a medida que incrementa la los porcentajes de residuos agregados, así como un aumento de concentraciones de Cu y Pb.

El tratamiento de los residuos mediante filtración y la elaboración de adoquines (FIL-5, FIL-10 Y FIL-20) presenta sin dudas elevadas concentraciones de cinc como de cobre y plomo en comparación con los adoquines M.

Los residuos tratados por medio de sedimentación (FS-5, FS-10, FS-20) poseen de igual manera, elevadas concentraciones de cinc, cobre y plomo. Sin embargo al realizar una comparación con los adoquines descritos como FIL y M posee menores concentraciones respecto a los tres metales mencionados anteriormente.

Si se toma en cuenta el test de toxicidad realizado al residuo inicialmente (Tabla 3.9, sección 3.2.1.2), se observa claramente la disminución de la concentración de los metales presentes, por tanto disminuye la peligrosidad del residuo.

La concentración inicial de cinc en el residuo sin estabilización es de 10 300 mg/L mientras que al realizar una estabilización se tiene una concentración de 834 g/L (FS-20, Tabla 3.22) al igual que el plomo, su concentración inicial fue de 162 g/L y luego de la estabilización su concentración es de 1,7 g/L.

El análisis de la prueba de toxicidad TCLP indica que el tratamiento del residuo por medio de lixiviación en medio alcalino al 30 % de sólidos (FSLB-20), presenta una estabilidad de los residuos del cual existe una minimización de disolución de metales al ambiente, de manera especial cinc (70 mg/L), cobre (3 mg/L) y plomo (0,5 mg/L).

Por otro lado, el adoquín conformado por escoria de fundición de los residuos menores a 150 μm presentan una mejor estabilidad y cercanos al adoquín que no se adicionó residuos (0) de cinc (12 mg/L), cobre (2,5 mg/L) y plomo (0,4 mg/L).

Al realizar una comparación con la Tabla 3.9, se presenta una disminución en su gran mayoría de Cu y Zn cuya disolución inicial era de 1 000 mg/L y 10 300 mg/L, respectivamente.

3.7. DIAGRAMA DE FLUJO, DIMENSIONAMIENTO DE EQUIPOS

En base a los datos proporcionados por una empresa ecuatoriana que utiliza latón comercial para la elaboración de grifería; su generación de residuos de este tipo se localiza entre 15 y 16 toneladas mensuales.

Para fines de diseño, se estableció el tratamiento de 16 ton/mes, del cual se consideró una operación de tratamiento de 20 días al mes, en un turno de 8 horas al día dentro del que se describe la duración de las operaciones del proceso en la Tabla 3.23.

Tabla 3.23. Tiempo de operación de cada equipo.

Equipo	Tiempo de operación (h)
Mezclado	0,5
Tamizado	4
Fundición	1,5
Filtración	1
Estabilización	1

El tratamiento de los residuos se realiza de tipo batch en el mezclado y la estabilización, pero de forma continua durante la operación de tamizado y filtración.

De esta forma se tratarán 800 Kg/día de residuo, valor sobre el cual se estableció el correspondiente dimensionamiento de los equipos que intervienen en su tratamiento. Dentro de los equipos seleccionados se encuentran: tanque de mezclado, tamiz, filtro, horno de fundición y equipo de confinamiento.

3.7.1. DIAGRAMA DE FLUJO

Como se explicó en la sección 2.7.1 la selección del diagrama de flujo fue de acuerdo a dos aspectos importantes: la resistencia al ensayo de compresión de los adoquines y el test de toxicidad TCLP.

De acuerdo con la sección 2, se presentan los diagramas de flujo que recopilan los ensayos realizados durante todo el proceso de tratamiento a fin de determinar la mejor opción de tratamiento de los residuos provenientes de la fundición de latón.

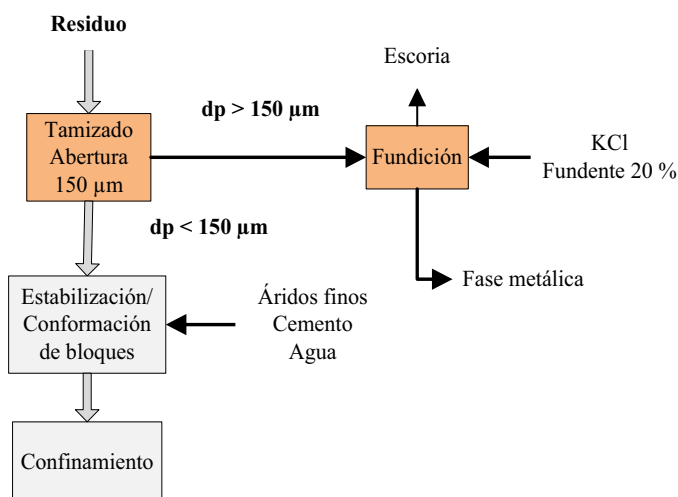


Figura 3.8. Esquema del proceso de estabilización de residuos mediante el uso de tamizado en seco.

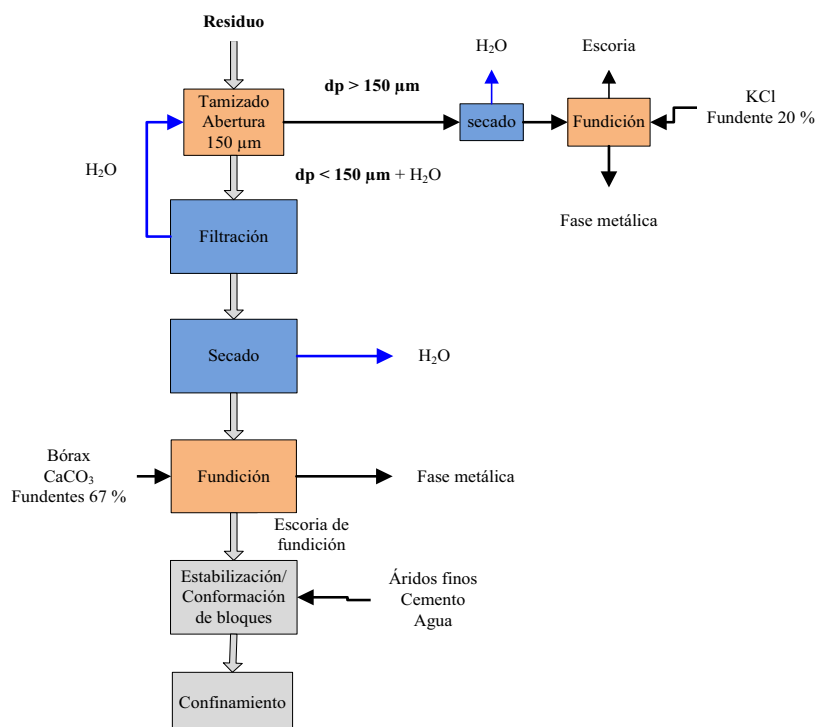


Figura 3.9. Esquema del proceso de estabilización de residuos mediante el uso de tamizado en seco.

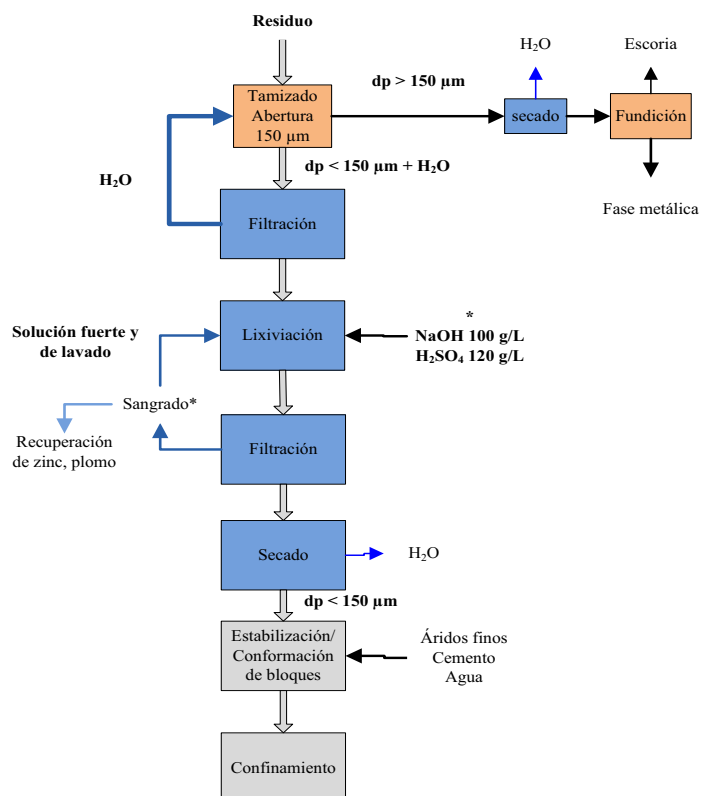


Figura 3.10. Esquema del proceso de estabilización de residuos mediante el uso de tamizado en húmedo con proceso de filtración.

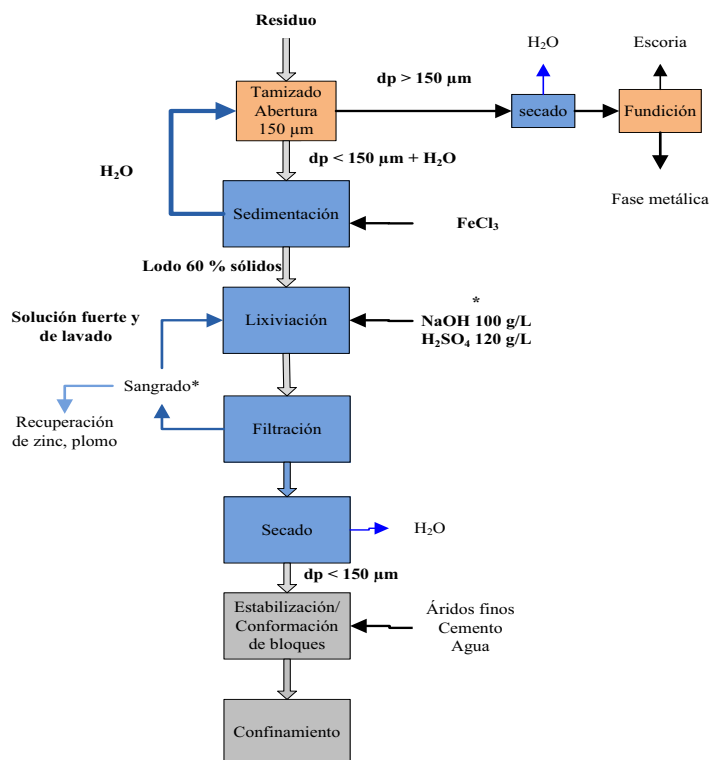


Figura 3.11. Esquema del proceso de estabilización de residuos mediante el uso de tamizado en húmedo con proceso de sedimentación.

Como se indicó en la Tabla 3.20 de la sección 3.6.2, los adoquines con 20% de la escoria de fundición de los residuos, tienen una mayor resistencia (alrededor de 17 MPa) en comparación con el resto de adoquines, a excepción del adoquín que no posee residuos. De igual forma, el resultado del ensayo de toxicidad realizado al adoquín (Tabla 3.22 sección 3.6.3), muestra una mejora en cuanto a la estabilización del residuo y emite menores concentraciones de cinc.

Por este motivo, el diagrama de flujo establecido es mediante el tratamiento de residuos mediante tamizado en húmedo para la separación de las fracciones y fundición para el confinamiento de la escoria, que se presenta en la Figura 3.9.

Este diagrama de flujo se describe a continuación junto con los respectivos balances de masa para el tratamiento en cada proceso realizado y se muestra en la Figura 3.12. La recirculación de agua se produce en la sección de filtración hacia el proceso de tamizado en húmedo.

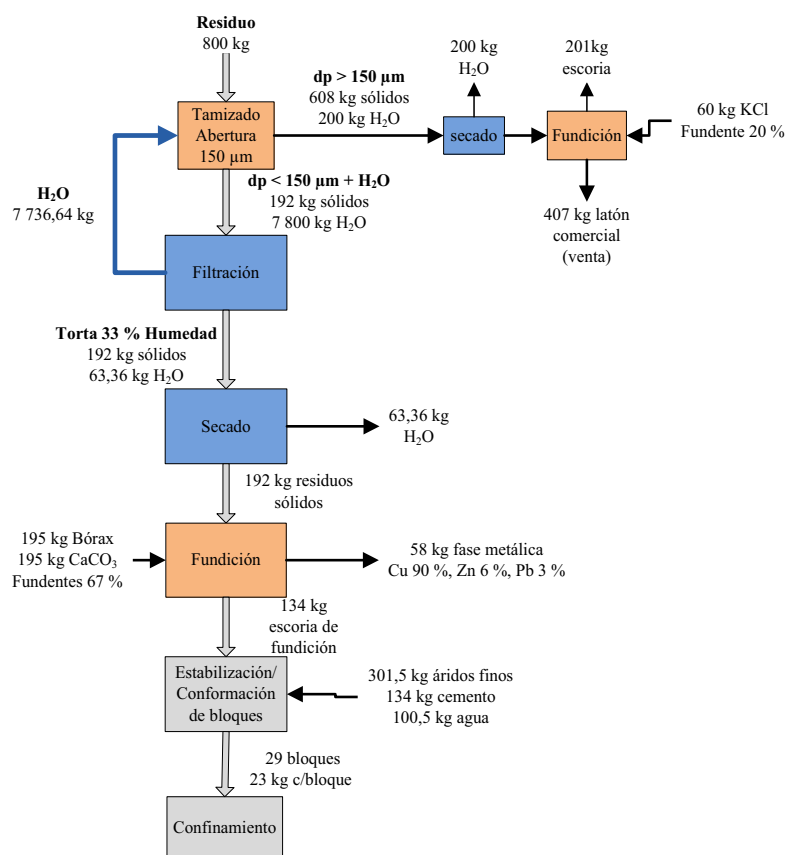


Figura 3.12. Balance de masa aplicado para el tratamiento de residuos de un día de trabajo.

La Figura 3.12, representa el balance de masa realizado; en el arranque, se reemplaza la adición de 8 000 Kg de agua al proceso de tamizado, como una recirculación del mismo.

En cada recirculación se adiciona agua para mantener la cantidad de agua en el proceso de tamizado en húmedo que se utiliza diariamente, puesto que se pierde agua en las operaciones de filtración (torta húmeda con 33 % de humedad) y secado.

De la etapa de clasificación por tamaño en húmedo, las fracciones mayores a 150 µm se someten a secado y posteriormente a la fundición para la obtención de latón comercial, el cual irá a la venta.

De igual forma, los residuos menores a 150 μm , serán llevados a fundición para la obtención de bronce y la escoria será llevada a estabilización para la conformación de bloques.

3.7.2. DIMENSIONAMIENTO Y CAPACIDAD DE LOS EQUIPOS

3.7.2.1. Tanque de mezclado

La capacidad del tanque de mezclado se determinó mediante las ecuaciones [2.5], [2.6] y [2.7] de la sección 2.7.2. De acuerdo a la cantidad de residuos a tratarse diariamente, que son 800 kg; se preparará una pulpa al 10 % de sólidos, por lo que también se adicionará agua al tanque para el mezclado.

Por tanto el tanque debe tener una capacidad de almacenamiento y mezclado para 8 800 kg de pulpa lo que representa alrededor de 8,6 m^3 . Sin embargo para diseño, se realizó un sobredimensionamiento del 20 % por cuestiones de seguridad.

Tabla 3.24. Dimensiones del tanque.

Capacidad real (Q, m^3)	Sobredimensionamiento (%)	Capacidad para diseño ($Q_{\text{diseño}}$, m^3)	Diámetro (D, m)	Altura (H, m)
8,60	20,00	10,30	1,87	3,74

Como se puede ver, la capacidad para diseñar el tanque ($Q_{\text{diseño}}$) es de 10,3 m^3 , para el mezclado de la pulpa. La relación entre el diámetro y la altura es de 0,5 para la construcción del tanque.

Si se compra un tanque con capacidad similar, se obtiene de otras dimensiones, ya que estos tanques poseen dimensiones normalizadas o cuyas dimensiones son establecidas por la casa comercial. De esta manera se tienen las siguientes dimensiones.

Tabla 3.25. Dimensiones del tanque seleccionado por catálogo.

Capacidad para diseño ($Q_{\text{diseño}}$)	Diámetro (D, m)	Altura (H, m)
10,50	2,00	3,34

Como se puede notar, la relación entre la altura y el diámetro se encuentra en un relación de 1,7; esto se debe a que la altura debe ser mayor al diámetro para el almacenamiento y mezclado y con una relación mínima de 1,5.

3.7.2.2. Tamiz

La determinación de la capacidad del tamiz vibratorio se hizo a través de la ecuación [2.8] señalada en la sección 2.7.3.4, para calcular el área del tamizado. La determinación de los valores a, b, c, d, e y F se describe en la Tabla A.46 hasta la Tabla A.51, del Anexo X para una alimentación de pulpa a tratarse de 8800 kg/día, el cual contiene el 10% de sólidos. El tamizado se realiza en malla No. 100 (abertura de tamiza de 150 μm) y un sobretamaño del 7,4 %.

Tabla 3.26. Resultados del área de tamizado.

Alimentación (t/h)	Sobretamaño (t/h)	Pasante (t/h)	a	b	c	d	e	F	Área de tamizado (pies²)
0,20	0,15	0,15	0,0055	0,85	1,60	0,24	2,00	1,00	14,00

Como se puede observar, la capacidad del tamiz se consideró de 14 pies² (1,3 m²) de área superficial. El cual es un valor coherente con respecto a la cantidad a tratarse. Existen casas comerciales de los cuales se tiene tamices vibratorios de forma circular, dentro del cual es el más adecuado para que ingrese la alimentación y por el fondo salga la pulpa con fracción menor a 150 μm .

3.7.2.3. Filtro

Se dimensionó un filtro prensa que es el más utilizado a nivel industrial. De acuerdo a la empresa Siemens, se utilizó la ecuación [2.9] de la sección 2.7.3.3 para la determinación del volumen de filtro requerido.

La solución sale del proceso de tamizado en húmedo con una concentración de 2,4 % de sólidos e ingresa al filtro. El filtro prensa funcionará 1 hora, por lo que el sólido ingresará a razón de 8 m³/h como se indica el Anexo XVI, en la Figura A.3, para la selección de la capacidad y dimensiones de un filtro J-Press ®.

Tabla 3.27. Capacidad y dimensiones de filtro prensa.

Volumen de alimentación (m ³ /h)	Porcentaje de sólidos (%)	Porcentaje de sólido seco en la torta húmeda (%)	Densidad de la torta húmeda (kg/m ³)	Volumen del filtro prensa (m ³)	Altura (m)	Longitud de la prensa (m)	Ancho (m)
8,00	2,40	75,00	1175,56	0,23	1,30	2,17	0,92

3.7.2.4. Horno de fundición

La selección del horno de fundición se determina a partir de su capacidad y de la temperatura de fusión que alcanza el mismo.

3.7.2.5. Equipo de compactación

Los equipos más importantes que conforman el sistema de compactación son el tanque de mezclado, cangilón, tolva y vibrocompactador, como se indicó en la sección 2.7.3.4. Sin embargo, la tolva debe tener la misma capacidad del cangilón y del vibrocompactador.

Las dimensiones del tanque de mezclado y el vibrocompactador se presentan a continuación.

- **Tanque de mezclado**

De acuerdo a la composición de mezclado para la conformación de bloques, presentado en la Tabla 2.5 de la sección 2.6.1; se dimensionó la capacidad del tanque para mezclado.

Los resultados de la cantidad de la mezcla a ser compactada y de la capacidad del tanque se detallan en la Tabla 3.28, donde se tomó en cuenta la ecuación [2.11] de la sección 2.7.3.4.

Tabla 3.28. Capacidad del tanque de mezclado.

Cantidad de mezcla (Kg)	Densidad de mezcla (Kg/m³)	Volumen del tanque (m³)
670,13	1510,41	0,45

- **Equipo de vibrocompactación**

Debido a que las empresas ofrecen equipos de vibro compactación con elaboración de bloques de dimensiones de 20 x 20 x 40 cm, lo que equivale a 0,016 m³; se seleccionó el vibrocompactador. Como se muestra en la Tabla 3.29, se presenta el volumen de mezclado que se trata, y el número de bloques que se elaborarán en el equipo de vibrocompactación.

Tabla 3.29. Dimensiones y cantidad de bloques que se realizarán.

Volumen a tratar (m³)	Cantidad a tratar por día (Kg)	Dimensiones del bloque, m (Volumen, m³)	Cantidad de bloques a elaborarse
0,44	670,13	0,20 x 0,20 x 0,40 (0,016)	29

El equipo que posee una menor cantidad de elaboración de bloques es el que se presenta a continuación:

Tabla 3.30. Características de procesamiento de bloques.

Número de bloques /ciclo	Capacidad de tratamiento del vibrocompactador (bloques/h)
4	40

Como indica la Tabla 3.30 la capacidad de conformación de bloques por hora es la más adecuada y la de menor capacidad disponible para la elaboración de bloques con las dimensiones mencionadas en la Tabla 3.29.

3.7.2.6. Distribución de equipos en planta

Una vez determinado el dimensionamiento de los principales equipos requeridos, se estableció la capacidad y distribución de los equipos en el interior de planta.

En la Figura 3.13 se presenta la distribución de los equipos en los que se encuentra el acceso de entrada (azul) y salida (rosado), los cuales se colocaron en las esquinas de la planta, esto es para disminuir la movilización y transporte tanto del ingreso de residuos al tratamiento, como para la salida del residuo estabilizado (bloques) y ser llevados hacia las celdas de confinamiento.

Del tamiz vibratorio se colocó una banda para transportar los residuos mayores a 150 μm hacia el proceso de secado. Una vez que los residuos eliminan la humedad, son llevados a fundición para la obtención de latón comercial.

La escala está representada en relación 1:1 (cada centímetro es un metro).

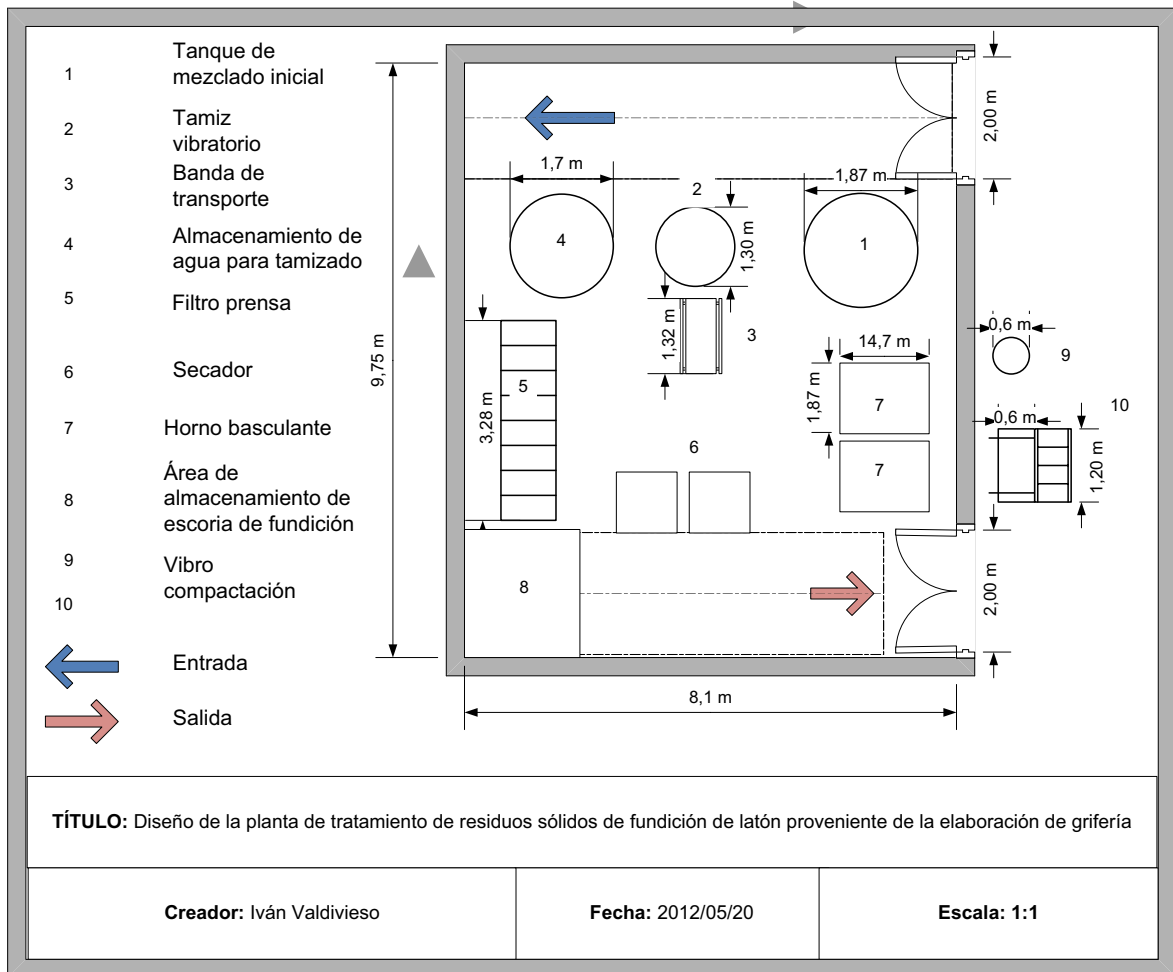


Figura 3.13. Vista superior de la distribución de los equipos en el interior de la planta.

Además, no se colocó el proceso de mezclado y compactación de los bloques en el interior del área fabril, esto es por facilidad de transporte de bloques hacia el área de confinamiento y evitar la generación de polvos (arena, cemento) dentro del área, ya que es un espacio cerrado.

La Figura 3.14 presenta la vista superior respecto al dimensionamiento de la planta, del cual el 40 % (144 m²) corresponden al sector en donde se realizará las celdas de confinamiento, es decir, la colocación de los bloques por un período de 5 años que será el tiempo de vida útil de la planta de tratamiento.

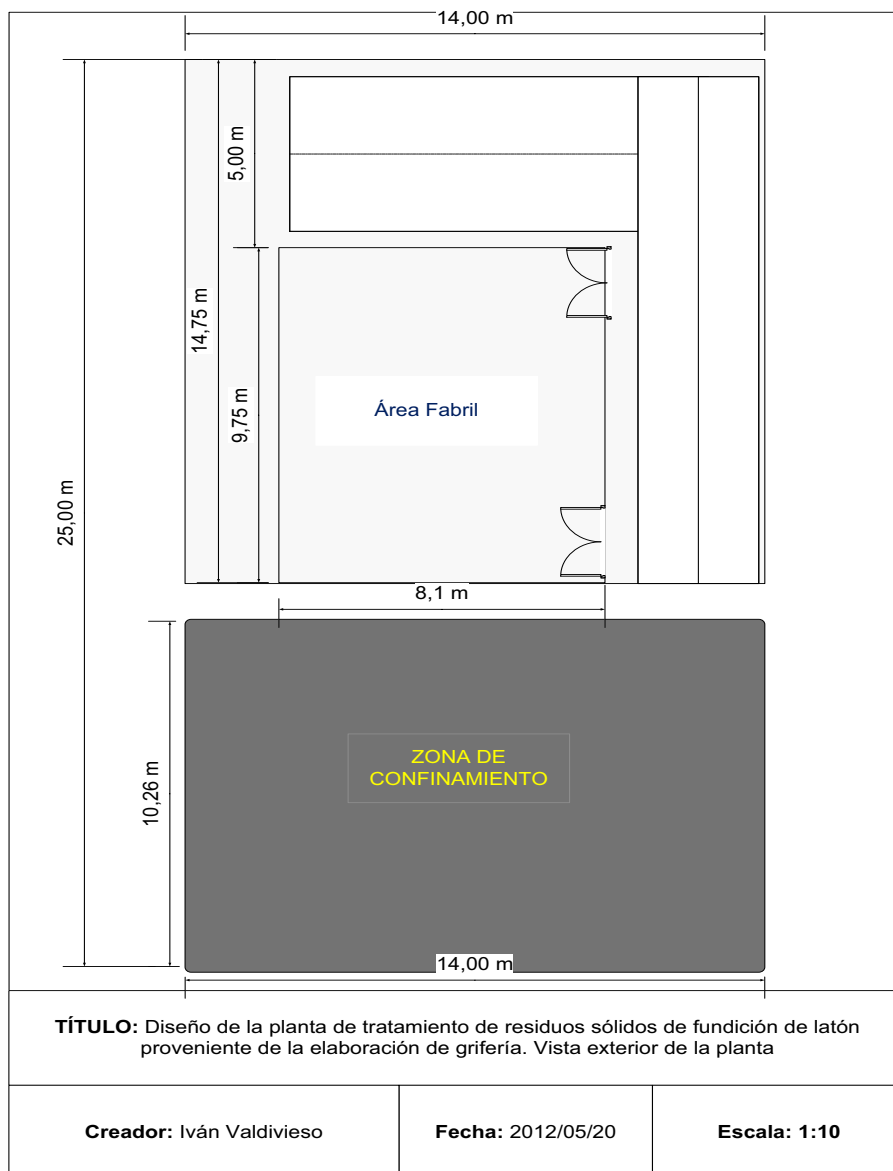


Figura 3.14. Vista superior del dimensionamiento de la planta.

3.8. EVALUACIÓN ECONÓMICA PRELIMINAR

La determinación de la inversión y de los costos de operación son aquellos que determinaron la factibilidad y la construcción del proyecto. Para ello se recolectó la información técnica de cada uno de los equipos mencionados.

La estimación económica del proyecto se realizó en función del tratamiento de 16 toneladas mensuales de residuos de fundición de latón provenientes de la

elaboración de grifería y se tomó en cuenta que estos residuos no tienen costo alguno ya que son desechados por la planta.

3.8.1. COMPRA DE TERRENO E INFRAESTRUCTURA

El terreno se localizará en un sector cercano a la planta para no producir costos de movilización. La planta tendrá 350 m² y 79 m² ocupado por los equipos mencionados en la sección 3.8.2 y que fueron dimensionados. Por tanto la se realizará una inversión en terreno, construcción de la infraestructura de la planta de tratamiento y el área de confinamiento.

Tabla 3.31. Compra de terreno.

Terreno e infraestructura	Costo por m² (USD/m²)	Área (m²)	Costo total (USD)
Terreno	100*	350	35 000,00
Infraestructura	50,80	79	4 013,20
TOTAL	151	-	39 013

*El costo de terreno depende de la ubicación del mismo.

3.8.2. INVERSIÓN DE EQUIPOS PRINCIPALES

Dentro de los equipos principales seleccionados se determinaron las siguientes descripciones en la Tabla 3.32:

Tabla 3.32. Descripción de los equipos requeridos.

Equipo	Especificaciones
Tanque de mezclado	Tanque de acero inoxidable, fabricado sin tapa o con tapa superior, cónica de 15, para densidades de líquidos de 1 a 1,8, potencia de las aspas para mezclar de 1 Hp.
Tamiz vibratorio	Abertura de 150 µm
Filtro	De panel eléctrico, presión hidráulica y de fácil operación y mantenimiento.
Equipo de compactación	Se entregan moldes de 20 x 20 x 40. La máquina coloca el bloque directamente al piso. Su operación utiliza un motor de 0,5 Hp.

Los costos de los equipos principales para la planta de tratamiento se describen a continuación en la Tabla 3.33.

Tabla 3.33. Costos de los equipos a utilizar

Equipo	Cantidad (No. unidades)	Costo (USD)
Tanque de mezclado	1	4 500
Tamiz vibratorio	1	5 000
Filtro	1	8 000
Secadora	2	15 000
Horno basculante (0,25 m ³)	2	55 000
Equipo de compactación	1	8 200
TOTAL		95 700

Adicionalmente se tomará en cuenta un costo por mantenimiento de equipos en la planta, el cual representa el 20 % de la inversión de los equipos. Por tanto, la inversión de los equipos y la instalación en la planta sería aproximadamente de **114 840 USD.**

3.8.3. COSTOS FIJOS

Los costos fijos se refieren explícitamente a aquellos que no dependen directamente de la cantidad de residuos tratados, es decir, es independiente a la operación de la planta. Dentro de los costos fijos está establecido el personal requerido y el mantenimiento de la planta (repuestos para maquinaria, reparaciones, seguros)

3.8.3.1. Mano de obra directa, personal requerido

Como se explicó anteriormente, el personal labora por 5 días a la semana durante un período de 8 horas al día.

Dentro el personal requerido, es necesario la contratación de 5 personas, de los cuales se encuentra un jefe de planta para mantener en funcionamiento de la planta de tratamiento; un técnico mecánico para el mantenimiento de los equipos y tres obreros los cuales se encargarán de los procesos de operación en la planta al igual que las funciones de carga y descarga de los residuos.

Las operaciones de carga y descarga se refieren a la carga inicial de los residuos al tanque de mezclado, el desmontaje de las placas del filtro prensa y llevar los residuos al secado para la fundición, también para la preparación de los bloques. Por último, se desmontan los bloques y serán llevados a la zona donde se localizan las celdas de confinamiento.

- **Seguro médico, aporte al IESS, décimo tercero y décimo cuarto sueldo**

El aporte al IESS es referido al aporte realizado al IESS y que hasta la actualidad corresponde al 20,5 %; del cual, en el sector privado el 9,35 % es el aporte que realiza el trabajador y el 11,15 % corresponde a la aportación patronal (empresa). El décimo tercer sueldo es referido a la suma de todos los valores percibidos durante el año dividido para 12 y cuyo valor es recibido por el trabajador a fines del año (hasta el 24 de diciembre). El décimo cuarto sueldo consiste en un sueldo básico unificado que se cancela cuando se cumple el año de trabajo, mientras que la afiliación médica es un seguro privado donde el patrono (empresa) cubre el 70 % del valor.

3.8.3.2. Mantenimiento de planta

Tabla 3.34. Costos fijos obtenidos

Item	Costo (USD/mes)
Personal	
1 jefe de planta	700,00
1 técnico mecánico	350,00
3 obreros	900,00
Seguros	
Aporte al IESS (11,15 %)	224,25
Afiliación Médica	500,00
Décimo tercero	162,50
Décimo cuarto	121,70
Mantenimiento	842,00
TOTAL	3 800

El mantenimiento de la planta se refiere a los repuestos y la reparación de la maquinaria o los equipos que se utilizan. Este proceso se lo realiza de forma permanente y un mantenimiento de forma global, para la cual se realiza un paro de la planta de 15 días o dependiendo del paro de la planta principal de donde se generan los residuos de fundición. La estimación del mantenimiento se considera aproximadamente el 2 % de la inversión realizada hacia los equipos requeridos.

3.8.4. COSTOS VARIABLES

Los costos variables son referidos a los gastos de suministros y a la materia prima o reactivo requerido.

3.8.4.1. Reactivos o materia prima

El cloruro de potasio es uno de los reactivos utilizados como carga fundente para la fundición de las fracciones mayores a 150 μm . El precio de este reactivo es de 470 USD la tonelada métrica.

El bórax es establecido como fundente para la fusión de las fracciones menores a 150 μm , el cual tiene un precio de 560 USD la tonelada y se presentan en sacos de 25 kg por la empresa Weign Wong. De igual manera, el carbonato de sodio (NaCO_3) tiene un precio de 500 USD la tonelada y se presenta en bolsas de 40 kg.

La materia prima utilizada es referida a cemento y áridos finos (arena) en el que se recurrió a sacos de 25 Kg (8,70 USD) de la empresa Lafarge y a pequeños vendedores para la adquisición de arena (5 USD la carretilla, 25 Kg). El resumen del costo de los reactivos y de las materia primas utilizadas se presentan en la Tabla 3.35.

Tabla 3.35. Reactivos y materia prima

Reactivo/ Materia Prima	Consumo (Kg/día)	Costo (USD/Kg)	Valor (USD/día)	Valor (USD/mes)
KCl	60	0,47	28,13	562,51
Bórax	195	0,56	1092	2 184,0
NaCO_3	195	0,50	97,5	1 950,00
Cemento	134	0,35	67,2	1 344,00
Arena	302	0,20	86,4	1 728,00
COSTO MENSUAL TOTAL				7 768

3.8.4.2. Energía eléctrica

La energía eléctrica es referida al consumo principal realizado por los equipos en la planta. Estos se describen en la Tabla 3.36 junto con el tiempo en el que estarán en funcionamiento.

Tabla 3.36. Energía consumida por los equipos.

Equipo	Cantidad	Potencia (Hp)	Horas/día (h/día)	Energía/día (Hp/día)	Costo/día (USD/día)
Tanque de mezclado	1	1	0,5	0,5	0,04
Tamiz vibratorio	1	5	4	20	1,64
Filtro	1	3	1	3	0,24
Secadora	2	15	1	30	2,46
Horno basculante	2	48	4	192	15,36
Equipo de compactación	1	0,5	1	0,5	0,04
TOTAL				246	266

La potencia utilizada por los equipos corresponde a 246 Hp (183,27 kW), del cual se toma en cuenta un 15 % correspondiente a gastos energéticos adicionales. El precio del kilovatio hora (kWh) en Ecuador corresponde a 0,11 USD, del cual se obtiene un gasto por energía eléctrica de **584** USD mensuales.

3.8.4.3. Agua

El consumo principal de agua es correspondiente al proceso de sedimentación, al proceso de lixiviación y el mezclado para realizar la estabilización del residuo. Este consumo elevado se produce al arranque de la planta, ya que luego de ello, se recircula al proceso de tamizado y al proceso de lixiviado respectivamente.

Por tanto, al inicio del arranque, se tiene la siguiente Tabla 3.37.

Tabla 3.37. Consumo inicial de agua

Proceso	Cantidad (m ³ /día)	Costo (USD/día)
Mezclado (inicial)	8,00	2,40
Mezclado (Estabilización)	0,14	0,04
Total	8,14	2,44

De la Tabla 3.37 se observa que inicialmente existe un consumo de agua inicial de 8,14 m³. Si se agrega un 20 % de gasto a este valor consumido para considerar gastos adicionales, y el precio del metro cúbico de agua (m³) está a 0,30 USD, se obtiene un gasto de **100 USD** mensuales.

3.8.5. INGRESOS GENERADOS

Los ingresos generados en la planta de tratamiento serían nulos por el lado de la elaboración de celdas para el confinamiento de los residuos, que son generados por la misma planta cuya materia prima fue utilizada para este proyecto. Sin embargo existen ingresos por la venta de latón comercial (5,80 USD/kg) proveniente del proceso de separación de la fracción mayor a 150 µm.

Si la planta diseñada prestara sus servicios a las empresas generadoras de residuos sólidos industriales de fundición debido a sus procesos de elaboración de griferías, se obtendrían ingresos los cuales cubrirían la inversión realizada. La estimación del cobro sobre los residuos recibidos se realiza a partir del análisis de la multa que el Estado o Municipio multaría por no cumplir con el tratamiento y gestión de residuos.

De acuerdo con Efficãcitas (empresa con experiencia en Estudios de Impacto Ambiental), el reglamento para la prevención y control de la contaminación por desechos peligrosos establece sanciones para aquellas empresas que incumplan con la disposición final o tratamiento de residuos con una multa de entre mil (1 000) hasta dos mil (2 000) salarios mínimos vitales, más la suspensión temporal de la licencia ambiental.

Con una jornada laborable de 20 días al mes, se estiman el detalle de los ingresos que se obtendrán ocupando la capacidad de la planta, es decir el tratamiento de 800 Kg diarios de residuos.

Tabla 3.38. Ingresos mensuales tratamiento de residuos

Material	Residuos (kg/día)	Generación (kg/mes)	Precio (USD/kg)	Ingreso mensual (USD/mes)
Latón comercial	407	8 140	5,00	40 700,00
Residuos de fundición de latón proveniente de la elaboración de grifería	800	16 000	0,40	6 400,00
TOTAL				47 100

3.8.6. TIR Y VAN

A partir de los datos respecto a costos fijos y variables, y los ingresos que se generarían por prestación de servicios; se estimó una vida útil de 5 años de operación de para el funcionamiento de la planta.

La elaboración de la caja de flujo para el análisis financiero de la implementación de la planta, fue determinada por medio de la determinación de los indicadores financieros, es decir, el cálculo del Valor Actual Neto (VAN), la relación entre el beneficio/costo (B/C) y la Tasa Interna de Retorno (TIR). De los valores adquiridos por los indicadores señalados se determinó la factibilidad de la planta de tratamiento que se presenta en la Tabla 3.39 La tasa de descuento corresponde a un 10 %. En la Tabla 3.39 y 3.40 se presentan los ingresos y egresos totales que se producen anualmente ya que el flujo de caja está dado para un tiempo de vida útil de 5 años.

Tabla 3.39. Egresos anuales

Flujo de Caja	USD/mes	USD/año
Costo fijo	3 800,45	45 605,40
Costos variables	7 768,51	93 222,12
Suministros (agua, electricidad)	684,72	8 216,64
Total de egresos	10 288	147 044

Tabla 3.40. Ingresos anuales.

Flujo de Caja	USD/mes	USD/año
Ingresos	47 100	565 200
Total ingresos	47 100	565 200

La Tabla 3.41 presenta los flujos anuales realizados desde el inicio de la planta (Año 0), hasta el fin o cierre de la planta de tratamiento (Año 5).

Los ingresos totales son lo que se explicaron anteriormente en la Tabla 3.38 de la sección 3.8.5, mientras que los costos de operación son referidos a la suma de los costos fijos (mano de obra y mantenimiento de los equipos) y los costos variables (reactivos, otros materiales y los suministros o servicios básicos). La inversión es mencionada como la compra de los equipos requeridos para la planta, el terreno y la infraestructura para la construcción.

Tabla 3.41. Flujo de caja anual. Tiempo de vida útil: años.

Flujos De Caja	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Ingresos totales (USD)	-	565 200	565 200	565 200	565 200	565 200
Costos variables (USD)	-	93 222	93 222	93 222	93 222	93 222
Costo de suministros (USD)	-	8 216	8 216	8 216	8 216	8 216
Costos fijos (USD)	-	45 605	40 605,40	40 605	40 605	40 605
COSTOS DE OPERACIÓN (USD)	-	147 044	147 044	147 044	147 044	147 044
INVERSIÓN (USD) (terreno, equipos)	134 713	-	-	-	-	-
Flujo neto (USD)	- 134 713	418 156	418 156	418 156	418 156	418 156

Tabla 3.42. TIR, VAN, B/C

Tasa de descuento	10,00
VAN (USD)	293 971
B/C	1,84
TIR (%)	64,15 %

Como se observa en el Año 0 no existe ingreso puesto que se trata como el arranque de la planta y se asume que a partir del primer año de funcionamiento existen los ingresos. También se estipula que la planta de tratamiento de residuos trabaja con 16 t/mes. El flujo neto representa la diferencia entre los ingresos generados anualmente con los egresos producidos.

Como se puede apreciar en la Tabla 3.41 el flujo neto del primer año es mayor a la inversión del inicio, por lo que se puede estipular que el retorno de toda la inversión realizada se produce a partir del primer año de operación.

El valor de VAN (Valor Actual Neto) es la suma de todos los saldos del flujo de caja de un proyecto, descontando la inversión realizada. El valor de Van obtenido fue de 293 971 USD lo que corresponde a un valor positivo y el proyecto es rentable. El valor de TIR es de aproximadamente un 64,15 %, este valor es obtenido cuando el VAN es igual a 0. El valor de TIR es la tasa de rentabilidad máxima que podría pagar un proyecto para recuperar la inversión, los gastos de operación y se tenga iguales entradas y gastos. Cuando el TIR es positivo significa que se va a obtener mayores ganancias respecto a los gastos realizados.

La relación beneficio/costo (B/C) es de 1,84; este valor representa que los beneficios son mayores que los costos realizados anualmente. La oportunidad de aceptación de un proyecto se da cuando el valor de la relación es igual o mayor a 1.

Como se estimó indicó en la sección 3.8.5, estos ingresos se generan siempre que la empresa preste sus servicios de tratamiento y se venda el latón con valor comercial recuperado. Durante las operaciones del funcionamiento de la planta se

debe considerar pruebas y ensayos de toxicidad a nivel de laboratorio hacia los residuos ingresados al tratamiento y después de ser confinados lo cual representaría un gasto adicional sobre las ganancias que es alrededor del 2 %.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

Los residuos sólidos generados en la fundición de latón, con un d_{80} de 2 000 μm , fueron tratados mediante tamizado en húmedo a fin de evitar la generación de polvos y con una recirculación de aguas purificadas mediante filtración y sedimentación.

La fracción mayor a 150 μm fue sometida a ensayos de fusión con adición de cloruro de potasio como carga fundente a 900 °C para evitar la oxidación de cinc. El análisis de la fracción mencionada por medio de espectrometría de chispa presentó una concentración de 65 % de Cu, 31 % de Zn y 0,5 % de Fe; las cuales poseen la calidad de latón comercial.

La fundición realizada a la fracción menor de 150 μm con bórax y carbonato de sodio (como fundentes) a 900 °C, presentó una concentración de 90 % de Cu, 6 % de Zn y 3 % de Pb, dentro del cual presenta características similares a las de bronce.

El proceso de sedimentación a la fracción menor a 150 μm con adición de FeCl_3 originó una disolución de metales en el efluente como son Zn (125 mg/L) y Cu (1 mg/L). Este crecimiento de concentraciones se produjo a medida que incrementó el número de recirculaciones de agua durante el proceso de tamizado en húmedo, dentro de los cuales supera los valores límites establecidos por el TULAS.

El tratamiento de la fracción de residuos menor a 150 μm por medio de clasificación de tamaño en húmedo y filtración, solubilizan metales como el cinc con un máximo de 3 mg/L y pequeñas cantidades de cobre y plomo hasta 0,1 mg/L. El efluente puede reutilizarse ya que posee valores debajo del límite establecido por el TULAS (10 mg/L de Zn).

La estabilización de la escoria proveniente de la fundición de la fracción menor a 150 μm con cemento y arena (20 % de escoria), tuvo una mayor resistencia a la rotura (17,62 MPa), los cuales podrían disponerse a celdas de confinamiento.

Los análisis de toxicidad TCLP realizados a los residuos iniciales presentan una liberación de los metales al ambiente como Zn (de 10 300 mg/L a 70 mg/L), Cu (de 100 mg/L a 3 mg/L) y Pb (de 162 mg/L a 0,5 mg/L). Sin embargo, la estabilización a la escoria de los residuos fundidos presenta una concentración de Zn 12 mg/L, de Cu 2,5 mg/L y de Pb 0,4 mg/L.

El análisis preliminar técnico económico realizado para el tratamiento de residuos generados de 800 Kg/día, indica la factibilidad del proyecto con una tasa interna de retorno de 64,15 % y un valor actual neto de 293 971 USD, por lo que la recuperación total de la inversión realizada sería en un año aproximadamente.

4.2. RECOMENDACIONES

Es recomendable realizar a escala industrial el proceso de clasificación por tamaño en húmedo para evitar la generación de polvos que sería perjudicial para la salud tanto en el sector de trabajo como para el medio ambiente.

Realizar ensayos de sedimentación con diferentes tipos de floculantes y diversas concentraciones en función de la disponibilidad del reactivo en laboratorio y facilidad de adquisición. Entre los floculantes adicionales a realizarse están: sulfato de ferroso y férrico, cloruro de sodio.

Pese a los buenos resultados obtenidos mediante la estabilización del residuo con cemento y áridos finos, se puede añadir cal para realizar una comparación de bloques respecto a su resistencia a la compresión.

Realizar diferentes tipos de estabilización, ya sea en la elaboración de bloques, solidificación, ladrillos u hormigones a fin que se pueda encontrar algún tipo adicional de valorización del residuo antes de llevarse a confinamiento.

BIBLIOGRAFÍA

1. Advantech. (2001). *Test Sieving: Principles and Procedure*. Berlín, Alemania: Sin Editorial.
2. Aguilar, M.I. Sáenz, J. Llórens, M. Soler, A. Ortuño, J.F. (2002). *Tratamiento físico – químico de aguas residuales*. (1ra ed.). Murcia, España: Editorial Graf S.L.
3. Beverskog, B. y Puigdomenech, I. (1997). Revised Pourbaix Diagrams for Zinc at 25 – 300 °C. *Corrosion Science*. 39 (1), 107 – 114.
4. Calle, R. (2002). *XXV Congreso del Instituto Argentino de Profesores Universitarios de Costos: Los Residuos Industriales y el Medio Ambiente*. Buenos Aires, Argentina: Sin Editorial.
5. Capó, M. (2007). *Principios de Ecoxitología: Diagnóstico, Tratamiento y Gestión de Residuos*. Madrid, España: Editorial Tébar.
6. Comisión Ambiental Metropolitana y Sociedad Alemana de Cooperación Técnica (GTZ) TÜV ARGE-MEX (1996). *Concepto de Manejo de Residuos Peligrosos e Industriales para el Giro de la Fundición*. Recuperado de http://www.sma.df.gob.mx/sma/links/download/archivos/manual_residuos_peligrosos_giro_fundicion.pdf (Junio, 2011)
7. Comisión Nacional de Medio Ambiente - Región Metropolitana (1998). *Guía para el Control y Prevención de la Contaminación Industrial*. Recuperado de <http://www.ingenieroambiental.com/4014/rub-fundiciones.pdf> (Julio, 2011)
8. Elías, X. (2000). *Reciclaje de Residuos Industriales*. (1ra ed.). Ciudad de Fernández, España: Editorial Díaz de Santos.

9. Elías, X. (2009). *Reciclaje de Residuos Industriales*. (2da ed.). Ciudad de Fernández, España: Editorial Díaz de Santos.
10. Endecotts. (2009). *Test Sieving Manual*. Londres, Inglaterra: Endecotts.
11. Environmental Protection Agency EPA. (2003). *Method 1311: Toxicity Characteristic Leaching Procedure (Provides information about the toxicity characteristic leaching procedure)*. Recuperado de <http://www.epa.gov/wastes/hazard/testmethods/sw846/pdfs/1311.pdf>. (Junio, 2011)
12. Environmental Protection Agency EPA. (1995). *Water Treatment Manual Filtration*. Wexford, Irlanda: Sin Editorial.
13. Espinoza, J. J. (2003). Tratamiento y disposición final de residuos industriales generados en una refinería. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*. 6 (11), 11.
14. Fay, E. (2008). *Fundición de Metales*. Recuperado de <http://www.editum.org/Fundicion-de-metales-p-1277.html>. (Febrero, 2012)
15. Flores, G. J. I. (2006). *Estabilización de cenizas producto de la incineración de residuos peligrosos*. (Tesis Previa a la Obtención del título de Ingeniero Químico). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
16. Gaitán, P. K. (2008). *Estudio sobre las operaciones unitarias más utilizadas en los procesos de manufactura por las industrias de procesamiento de materiales instaladas en Guatemala*. (Tesis Previa a la Obtención del título de Ingeniera Química). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, Guatemala.

17. Galicia, M. L. Zaldivar, I. Hernández, J. (2009). *Procesos de separación, Prácticas de Laboratorio*. Ciudad de México, México: Sin Editorial.
18. García, A. y Rojas, A. (2006). Comparación de los floculantes Chemadd a-41, 42 y 43 de la firma Chematek, el ip-600 de la firma zar cia y el percol, versión canadiense del Magnafloc r-155. *Tecnología Química*. XXVI (3), 41.
19. Groover, M. (1997). *Fundamentos de Manufactura Moderna*. (1ra ed.). México, México: Editorial Prentice Hall.
20. Henry, G. y Heinke, G. (1999). *Ingeniería Ambiental*. (2da ed.). México, México: Editorial Pearson Education.
21. International Finance Corporation – World Bank Group. (2007). *Environmental, Health and Safety Guidelines Foundries*. Recuperado de [http://www.ifc.org/ifcext/sustainability.nsf/AttachmentsByTitle/gui_EHSGuidelines2007_Foundries/\\$FILE/Final+-+Foundries.pdf](http://www.ifc.org/ifcext/sustainability.nsf/AttachmentsByTitle/gui_EHSGuidelines2007_Foundries/$FILE/Final+-+Foundries.pdf). (Julio, 2011)
22. LaGrega, M. Buckingham, P. Evans, J. (1996). *Gestión de Residuos Tóxicos, Tratamiento, Eliminación y Recuperación de Suelos*. (1ra ed.). México, México: Editorial McGraw-Hill.
23. LLumiquina, D. C. A. (2011). *Purificación de residuos de latón de la industria de la grifería para su reciclaje*. (Tesis Previa a la Obtención del título de Ingeniera Química). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
24. Lovera, D. Arias, V. Coronado, R. (2004). La Valoración de las Escorias metalúrgicas como Residuos Industriales. *Instituto de Investigación FIGMMG*. 20 (7), 26.
25. Martínez, J. (2005). *Guía para la Gestión Integral de Residuos Peligrosos*. Montevideo. Uruguay: Sin Editorial.

26. Oficina de Planeamiento y Presupuesto de la República Oriental del Uruguay. (2004). Programa de Saneamiento de Montevideo y Área Metropolitana. *Plan Director de Residuos Sólidos de Montevideo y Área Metropolitana*. 4 (1), 21.
27. Pall Corporation. (2007). Metallic Media for the Chemical Industry. *IGIMPHAEN*. 1 (1), 5.
28. Pancorbo, F. (2009). *Latones al Plomo y Fabricación de Grifería*. 1 (4), 7, 8. Recuperado de <http://es.scribd.com/doc/21690339/Aleaciones-de-cobre-al-plomo-y-fabricacion-de-griferia> (Febrero, 2012)
29. Pardavé, W. (2006). *Reciclado Industrial de Metales, Una Aproximación*. (1ra ed.). Bogotá, Colombia: Ediciones Ecoe.
30. Queipo, M. Montalván, A. Ferrer, A. Veitia, E. Caparrós, Y. (2011). Aprovechamiento de los Residuales Sólidos de la Unidad Básica de Fundición en la Fábrica de Cemento 26 de Julio de Nuevitas. *Tecnología Química*. 31 (1), 76.
31. Sánchez, J. (2003). *Manejo de Residuos Industriales*. (1ra ed.). México, México: Sin Editorial.
32. Sánchez, M. Vergara, F. Castro, S. (2000) *Waste treatment and environmental impact in the mining industry*. Santiago, Chile: Concepción.
33. Soto, A. (2001). Coagulación y Floculación de Contaminantes del Agua. *Electronic Spreading of Science Knowledge*. 15 (1), 1.
34. Sulpizio, T. (2009). Advances in Filter Aid and Precoat Filtration Technology. *Presentation at the American Filtration & Separations Society. Annual Technical Conference*. 1 (1), 2.

35. Texto Unificado de la Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente, publicado el 31 de marzo de 2003 en la Edición Especial No. 2 del Registro Oficial por Decreto Presidencial No. 3516, (TULAS, libro VI, título V y Anexo VIII).
36. Tchobanoglous, G. y Burton, F. (1995). Operaciones Físicas Unitarias. En Metcalf & Eddy. *Ingeniería de Aguas Residuales; tratamiento, vertido y reutilización*. (pp. 220, 221). Barcelona, España: Editorial McGraw-Hill.
37. Universidad de Oviedo. (2008). *Cementos, Clasificación en Proceso Vía Seca, Separación Dinámica y Estática*. Recuperado de <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion16.CEMENTOS.SeparadoresAire.pdf>. (Junio, 2012)
38. Valero, J. M. y Ortiz, G. (2000). *Mejorar la Gestión de los Residuos Industriales, Desarrollo y Aplicación de Herramientas*. Recuperado de <http://www.infohoreco.es/html/files/pdf/amb/iq/361/29articulo.pdf>. (Febrero, 2012)
39. Villacreses, J. A. y Vega, J. C. (2006). *Estudio de la sedimentación en el tratamiento del agua*. (Tesis de grado de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra). Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil, Ecuador.
40. Weber, W. (2003). *Physicochemical Processes for Water Quality Control*. (Edición Wiley – Interscience). Barcelona, España: Editorial Reverté.

ANEXOS

ANEXO I

DETERMINACIÓN DE LA GRANULOMETRÍA

Ensayo N° 1

Cantidad a tamizar: 1,5 Kg
 Tipo de tamizado: En seco
 Tiempo de clasificación: 20 minutos

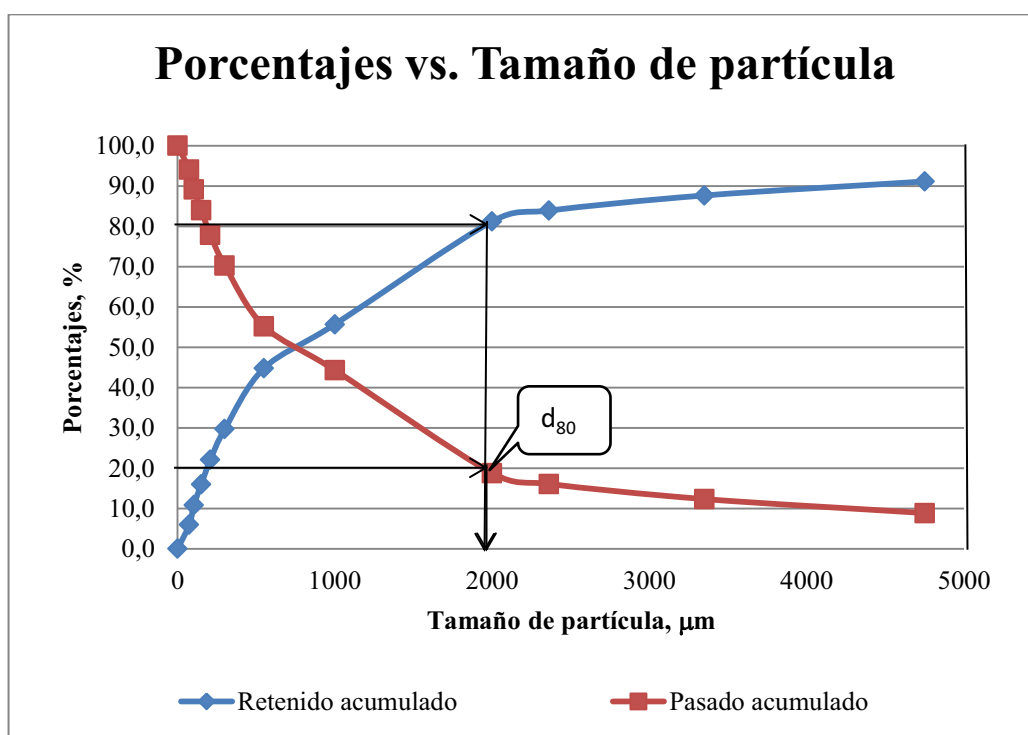


Tabla A.1. Análisis granulométrico.

Número de malla (# mesh)	Abertura de la malla (μm)	Peso retenido (g)	Retenido (%)	Retenido acumulado (%)	Pasado acumulado (%)
4	4750	109,2	8,9	8,9	91,1
6	3350	42,8	3,5	12,3	87,7
8	2360	46,3	3,8	16,1	83,9
10	2000	33,0	2,7	18,8	81,2
16	1000	314,8	25,5	44,3	55,7

Tabla A.1. Análisis granulométrico. (Continuación...)

30	550	134,0	10,9	55,2	44,8
50	300	186,3	15,1	70,3	29,7
70	208	94,0	7,6	77,9	22,1
100	150	75,1	6,1	84,0	16,0
150	104	63,6	5,2	89,2	10,8
200	74	60,3	4,9	94,1	5,9
fondo	-74	73,2	5,9	100,0	0,0
Alimentación Recalculada		1232,6	100,0	-	-

Ensayo N° 2

Cantidad a tamizar: 1,5 Kg

Tipo de tamizado: En húmedo

Tiempo de clasificación: 20 minutos

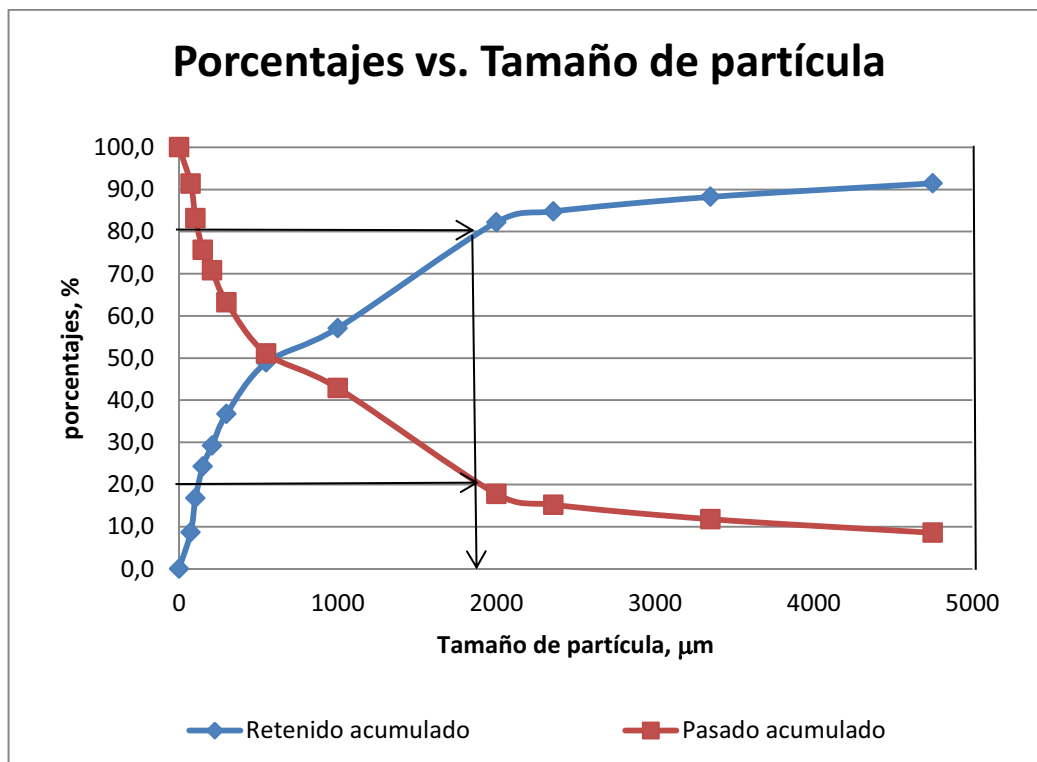


Tabla A.2. Granulometría de la clasificación por tamaño en húmedo.

Tamiz malla #	Abertura μm	Peso retenido (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasado acumulado
4	4750	105,4	8,6	8,6	91,4
6	3350	39,7	3,2	11,8	88,2
8	2360	42,2	3,4	15,2	84,8
10	2000	31,9	2,6	17,8	82,2
16	1000	309,5	25,1	42,9	57,1
30	550	100,7	8,2	51,1	48,9
50	300	150,0	12,2	63,2	36,8
70	208	93,2	7,6	70,8	29,2
100	150	60,2	4,9	75,7	24,3
150	104	92,7	7,5	83,2	16,8
200	74	100,6	8,2	91,4	8,6
-200	0	106,3	8,6	100,0	0,0

ANEXO II

**RECIRCULACIÓN DE AGUA EN EL PROCESO DE
CLASIFICACIÓN POR TAMAÑO EN HÚMEDO**

Ensayo N° 1

Peso de residuos: 1 Kg

Agua utilizada: 10 L

Tiempo de deslamado (tamizado en húmedo): 2 horas

Durante la clasificación por tamaño en húmedo en las mallas No. 10 (2 mm), No. 50 (300 μm) y No. 100 (150 μm), se obtuvo los porcentajes de los residuos que fueron retenidos en cada una de la mallas; del cual aproximadamente el 23 % pertenece a la fracción menor a 150 μm .

Tabla A.3. Recirculaciones de agua en clasificación por tamaño en húmedo.

ABERTURA DE LA MALLA (μm)	MUESTRA							
	Residuo de Fundición							
	agua inicial (g)	Segunda muestra, Primer Reciclo de agua (g)	Tercera muestra, Segundo Reciclo de agua (g)	Cuarta muestra, Tercer Reciclo de agua (g)	Quinta muestra, Cuarto Reciclo de agua (g)	Sexta muestra, Quinto Reciclo de agua (g)	Séptima muestra, Sexto Reciclo de agua (g)	% Retenido
2000	184,0	155,9	181,4	178,8	160,6	160,2	161,2	17,32
300	375,3	389,0	379,0	371,6	385,9	407,8	415,0	39,91
150	208,4	195,5	196,0	209,9	212,2	172,7	175,1	20,07
<150	222,3	245,2	163,0	237,5	219,0	256,0	206,2	22,70
TOTAL	990,0	985,6	919,4	997,8	977,7	996,7	957,5	100,00

Las muestras recolectadas de agua a partir de la separación del líquido con el sólido, fueron analizadas por AA (absorción atómica) en el equipo AAnalyst 300 de la del Departamento de Metalurgia Extrativa.

Tabla A.4. Concentración de metales en las recirculaciones de agua sin tratamiento de filtración ni sedimentación.

ELEMENTOS	MUESTRA						
	Agua Residuo de Fundición						
	Original	Primer Reciclo	Segundo Reciclo	Tercer Reciclo	Cuarto Reciclo	Quinto Reciclo	Sexto Reciclo
Al (mg/L)	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1
Cu (mg/L)	1,56	0,1	0,2	0,1	0,08	0,08	0,07
Fe (mg/L)	<0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01
Zn (mg/L)	0,22	0,34	0,32	0,28	0,24	0,26	0,4
Sn (mg/L)	-	-	-	-	-	-	-
Cr (mg/L)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
As (ug/L)	<0,1	10,4	5,1	1,7			
Ba (mg/L)	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Cd (mg/L)	-	-	-	-	-	-	-
Hg (ug/L)	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Ni (mg/L)	0,01	0,03	0,02	0,03	0,01	<0,01	<0,01
Ag (mg/L)	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Pb (mg/L)	<0,1	0,1	0,2	0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Se (ug/L)	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	-	-	-

ANEXO III

RECIRCULACIÓN DE AGUA EN EL PROCESO DE CLASIFICACIÓN POR TAMAÑO EN HÚMEDO TRATAMIENTO POR MEDIO DE FILTRACIÓN

Ensayo N° 1

Peso de residuos: 1 Kg

Agua utilizada: 10 L

Tiempo de deslamado (tamizado en húmedo): 2 horas

Tiempo de filtración: 5 minutos.

Tabla A.5. Recirculaciones de agua en clasificación por tamaño en húmedo.

ABERTURA DE LA MALLA (µm)	MUESTRA						
	Residuo de Fundición						
	Agua inicial (g)	Segunda muestra, Primer Reciclo de agua (g)	Tercera muestra, Segundo Reciclo de agua (g)	Cuarta muestra, Tercer Reciclo de agua (g)	Quinta muestra, Cuarto Reciclo de agua (g)	Sexta muestra, Quinto Reciclo de agua (g)	% Retenido
2000	201,2	190,4	222,0	161,6	175,8	154,6	18,61
300	357,0	370,3	368,1	373,2	378,5	376,2	37,06
150	208,4	206,3	188,7	237,4	201,8	216,6	21,20
<150	219,7	229,4	212,6	223,8	237,2	247,9	23,13
TOTAL	986,3	996,4	991,4	996,0	993,3	995,3	100,00

ANEXO IV

**RECIRCULACIÓN DE AGUA EN EL PROCESO DE
CLASIFICACIÓN POR TAMAÑO EN HÚMEDO TRATAMIENTO
POR MEDIO DE SEDIMENTACIÓN**

Ensayo N° 1**Peso de residuos:** 1 Kg**Agua utilizada:** 10 L**Tiempo de deslamado (tamizado en húmedo):** 2 horas**Tipo de floculante:** Cal 0,25 %**Tiempo de sedimentación:** 24 horas.**Tabla A.7.** Recirculaciones de agua en clasificación por tamaño en húmedo.

ABERTURA DE LA MALLA (μm)	MUESTRA							
	Residuo de Fundición							
	Agua inicial (g)	Segunda muestra, Primer Reciclo de agua (g)	Tercera muestra, Segundo Reciclo de agua (g)	Cuarta muestra, Tercer Reciclo de agua (g)	Quinta muestra, Cuarto Reciclo de agua (g)	Sexta muestra, Quinto Reciclo de agua (g)	Séptima muestra, Sexto Reciclo de agua (g)	% Retenidos
2000	184,0	155,9	181,4	178,8	160,6	160,2	161,2	17,32
300	375,3	389,0	379,0	371,6	385,9	407,8	415,0	39,91
150	208,4	195,5	196,0	209,9	212,2	172,7	175,1	20,07
<150	222,3	245,2	163,0	237,5	219,0	256,0	206,2	22,70
TOTAL	990,0	985,6	919,4	997,8	977,7	996,7	957,5	100,00

Puesto a que las concentraciones de los metales Aluminio (Al), Estaño (Sn), Bario (Ba), Selenio (Se), Arsénico (As) y Mercurio (Hg), no varían ni influyen dentro de las lecturas por absorción atómica realizadas como se indica en los Anexos II y III. No se tomó en cuenta para los siguientes análisis.

Tabla A.8. Concentraciones de metales en el efluente tratado por filtración.

ELEMENTOS	MUESTRA					
	Agua Residuo de Fundición en la Sedimentación					
	Agua Inicial	Primer Reciclo	Segundo Reciclo	Tercer Reciclo	Cuarto Reciclo	Quinto Reciclo
Al (mg/L)	-	-	-	-	-	-
Cu (mg/L)	<0,01	1,47	1,27	0,26	0,21	0,11
Fe (mg/L)	0,04	0,02	0,02	0,03	0,11	0,08
Zn (mg/L)	0,09	3,12	2,06	1,74	1,32	0,63
Sn (mg/L)	-	-	-	-	-	-
Cr (mg/L)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,02	<0,01
Ba (mg/L)	-	-	-	-	-	-
Cd (mg/L)	0,01	0,01	0,01	<0,01	<0,01	0,03
Ni (mg/L)	0,01	0,02	0,04	<0,01	0,08	0,01
Ag (mg/L)	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Pb (mg/L)	1,5	100	130	112	141	85
Se (µg/L)	-	-	-	-	-	-
As (µg/L)	-	-	-	-	-	-
Hg (µg/L)	-	-	-	-	-	-

ANEXO V

**RECIRCULACIÓN DE AGUA EN EL PROCESO DE
CLASIFICACIÓN POR TAMAÑO EN HÚMEDO TRATAMIENTO
POR MEDIO DE SEDIMENTACIÓN**

Ensayo N° 1

Peso de residuos: 1 Kg
Agua utilizada: 10 L
Tiempo de deslamado (tamizado en húmedo): 2 horas
Tipo de floculante: Cloruro férrico, 1 g/L
Tiempo de sedimentación: 24 horas.

Tabla A.9. Recirculaciones de agua en clasificación por tamaño en húmedo.

ELEMENTOS	MUESTRA						
	Agua Residuo de Fundición en la Sedimentación						
	Agua Inicial	Primer Reciclo	Segundo Reciclo	Tercer Reciclo	Cuarto Reciclo	Quinto Reciclo	Sexto Reciclo
Al (mg/L)	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Cu (mg/L)	0,02	0,6	0,11	0,13	1,44	1,04	0,23
Fe (mg/L)	0,02	0,02	0,12	0,02	0,03	0,02	0,04
Zn (mg/L)	113	121	120	123	124	125	125
Sn (mg/L)	-	-	-	-	-	-	-
Cr (mg/L)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Cd (mg/L)	0,4	0,12	0,31	0,29	0,3	0,41	0,51
Ni (mg/L)	0,1	0,27	0,52	0,43	0,37	0,65	0,58
Ag (mg/L)	-	-	-	-	-	-	-
Pb (mg/L)	0,1	0,2	0,8	0,2	1,3	1,5	0,6
Se (µg/L)	-	-	-	-	-	-	-
As (µg/L)	-	-	-	-	-	-	-
Hg (µg/L)	-	-	-	-	-	-	-

ANEXO VI

**RECIRCULACIÓN DE AGUA EN EL PROCESO DE
CLASIFICACIÓN POR TAMAÑO EN HÚMEDO TRATAMIENTO
POR MEDIO DE SEDIMENTACIÓN**

Ensayo N° 1

Peso de residuos: 1 Kg
Agua utilizada: 10 L
Tiempo de deslamado (tamizado en húmedo): 2 horas
Tipo de floculante: Poliacrilamida, 1 g/L
Tiempo de sedimentación: 24 horas.

Tabla A.10. Recirculaciones de agua en clasificación por tamaño en húmedo.

ELEMENTOS	MUESTRA					
	Agua Residuo de Fundición en la Sedimentación					
	Agua Inicial	Primer Reciclo	Segundo Reciclo	Tercer Reciclo	Cuarto Reciclo	Quinto Reciclo
Al (mg/L)	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Cu (mg/L)	0,04	0,06	0,1	0,11	0,08	0,15
Fe (mg/L)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Zn (mg/L)	0,33	0,57	3,5	1,01	2,23	2,8
Sn (mg/L)	-	-	-	-	-	-
Cr (mg/L)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Cd (mg/L)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Ni (mg/L)	0,4	0,39	0,15	0,3	0,44	0,31
Ag (mg/L)	-	-	-	-	-	-
Pb (mg/L)	<0,1	<0,1	<0,1	0,2	0,1	0,2
Se (µg/L)	-	-	-	-	-	-
As (µg/L)	-	-	-	-	-	-
Hg (µg/L)	-	-	-	-	-	-

ANEXO VII

CONCENTRACIÓN DE METALES EN EL RESIDUO MENOR A

150 μm

Ensayo N° 1

Método aplicado: Fusión Alcalina**Peso de residuos:** 100 mg**Reactivos utilizados****Peróxido de sodio:** 2 g**Hidróxido de sodio:** 1,5 g**Volumen de aforo:** 250 ml**Tabla A.11.** Concentraciones de metales en el residuo menor a 150 μm .

	INICIAL			CLORURO FÉRRICO		
	Lectura AA (mg/L)	Concentración (%)	Concentración (mg/kg)	Lectura AA (mg/L)	Concentración (%)	Concentración (mg/kg)
Al (mg/L)	19,3	4,81	48057,77	6,6	1,64	16434,26
Cu (mg/L)	135	33,65	336490,53	41,2	10,26	102589,64
Fe (mg/L)	1,66	0,41	4137,59	10,25	2,55	25522,91
Zn (mg/L)	152	37,89	378863,41	121	30,13	301294,82
Cr (mg/L)	0,19	0,05	473,58	0,18	0,04	448,21
Cd (mg/L)	0,18	0,04	448,65	0,08	0,02	199,20
Ni (mg/L)	1,16	0,29	2891,33	1	0,25	2490,04
Ag (mg/L)	0,02	0,00	49,85	0,14	0,03	348,61
Pb (mg/L)	4,2	1,05	10468,59	4,1	1,02	10209,16

ANEXO VIII

DETERMINACIÓN DE LA RECUPERACIÓN DE METALES PROVENIENTES DE SEDIMENTACIÓN POR MEDIO DE LIXIVIACIÓN

FICHA TÉCNICA N° 1

Tipo de ensayo:	Determinación de la recuperación de cinc, cobre, plomo y hierro.
Proceso proveniente:	Sedimentación
Proceso aplicado:	Lixiviación en medio ácido con H ₂ SO ₄ , 120 g/L.
% sólidos:	10 %.
Peso de cabeza:	30 g

Objetivo: Determinar la recuperación de cinc, plomo, cobre y hierro proveniente de la sedimentación por medio del proceso de lixiviación en medio ácido.

Tabla A.12. Recuperación de cinc en medio ácido. Procedencia: residuos tratados por sedimentación. Concentración al 10 % de sólidos.

ZINC				
MUESTRA	Volumen [ml] ó Peso [mg]	Concentración [mg/L] ó [%]	Peso [mg]	Recuperación [%]
Solución Fuerte [ml]	180,00	23 800,00	4284,00	37,69
Solución de Lavado [ml]	122,00	3000,00	366,00	3,22
Relave [mg]	21 800,00	308,12	6 717,00	59,09
	-	37,89	11 367,00	100,00
Cabeza [mg]	30 000,00	37,89	11 367,00	-

Tabla A.13. Recuperación de cobre en medio ácido. Procedencia: residuos tratados por sedimentación. Concentración al 10 % de sólidos.

COBRE				
MUESTRA	Volumen [ml] ó Peso [mg]	Concentración [mg/L] ó [%]	Peso [mg]	Recuperación [%]
Solución Fuerte [ml]	180,00	17,13	3,08	0,03
Solución de Lavado [ml]	122,00	86,20	10,52	0,10
Relave [mg]	21 800,00	462,45	10 081,40	99,87
	-	33,65	10 095,00	100,00
Cabeza [mg]	30 000,00	33,65	10 095,00	-

Tabla A.14. Recuperación de hierro en medio ácido. Procedencia: residuos tratados por sedimentación. Concentración al 10 % de sólidos.

HIERRO				
MUESTRA	Volumen [ml] ó Peso [mg]	Concentración [mg/L] ó [%]	Peso [mg]	Recuperación [%]
Solución Fuerte [ml]	180,00	29,82	5,37	4,36
Solución de Lavado [ml]	122,00	22,00	2,68	2,18
Relave [mg]	21 800,00	5,27	114,95	93,45
	-	0,41	123,00	100,00
Cabeza [mg]	30 000,00	0,41	123,00	-

Tabla A.15. Recuperación de plomo en medio ácido. Procedencia: residuos tratados por sedimentación. Concentración al 10 % de sólidos.

PLOMO				
MUESTRA	Volumen [ml] ó Peso [mg]	Concentración [mg/L] ó [%]	Peso [mg]	Recuperación [%]
Solución Fuerte [ml]	180,00	30,00	5,40	1,71
Solución de Lavado [ml]	122,00	2,90	0,35	0,11
Relave [mg]	21 800,00	14,19	309,25	98,17
	-	1,05	315,00	100,00
Cabeza [mg]	30 000,00	1,05	315,00	-

FICHA TÉCNICA N° 2

Tipo de ensayo:	Determinación de la recuperación de cinc, cobre, plomo y hierro.
Proceso proveniente:	Sedimentación
Proceso aplicado:	Lixiviación en medio ácido con H ₂ SO ₄ , 120 g/L.
% sólidos:	30 %.
Peso de cabeza:	30 g

Objetivo: Determinar la recuperación de cinc, plomo, cobre y hierro proveniente de la sedimentación por medio del proceso de lixiviación en medio ácido.

Tabla A.16. Recuperación de cinc en medio ácido. Procedencia: residuos tratados por sedimentación. Concentración al 30 % de sólidos.

ZINC				
MUESTRA	Volumen [ml] ó Peso [mg]	Concentración [mg/L] ó [%]	Peso [mg]	Recuperación [%]
Solución Fuerte [ml]	17,00	93 600,00	1591,20	14,00
Solución de Lavado [ml]	30,00	8 000,00	240,00	2,11
Relave [mg]	23 000,00	414,60	9535,80	83,89
		37,89	11 367,00	100,00
Cabeza [mg]	30 000,00	37,89	11 367,00	

Tabla A.17. Recuperación de cobre en medio ácido. Procedencia: residuos tratados por sedimentación. Concentración al 30 % de sólidos.

COBRE				
MUESTRA	Volumen [ml], Peso [mg]	Concentración [mg/L], [%]	Peso [mg]	Recuperación [%]
Solución Fuerte [ml]	17,00	5,61	0,10	0,00
Solución de Lavado [ml]	30,00	3,02	0,09	0,00
Relave [mg]	23 000,00	438,90	10 094,81	100,00
		33,65	10 095,00	100,00
Cabeza [mg]	30 000,00	33,65	10 095,00	

Tabla A.18. Recuperación de hierro en medio ácido. Procedencia: residuos tratados por sedimentación. Concentración al 30 % de sólidos.

HIERRO				
MUESTRA	Volumen [ml], Peso [mg]	Concentración [mg/L], [%]	Peso [mg]	Recuperación [%]
Solución Fuerte [ml]	17,00	1,80	0,03	0,02
Solución de Lavado [ml]	30,00	1,00	0,03	0,02
Relave [mg]	23 000,00	5,35	122,94	99,95
		0,41	123,00	100,00
Cabeza [mg]	30 000,00	0,41	123,00	

Tabla A.19. Recuperación de hierro en medio ácido. Procedencia: residuos tratados por sedimentación. Concentración al 30 % de sólidos.

PLOMO				
MUESTRA	Volumen [ml], Peso [mg]	Concentración [mg/L], [%]	Peso [mg]	Recuperación [%]
Solución Fuerte [ml]	17,00	20,00	0,34	0,11
Solución de Lavado [ml]	30,00	22,00	0,66	0,21
Relave [mg]	23 000,00	13,65	314,00	99,68
		1,05	315,00	100,00
Cabeza [mg]	30 000,00	1,05	315,00	

FICHA TÉCNICA N° 3

Tipo de ensayo:	Determinación de la recuperación de cinc, cobre, plomo y hierro.
Proceso proveniente:	Sedimentación
Proceso aplicado:	Lixiviación en medio ácido con NaOH (100 g/L).
% sólidos:	10 %.
Peso de cabeza:	30 g

Objetivo: Determinar la recuperación de cinc, plomo, cobre y hierro proveniente de la sedimentación por medio del proceso de lixiviación en medio alcalino.

Tabla A.20. Recuperación de cinc en medio alcalino. Procedencia: residuos tratados por sedimentación. Concentración al 10 % de sólidos.

ZINC				
MUESTRA	Volumen [ml] ó Peso [mg]	Concentración [mg/L], [%]	Peso [mg]	Recuperación [%]
Solución Fuerte [ml]	200,00	78,00	15,60	0,14
Solución de Lavado [ml]	128,00	42,00	5,38	0,05
Relave [mg]	27,68	409 899,71	11 346,02	99,82
		37,89	11 367,00	100,00
Cabeza [mg]	30 000,00	37,89	11 367,00	

Tabla A.21. Recuperación de cobre en medio alcalino. Procedencia: residuos tratados por sedimentación. Concentración al 10 % de sólidos.

COBRE				
MUESTRA	Volumen [ml], Peso [mg]	Concentración [mg/L], [%]	Peso [mg]	Recuperación [%]
Solución Fuerte [ml]	200,00	1,71	0,34	0,00
Solución de Lavado [ml]	128,00	2,04	0,26	0,00
Relave [mg]	27,68	364 681,97	10 094,40	99,99
		33,65	10 095,00	100,00
Cabeza [mg]	30 000,00	33,65	10 095,00	

Tabla A.22. Recuperación de hierro en medio alcalino. Procedencia: residuos tratados por sedimentación. Concentración al 10 % de sólidos.

HIERRO				
MUESTRA	Volumen [ml], Peso [mg]	Concentración [mg/L], [%]	Peso [mg]	Recuperación [%]
Solución Fuerte [ml]	200,00	4,08	0,82	0,66
Solución de Lavado [ml]	128,00	1,27	0,16	0,13
Relave [mg]	27,68	44 08,29	122,02	99,20
		0,41	123,00	100,00
Cabeza [mg]	30 000,00	0,41	123,00	

Tabla A.23. Recuperación de hierro en medio alcalino. Procedencia: residuos tratados por sedimentación. Concentración al 10 % de sólidos.

PLOMO				
MUESTRA	Volumen [ml], Peso [mg]	Concentración [mg/L], [%]	Peso [mg]	Recuperación [%]
Solución Fuerte [ml]	200,00	100,00	20,00	6,35
Solución de Lavado [ml]	128,00	30,00	3,84	1,22
Relave [mg]	27,68	10 518,79	291,16	92,43
		1,05	315,00	100,00
Cabeza [mg]	30 000,00	1,05	315,00	

FICHA TÉCNICA N° 4

Tipo de ensayo: Determinación de la recuperación de cinc, cobre, plomo y hierro.

Proceso proveniente: Sedimentación

Proceso aplicado: Lixiviación en medio ácido con NaOH (120 g/L).

% sólidos: 30 %.

Peso de cabeza: 30 g

Objetivo: Determinar la recuperación de cinc, plomo, cobre y hierro proveniente de la sedimentación por medio del proceso de lixiviación en medio alcalino.

Tabla A.24. Recuperación de cinc en medio alcalino. Procedencia: residuos tratados por sedimentación. Concentración al 30 % de sólidos.

ZINC				
MUESTRA	Volumen [ml], Peso [mg]	Concentración [mg/L], [%]	Peso [mg]	Recuperación [%]
Solución Fuerte [ml]	32,00	92,00	2,94	0,03
Solución de Lavado [ml]	36,00	16,00	0,58	0,01
Relave [mg]	24,20	469 565,29	11 363,48	99,97
		37,89	11 367,00	100,00
Cabeza [mg]	30 000,00	37,89	11 367,00	

Tabla A.25. Recuperación de cobre en medio alcalino. Procedencia: residuos tratados por sedimentación. Concentración al 30 % de sólidos.

COBRE				
MUESTRA	Volumen [ml], Peso [mg]	Concentración [mg/L], [%]	Peso [mg]	Recuperación [%]
Solución Fuerte [ml]	32,00	0,40	0,01	0,00
Solución de Lavado [ml]	36,00	0,74	0,03	0,00
Relave [mg]	24,20	417 147,13	10 094,96	100,00
		33,65	10 095,00	100,00
Cabeza [mg]	30 000,00	33,65	10 095,00	

Tabla A.26. Recuperación de hierro en medio alcalino. Procedencia: residuos tratados por sedimentación. Concentración al 30 % de sólidos.

HIERRO				
MUESTRA	Volumen [ml], Peso [mg]	Concentración [mg/L], [%]	Peso [mg]	Recuperación [%]
Solución Fuerte [ml]	32,00	4,08	0,13	0,11
Solución de Lavado [ml]	36,00	1,27	0,05	0,04
Relave [mg]	24,20	5 075,36	122,82	99,86
		0,41	123,00	100,00
Cabeza [mg]	30 000,00	0,41	123,00	

Tabla A.27. Recuperación de hierro en medio alcalino. Procedencia: residuos tratados por sedimentación. Concentración al 30 % de sólidos.

PLOMO				
MUESTRA	Volumen [ml], Peso [mg]	Concentración [mg/L], [%]	Peso [mg]	Recuperación [%]
Solución Fuerte [ml]	32,00	290,00	9,28	2,95
Solución de Lavado [ml]	36,00	130,00	4,68	1,49
Relave [mg]	24,20	12439,67	301,04	95,57
		1,05	315,00	100,00
Cabeza [mg]	30000,00	1,05	315,00	

FICHA TÉCNICA N° 5

Tipo de ensayo:	Determinación de la recuperación de cinc, cobre, plomo y hierro.
Proceso proveniente:	Filtración
Proceso aplicado:	Lixiviación en medio ácido con H ₂ SO ₄ (120 g/L).
% sólidos:	10 %.
Peso de cabeza:	30 g

Objetivo: Determinar la recuperación de cinc, plomo, cobre y hierro proveniente de la sedimentación por medio del proceso de lixiviación en medio ácido.

Tabla A.28. Recuperación de cinc en medio ácido. Procedencia: residuos tratados por filtración. Concentración al 10 % de sólidos.

ZINC				
MUESTRA	Volumen [ml], Peso [mg]	Concentración [mg/L], [%]	Peso [mg]	Recuperación [%]
Solución Fuerte [ml]	180,00	21 300,00	3 834,00	33,73
Solución de Lavado [ml]	120,00	1 000,00	120,00	1,06
Relave [mg]	21 400,00	346,40	7 413,00	65,22
		37,89	11 367,00	100,00
Cabeza [mg]	30 000,00	37,89	11 367,00	

Tabla A.29. Recuperación de cobre en medio ácido. Procedencia: residuos tratados por filtración. Concentración al 10 % de sólidos.

COBRE				
MUESTRA	Volumen [ml], Peso [mg]	Concentración [mg/L], [%]	Peso [mg]	Recuperación [%]
Solución Fuerte [ml]	180,00	191,00	34,38	0,34
Solución de Lavado [ml]	120,00	65,00	7,80	0,08
Relave [mg]	21 400,00	469,76	10 052,82	99,58
		33,65	10 095,00	100,00
Cabeza [mg]	30 000,00	33,65	10 095,00	

Tabla A.30. Recuperación de hierro en medio ácido. Procedencia: residuos tratados por filtración. Concentración al 10 % de sólidos.

HIERRO				
MUESTRA	Volumen [ml], Peso [mg]	Concentración [mg/L], [%]	Peso [mg]	Recuperación [%]
Solución Fuerte [ml]	180,00	13,67	2,46	2,00
Solución de Lavado [ml]	120,00	11,10	1,33	1,08
Relave [mg]	21 400,00	5,57	119,21	96,92
		0,41	123,00	100,00
Cabeza [mg]	30 000,00	0,41	123,00	

Tabla A.31. Recuperación de hierro en medio ácido. Procedencia: residuos tratados por filtración. Concentración al 10 % de sólidos.

PLOMO				
MUESTRA	Volumen [ml], Peso [mg]	Concentración [mg/L], [%]	Peso [mg]	Recuperación [%]
Solución Fuerte [ml]	180,00	30,00	5,40	1,71
Solución de Lavado [ml]	120,00	2,70	0,32	0,10
Relave [mg]	21 400,00	14,45	309,28	98,18
		1,05	315,00	100,00
Cabeza [mg]	30 000,00	1,05	315,00	

FICHA TÉCNICA N° 6

Tipo de ensayo:	Determinación de la recuperación de cinc, cobre, plomo y hierro.
Proceso proveniente:	Filtración
Proceso aplicado:	Lixiviación en medio ácido con H ₂ SO ₄ , 120 g/L.
% sólidos:	30 %.
Peso de cabeza:	30 g

Objetivo: Determinar la recuperación de cinc, plomo, cobre y hierro proveniente de la sedimentación por medio del proceso de lixiviación en medio ácido.

Tabla A.32. Recuperación de cinc en medio ácido. Procedencia: residuos tratados por filtración. Concentración al 30 % de sólidos.

ZINC				
MUESTRA	Volumen [ml], Peso [mg]	Concentración [mg/L], [%]	Peso [mg]	Recuperación [%]
Solución Fuerte [ml]	14,00	80 000,00	1 120,00	9,85
Solución de Lavado [ml]	29,00	19400,00	562,60	4,95
Relave [mg]	27,30	354 739,93	9 684,40	85,20
		37,89	11 367,00	100,00
Cabeza [mg]	30 000,00	37,89	11 367,00	

Tabla A.33. Recuperación de cobre en medio ácido. Procedencia: residuos tratados por filtración. Concentración al 30 % de sólidos.

COBRE				
MUESTRA	Volumen [ml], Peso [mg]	Concentración [mg/L], [%]	Peso [mg]	Recuperación [%]
Solución Fuerte [ml]	14,00	2,17	0,03	0,00
Solución de Lavado [ml]	29,00	0,45	0,01	0,00
Relave [mg]	27,30	369 778,63	10 094,96	100,00
		33,65	10 095,00	100,00
Cabeza [mg]	30 000,00	33,65	10 095,00	

Tabla A.34. Recuperación de hierro en medio ácido. Procedencia: residuos tratados por filtración. Concentración al 30 % de sólidos.

HIERRO				
MUESTRA	Volumen [ml], Peso [mg]	Concentración [mg/L], [%]	Peso [mg]	Recuperación [%]
Solución Fuerte [ml]	14,00	1,73	0,02	0,02
Solución de Lavado [ml]	29,00	1,72	0,05	0,04
Relave [mg]	27,30	4 502,78	122,93	99,94
		0,41	123,00	100,00
Cabeza [mg]	30 000,00	0,41	123,00	

Tabla A.35. Recuperación de hierro en medio ácido. Procedencia: residuos tratados por filtración. Concentración al 30 % de sólidos.

PLOMO				
MUESTRA	Volumen [ml], Peso [mg]	Concentración [mg/L], [%]	Peso [mg]	Recuperación [%]
Solución Fuerte [ml]	14,00	30,00	0,42	0,13
Solución de Lavado [ml]	29,00	5,10	0,15	0,05
Relave [mg]	27,30	11 517,66	314,43	99,82
		1,05	315,00	100,00
Cabeza [mg]	30 000,00	1,05	315,00	

FICHA TÉCNICA N° 7

Tipo de ensayo:	Determinación de la recuperación de cinc, cobre, plomo y hierro.
Proceso proveniente:	Filtración
Proceso aplicado:	Lixiviación en medio ácido con NaOH (100 g/L).
% sólidos:	10 %.
Peso de cabeza:	30 g

Objetivo: Determinar la recuperación de cinc, plomo, cobre y hierro proveniente de la filtración por medio del proceso de lixiviación en medio alcalino.

Tabla A.36. Recuperación de cinc en medio alcalino. Procedencia: residuos tratados por filtración. Concentración al 10 % de sólidos.

ZINC				
MUESTRA	Volumen [ml], Peso [mg]	Concentración [mg/L], [%]	Peso [mg]	Recuperación [%]
Solución Fuerte [ml]	220,00	49,00	10,78	0,09
Solución de Lavado [ml]	128,00	169,00	21,63	0,19
Relave [mg]	27,47	412 616,96	11 334,59	99,71
		37,89	11 367,00	100,00
Cabeza [mg]	30 000,00	37,89	11 367,00	

Tabla A.37. Recuperación de cobre en medio alcalino. Procedencia: residuos tratados por filtración. Concentración al 10 % de sólidos.

COBRE				
MUESTRA	Volumen [ml], Peso [mg]	Concentración [mg/L], [%]	Peso [mg]	Recuperación [%]
Solución Fuerte [ml]	220,00	0,38	0,08	0,00
Solución de Lavado [ml]	128,00	0,62	0,08	0,00
Relave [mg]	27,47	367 485,88	10 094,84	100,00
		33,65	10 095,00	100,00
Cabeza [mg]	30 000,00	33,65	10 095,00	

Tabla A.38. Recuperación de hierro en medio alcalino. Procedencia: residuos tratados por filtración. Concentración al 10 % de sólidos.

HIERRO				
MUESTRA	Volumen [ml], Peso [mg]	Concentración [mg/L], [%]	Peso [mg]	Recuperación [%]
Solución Fuerte [ml]	220,00	3,43	0,75	0,61
Solución de Lavado [ml]	128,00	1,46	0,19	0,15
Relave [mg]	27,47	4 443,34	122,06	99,23
		0,41	123,00	100,00
Cabeza [mg]	30 000,00	0,41	123,00	

Tabla A.39. Recuperación de hierro en medio alcalino. Procedencia: residuos tratados por filtración. Concentración al 10 % de sólidos.

PLOMO				
MUESTRA	Volumen [ml], Peso [mg]	Concentración [mg/L], [%]	Peso [mg]	Recuperación [%]
Solución Fuerte [ml]	220,00	120,00	26,40	8,38
Solución de Lavado [ml]	128,00	30,00	3,84	1,22
Relave [mg]	27,47	10 366,22	284,76	90,40
		1,05	315,00	100,00
Cabeza [mg]	30 000,00	1,05	315,00	

FICHA TÉCNICA N° 8

Tipo de ensayo:	Determinación de la recuperación de cinc, cobre, plomo y hierro.
Proceso proveniente:	Filtración
Proceso aplicado:	Lixiviación en medio ácido con NaOH (100 g/L).
% sólidos:	30 %.
Peso de cabeza:	30 g

Objetivo: Determinar la recuperación de cinc, plomo, cobre y hierro proveniente de la filtración por medio del proceso de lixiviación en medio alcalino.

Tabla A.40. Recuperación de cinc en medio alcalino. Procedencia: residuos tratados por filtración. Concentración al 30 % de sólidos.

ZINC				
MUESTRA	Volumen [ml], Peso [mg]	Concentración [mg/L], [%]	Peso [mg]	Recuperación [%]
Solución Fuerte [ml]	37,00	658,00	24,35	0,21
Solución de Lavado [ml]	31,00	35,00	1,09	0,01
Relave [mg]	23,20	488 860,73	11 341,57	99,78
		37,89	11 367,00	100,00
Cabeza [mg]	30 000,00	37,89	11 367,00	

Tabla A.41. Recuperación de cobre en medio alcalino. Procedencia: residuos tratados por filtración. Concentración al 30 % de sólidos.

COBRE				
MUESTRA	Volumen [ml], Peso [mg]	Concentración [mg/L], [%]	Peso [mg]	Recuperación [%]
Solución Fuerte [ml]	37,00	1,30	0,05	0,00
Solución de Lavado [ml]	31,00	1,92	0,06	0,00
Relave [mg]	23,20	435 124,67	10 094,89	100,00
		33,65	10 095,00	100,00
Cabeza [mg]	30 000,00	33,65	10 095,00	

Tabla A.42. Recuperación de hierro en medio alcalino. Procedencia: residuos tratados por filtración. Concentración al 30 % de sólidos.

HIERRO				
MUESTRA	Volumen [ml], Peso [mg]	Concentración [mg/L], [%]	Peso [mg]	Recuperación [%]
Solución Fuerte [ml]	37,00	3,71	0,14	0,11
Solución de Lavado [ml]	31,00	1,01	0,03	0,03
Relave [mg]	23,20	5 294,46	122,83	99,86
		0,41	123,00	100,00
Cabeza [mg]	30 000,00	0,41	123,00	

Tabla A.43. Recuperación de hierro en medio alcalino. Procedencia: residuos tratados por filtración. Concentración al 30 % de sólidos.

PLOMO				
MUESTRA	Volumen [ml], Peso [mg]	Concentración [mg/L], [%]	Peso [mg]	Recuperación [%]
Solución Fuerte [ml]	37,00	420,00	15,54	4,93
Solución de Lavado [ml]	31,00	60,00	1,86	0,59
Relave [mg]	23,20	12 827,59	297,60	94,48
		1,05	315,00	100,00
Cabeza [mg]	30 000,00	1,05	315,00	

ANEXO IX

ENSAYOS DE SEDIMENTACIÓN CON DIFERENTES AGENTES FLOCULANTES.

Ensayo N° 1

Método aplicado: Determinación de la velocidad de sedimentación

Volumen tratado: 2 L

Tabla A.44. Datos relacionados a la altura vs. tiempo.

TIEMPO (min)	ALTURA (cm)	
	Sin Floculante	Floculante
		$Al_2(SO_4)_3$ 1g/l
0,0	39,8	39,8
0,2	39,4	39,2
0,3	39,2	38,8
0,5	39,0	38,3
0,7	38,6	37,8
0,8	38,4	37,3
1,0	38,3	36,8
1,5	38,0	35,8
2,0	37,6	33,3
2,5	36,8	29,8
3,0	36,3	27,8
3,5	35,0	24,8
4,0	34,8	21,8
4,5	34,0	18,8
5,0	33,4	15,8
5,5	32,8	12,3
6,0	32,0	9,8
6,5	31,1	6,8
7,0	29,8	4,8
7,5	27,8	0,3
8,0	24,8	0,3

Tabla A.44. Datos relacionados a la altura vs. tiempo. (Continuación)

8,5	21,8	0,3
9,0	18,8	0,3
9,5	14,8	0,3
10,0	11,8	0,3
12,0	9,8	0,3
15,0	3,8	0,3
16,0	0,8	0,3
17,0	0,8	0,3

TIEMPO (min)	ALTURA (cm)					
	Floculante					
	Cal 0,1 %	Cal 0,4 %	Cal 0,5 %	Cal 1 %	FeCl ₃ 1 g/L	Cal 0,25 %
0,0	39,8	39,8	39,8	39,8	39,8	39,8
0,2	39,3	39,2	39,2	38,5	39,4	39,4
0,3	38,8	37,6	37,2	36,8	36,2	37,6
0,5	38,1	36	35,8	35,3	32,8	36,2
0,7	37,7	33,8	33,0	33,8	29,4	33,8
0,8	36,8	31,8	30,8	31,3	25,8	27,8
1,0	35,8	28,8	28,4	29,6	22,8	24,6
1,2	33,8	26,8	26,4	27,4	19,2	21
1,3	31,8	23,8	23,8	25,6	16,0	17,4
1,5	24,8	21,4	21,8	23,4	11,8	14,4
1,7	21,8	19,2	19,8	20,8	9,4	11,8
1,8	20,8	16,8	17,6	19,3	5,8	7,8
2,0	15,2	13,8	15,2	17,1	4,2	4,8
2,3	12,2	10,4	10,6	13	3,6	1,9
2,7	9,5	5,8	6	9,4	3,2	1,7
3,0	7,2	2,4	2,4	5,4	2,9	1,6
3,3	3,2	2	2,2	3	2,8	1,5
3,7	1,6	1,8	2	2,8	2,7	1,4
4,0	1,3	1,7	1,9	2,7	2,6	1,4
4,3	1,3	1,7	1,8	2,6	2,3	1,3
4,7	1,3	1,7	1,8	2,5	2,2	1,3
5,0	1,3	1,7	1,7	2,4	2,1	1,2
6			1,7	2,3	2	1,2

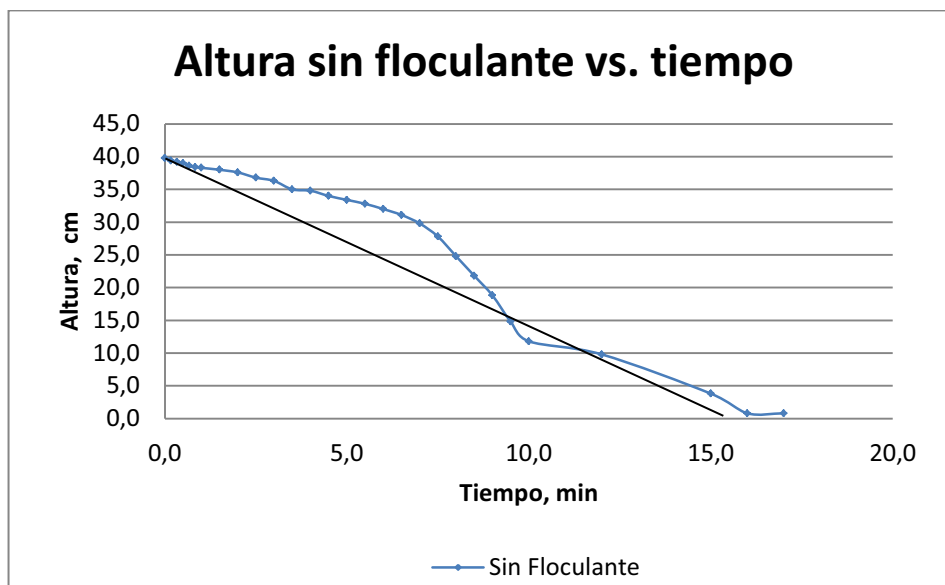


Figura A.11. Altura vs. tiempo. Sedimentación sin floculante.

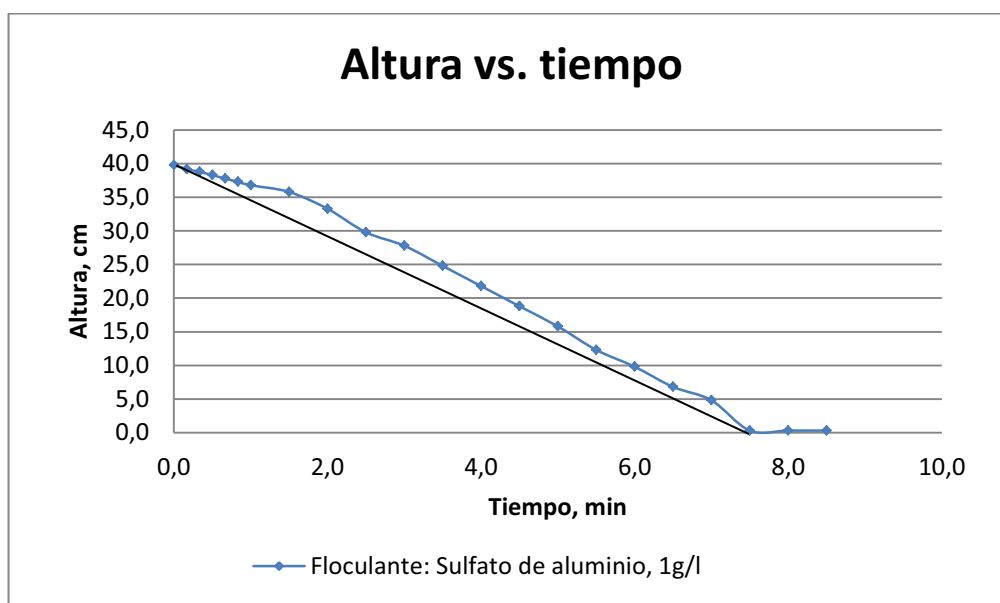


Figura A.2. Altura vs. tiempo. Agente floculante: Sulfato de aluminio, 1g/L.

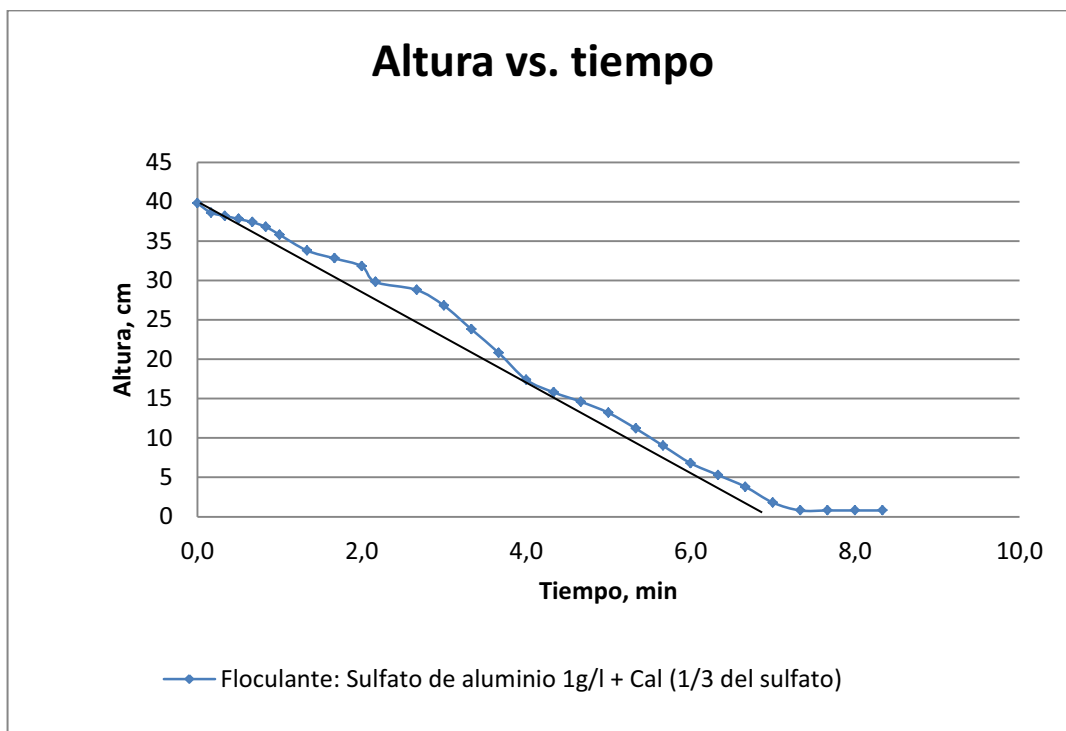


Figura A.3. Altura vs. tiempo. Agente floculante: sulfato de aluminio y cal.

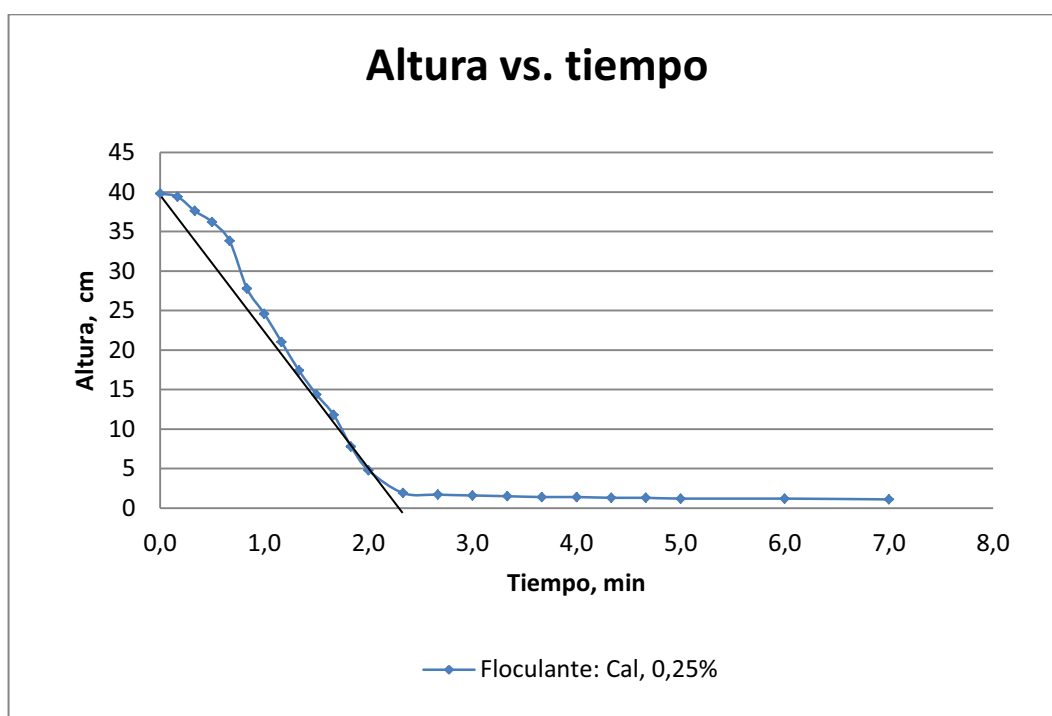


Figura A.4. Altura vs. tiempo. Agente floculante: cal; 0,25 %.

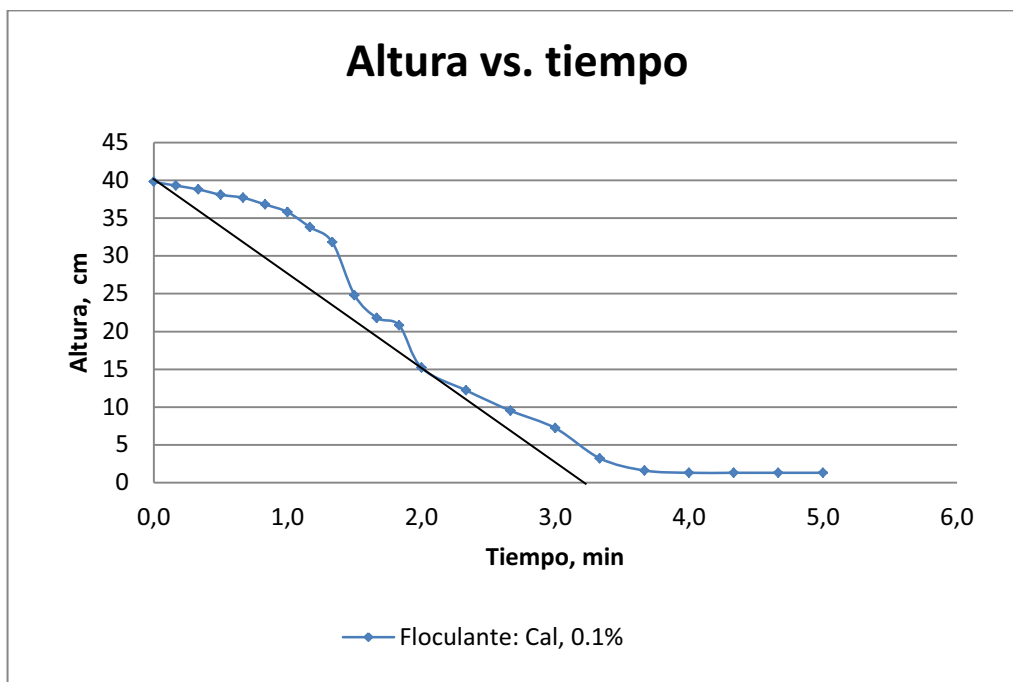


Figura A.5. Altura vs. tiempo. Agente floculante: cal; 0,1 %.

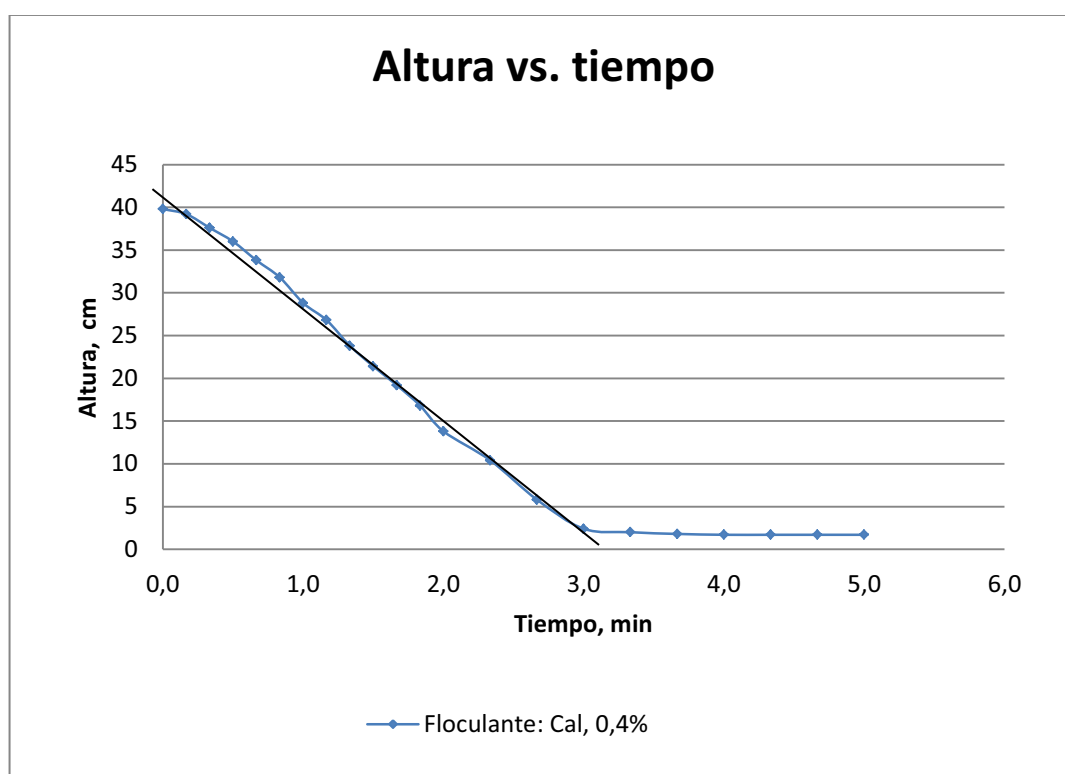


Figura A.6. Altura vs. tiempo. Agente floculante: cal; 0,4 %.

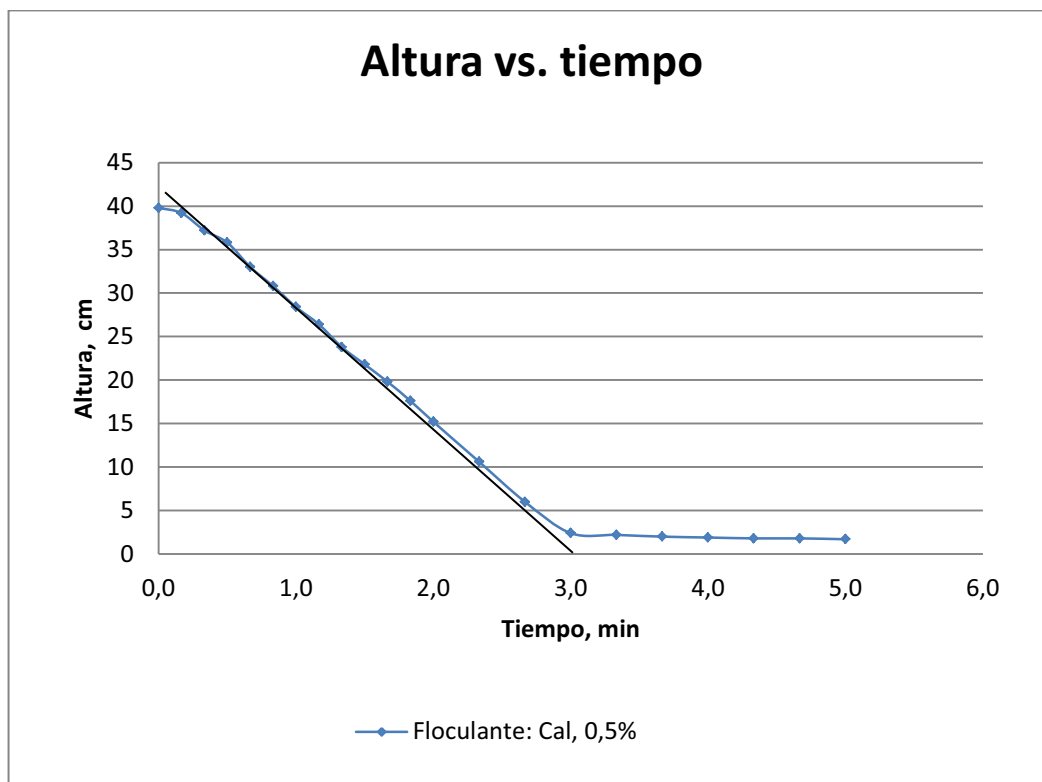


Figura A.7. Altura vs. tiempo. Agente floculante: cal 0,5 %.

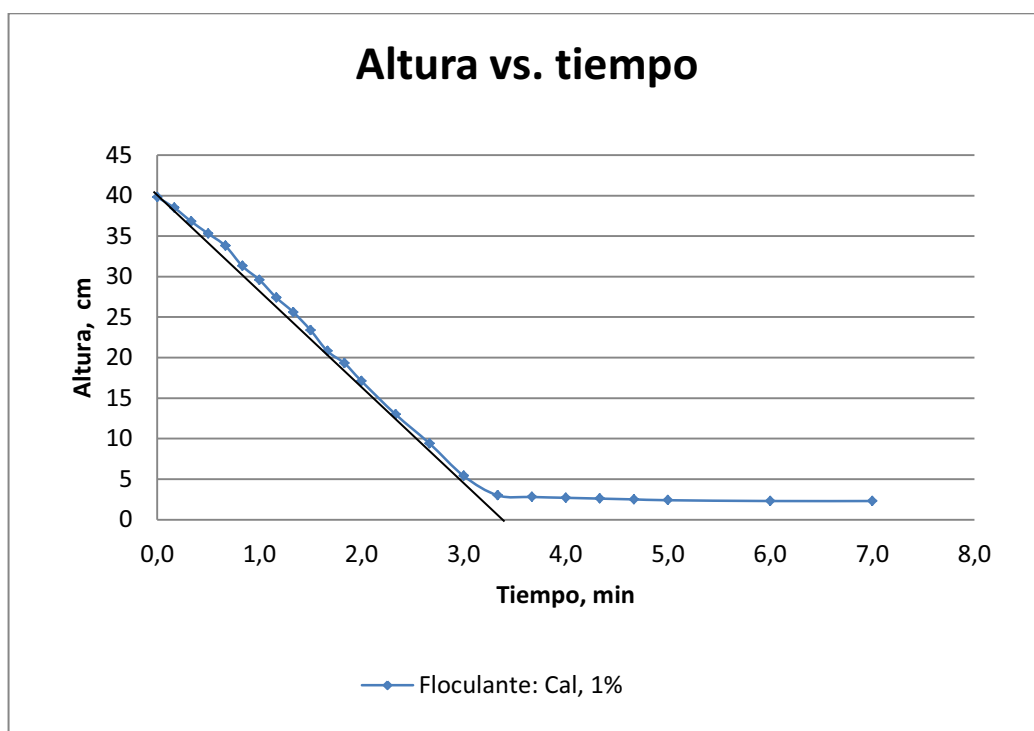


Figura A.8. Altura vs. tiempo. Agente floculante: 1 %.

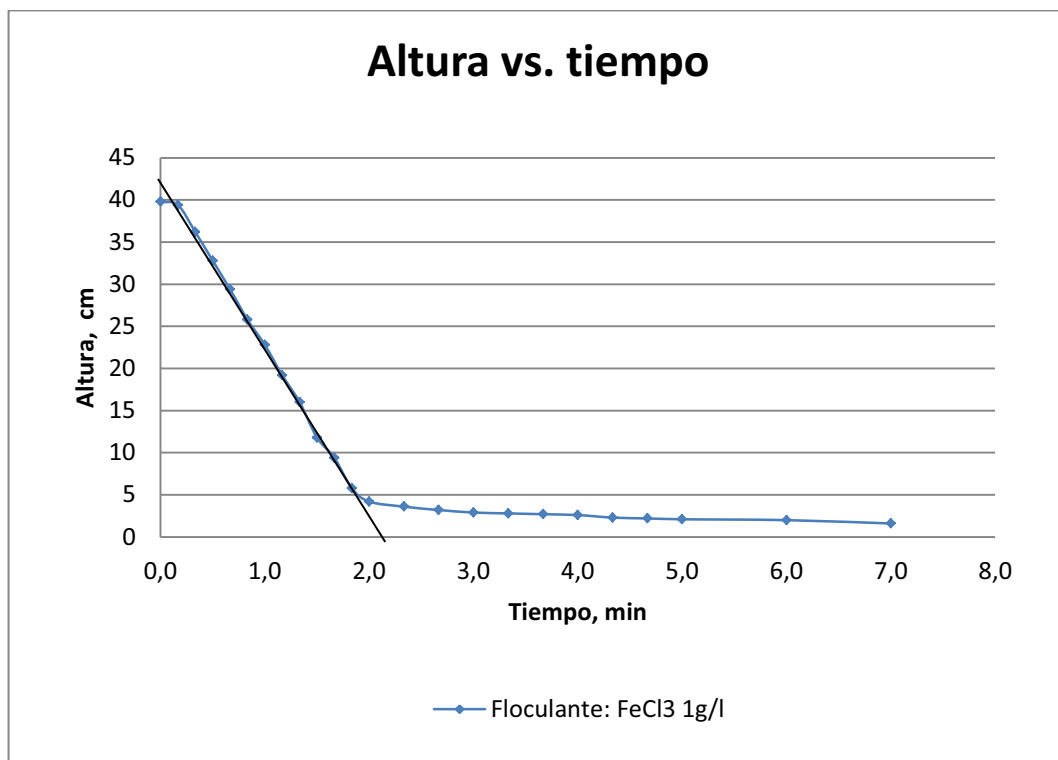


Figura A.9. Altura vs. tiempo. Agente floculante: cloruro férrico; 1 g/L.

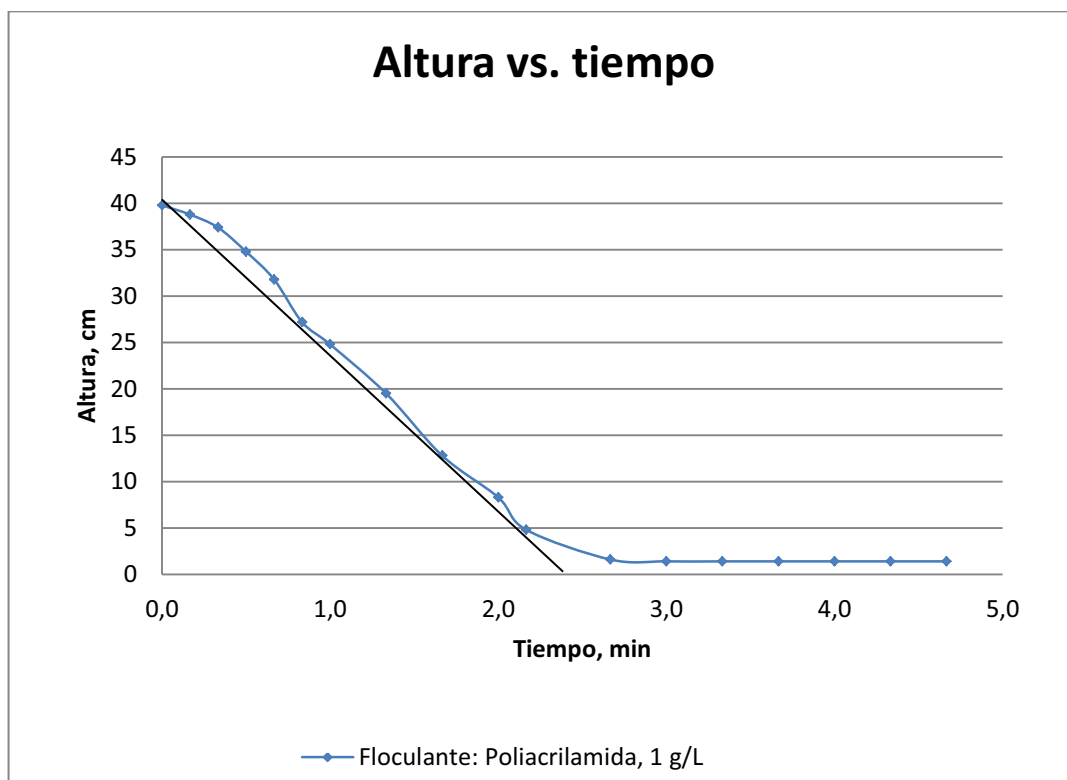


Figura A.10. Altura vs. tiempo. Agente floculante: poliacrilamida; 1 g/L.

DETERMINACIÓN DEL ÁREA UNITARIA

Los valores de la dilución inicial y final fueron realizados a nivel de laboratorio, el cual se describe en la Tabla A.43.

Tabla A.45. Cálculo del Área Unitaria. Ensayo de Laboratorio.

SEDIMENTACIÓN		Sin floculante	FeCl₃ 1 g/L
Diámetro de la probeta (cm)		7,9	7,9
Peso del sólido (g)		15,4	20,1
Altura del sólido en la probeta (cm)		0,45	1,6
Peso de la probeta (g)		938,1	935,7
Peso de la pulpa y la probeta (g)		2952,3	2952,7
Volumen de la pulpa (ml)		2000	2000
Densidad de la pulpa (Dp)	mp/Vi	1,0071	1,0085
	masa de la pulpa al inicio (mp)	2014,2	2017
	Volumen de la pulpa inicio (Vi)	2000	2000
% sólidos (real)	$(\delta * (Dp-1)) / (Dp * (\delta-1))$	0,0108	0,0129
	Densidad del sólido (δ)	3,6	3,6
	Densidad de la pulpa (Dp)	1,0071	1,0085

Dilución inicial (Di)	mfi / msi	91,93	76,73
	Masa del fluido inicio (mfi)	1992,53	1991,05
	Masa de sólido inicio (msi)	21,67	25,95
Dilución final (Df)			
	mff / msf	0,67	2,68
	Masa del fluido al final (mff)	14,58	69,48
	Masa del sólido (msf)	21,67	25,95
Vs	ms / Ds	7,47	8,95
	Masa del sólido (ms = msi)	21,67	25,95
	Densidad del sólido (δ)	3,6	3,6
Vff			
	Vf - Vs	14,58	69,48
	Volumen del fluido al final del proceso, correspondiente a una pulpa de volumen Vf (Vff)	14,58	69,48
	Volumen final de la pulpa (Vf)	22,06	78,43
Velocidad de sedimentación			
	cm/min	2,57	18,09
	pies / hora	5,06	35,61
Área Unitaria			
	pie ² *día/ton corta	26,51	3,06
	m ² *día/ton corta	2,46	0,28
Diámetro de espesador	m	1,77	0,60

ANEXO X

DIMENSIONES DEL TAMIZ

La determinación de los valores a, b, c, d, e y F se determinaron por medio de Tablas, las cuales se dan a continuación:

El valor de a depende del tamaño del agujero del tamiz en pulgadas:

Tabla A.46. Factor a

dp (pulgadas)	Valor de a
0,250	0,88
0,375	1,19
0,500	1,40
1,000	2,12
5,91 E-3	0,0055

Tabla A.47. Factor b

Alimentación (a)	Rechazo (b)	% Sobretamaño c = b/a	Factor b
0,2	0,15	0,75	0,85

El factor c se determina por medio de la eficiencia deseada del tamizado. Para una eficiencia aceptable para clasificación por tamaño de gruesos se comprende entre un 60 y 70 %.

Tabla A.48. Factor c

Eficiencia de tamizado (%)	Factor c
60	1,4
70	1,8
65	1,6

Tabla A.49. Factor d

Alimentación (a)	1/2 Tamaño (b)	%Material Fino ($c=b \times 100/a$)	Factor d
0,2	0,048	24	0,24

Mitad del tamaño de finos (1/4 de 192 kg)

El factor e es utilizado para un material cuyo tamizado es por vía húmeda y el agua se encuentra esparcida por toda la zaranda.

Tabla A.50. Factor e

malla	Factor e
10	2

El factor de tipo F es usado para la determinación del piso de la zaranda, es decir, si es una zaranda simple (una sola) o zaranda de tipo múltiple (2 o 3 zarandas ubicadas por pisos).

Tabla A.51. Factor F

Piso	Factor F
Primero	1,00

ANEXO XI

DIMENSIONAMIENTO DEL TANQUE DE SEDIMENTACIÓN

De acuerdo con los resultados obtenidos en la Tabla 3.11 de la sección 3.5.1.2, respecto a la determinación de la velocidad de sedimentación, se seleccionó como agente floculante al cloruro férrico en concentración de 1 g/L.

Por medio de la ecuación [2.11] para determinar el área unitaria, se determinó su valor y las dimensiones del sedimentador (considerado como un cilindro).

$$AU = \frac{(76,73-2,68)*0,192 \text{ ton/h}}{10,85 \frac{m}{h} * 1,020 \frac{ton}{m^3}}$$

$$AU = 1,284 \text{ m}^2$$

ANEXO XII

NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-CRP-001-ECOL/1993, QUE ESTABLECE LAS CARACTERISTICAS DE LOS RESIDUOS PELIGROSOS, EL LISTADO DE LOS MISMOS Y LOS LIMITES QUE HACEN A UN RESIDUO PELIGROSO POR SU TOXICIDAD AL AMBIENTE.

NORMA oficial mexicana NOM-CRP-001-ECOL/93, que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.

Al margen un sello con el Escudo Nacional, que dice: Estados Unidos Mexicanos.-
Secretaría de Desarrollo Social.

SERGIO REYES LUJAN, Presidente del Instituto Nacional de Ecología, con fundamento en los artículos 32 fracción XXV de la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal; 5o. fracciones VIII y XIX, 8o. Fracciones II y VII, 36, 37, 43, 150, 160 y 171 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente; 4o. fracción I, 5o. y 6o. del Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Residuos Peligrosos; 38 fracción II, 40 fracciones X y XVII, 41, 43, 46, 47, 52, 62, 63 y 64 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización; Primero y Segundo del Acuerdo por el que se delega en el Subsecretario de Vivienda y Bienes Inmuebles y en el Presidente del Instituto Nacional de Ecología, la facultad de expedir las normas oficiales mexicanas en materia de vivienda y ecología.

CONSIDERANDO

Que los residuos peligrosos en cualquier estado físico por sus características corrosivas, reactivas, explosivas,

tóxicas, inflamables, venenosas, biológico infecciosas representan un peligro para el equilibrio ecológico, por lo que es necesario definir cuales son esos residuos identificándolos y ordenándolos por giro industrial y por proceso, los generados por fuente no específica, así como los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.

Que habiéndose cumplido el procedimiento establecido en la Ley Federal sobre Metrología y Normalización para la elaboración de proyectos de normas oficiales mexicanas, el C. Presidente del Comité Consultivo Nacional de Normalización para la Protección Ambiental ordenó la publicación del proyecto de norma oficial mexicana NOM-PA-CRP--01/93, que establece las características de los residuos peligrosos y el listado de los mismos, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 2 de julio de 1993, con el objeto de que los interesados presentaran sus comentarios al citado Comité Consultivo.

Que la Comisión Nacional de Normalización determinó en sesión de fecha 1o. de julio de 1993, la sustitución de la clave NOM-PA-CRP-001/93, con que fue publicado el proyecto de la presente norma oficial mexicana, por la clave NOM-CRP-001-ECOL/1993, que en lo subsecuente la identificará.

Que durante el plazo de noventa días naturales contados a partir de la fecha de la publicación de dicho proyecto de norma oficial mexicana, los análisis a que se refiere el artículo 45 del citado ordenamiento jurídico, estuvieron a disposición del público para su consulta.

Que dentro del mismo plazo, los interesados presentaron sus comentarios al proyecto de norma, los cuales fueron analizados en el citado Comité Consultivo Nacional de Normalización, realizándose las modificaciones procedentes. La Secretaría de Desarrollo Social, por conducto del Instituto Nacional de Ecología, publicó las respuestas a los comentarios recibidos en la Gaceta Ecológica, Volumen V, número especial de octubre de 1993.

Que previa aprobación del Comité Consultivo Nacional de Normalización para la Protección Ambiental, en sesión de fecha 5 de octubre de 1993, he tenido a bien expedir el siguiente prefacio

En la Elaboración de esta norma oficial mexicana participaron:

SECRETARIA DE DESARROLLO SOCIAL
 Instituto Nacional de Ecología
 Procuraduría Federal de Protección al Ambiente
 SECRETARIA DE GOBERNACION
 SECRETARIA DE ENERGIA, MINAS E INDUSTRIA PARAESTATAL
 SECRETARIA DE COMERCIO Y FOMENTO INDUSTRIAL
 SECRETARIA DE AGRICULTURA Y RECURSOS HIDRAULICOS
 SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
 SECRETARIA DE SALUD
 Dirección General de Salud Ambiental
 DEPARTAMENTO DEL DISTRITO FEDERAL
 GOBIERNO DEL ESTADO DE MEXICO
 Secretaría de Ecología
 COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD
 PETROLEOS MEXICANOS
 Auditoría de Seguridad Industrial, Protección Ambiental y Ahorro de Energía
 Gerencia de Protección Ambiental y Ahorro de Energía
 Pemex-Gas y Petroquímica Básica
 Gerencia de Seguridad Industrial y Protección Ambiental
 ALTOS HORNOS DE MEXICO, S.A. DE C.V.
 ASOCIACION NACIONAL DE FABRICANTES DE PINTURAS Y TINTAS
 ASOCIACION MEXICANA DE LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ
 ASOCIACION NACIONAL DE LA INDUSTRIA QUIMICA
 BECTON DICKINSON DE MEXICO, S.A. DE C.V.
 BUFETE QUIMICO, S.A. DE C.V.
 CAMARA DE LA INDUSTRIA DE TRANSFORMACION DE MONTERREY
 CAMARA MINERA DE MEXICO
 CAMARA NACIONAL DE LA INDUSTRIA DE LA CELULOSA Y DEL PAPEL
 CAMARA NACIONAL DE LA INDUSTRIA DE LA TRANSFORMACION
 CAMARA NACIONAL DE LA INDUSTRIA DEL HIERRO Y DEL ACERO
 CAMARA NACIONAL DE LA INDUSTRIA FARMACEUTICA
 CAMARA NACIONAL DE LA INDUSTRIA HULERA
 CELANESE MEXICANA, S.A. DE C.V.
 CEMENTOS APASCO, S.A. DE C.V.
 CHEMICAL WASTE MANAGEMENT DE MEXICO, S.A. DE C.V.
 COLEGIO NACIONAL DE INGENIEROS QUIMICOS.
 COMERCIAL MEXICANA DE PINTURAS
 COMPAÑIA HULERA TORNEL, S.A. DE C.V.
 CONFEDERACION NACIONAL DE CAMARAS INDUSTRIALES
 DISTRIBUIDORA KROMA, S.A. DE C.V.
 DUPONT, S.A. DE C.V.
 GENERAL MOTORS DE MEXICO, S.A. DE C.V.

GRUPO PRyC ASESORIA INDUSTRIAL, S.C.
INGENIERIA PARA EL CONTROL DE RESIDUOS MUNICIPALES E IDUSTRIALES
INSTITUTO DE PROTECCION AMBIENTAL
INSTITUTO MEXICANO DE FIBRO INDUSTRIAS
INSTITUTO MEXICANO DEL PETROLEO
INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
MAPLE CONSTRUCCIONES Y CONSULTORIAS, S.A. DE C.V.
MATERIALES INOXIDABLES, S.A.
MEXALIT INDUSTRIAL, S.A. DE C.V.
PROCTER & GAMBLE DE MEXICO, S.A. DE C.V.
PRODUCTOS TEXACO, S.A. DE C.V.
RESIDUOS INDUSTRIALES MULTIQUM, S.A. DE C.V.
SERVICIO DE INGENIERIA Y CONTROL AMBIENTAL, S.A.
TF VICTOR
UNIROYAL, S.A. DE C.V.
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
UNIVERSIDAD AUTONOMA METROPOLITANA

OBJETO

Esta norma oficial mexicana establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.

CAMPO DE APLICACION

Esta norma oficial mexicana es de observancia obligatoria en la definición y clasificación de residuos peligrosos.

REFERENCIAS

NOM-CRP-002-ECOLQue establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.

DEFINICIONES

Cretib

El código de clasificación de las características que contienen los residuos peligrosos y que significan: corrosivo, reactivo, explosivo, tóxico, inflamable y biológico infeccioso.

Fuente no específica

Las actividades que generan residuos peligrosos y que pueden aplicarse a diferentes giros o procesos.

Proceso

El conjunto de actividades físicas o químicas relativas a la producción, obtención, acondicionamiento, envasado, manejo, y embalado de productos intermedios o finales.

Solución acuosa

La mezcla en la cual el agua es el componente primario y constituye por lo menos el 50% en peso de la muestra.

CLASIFICACION DE LA DESIGNACION DE LOS RESIDUOS

El procedimiento a seguir por el generador de residuos para determinar si son peligrosos o no.

CARACTERISTICAS No. SEDESOL

Corrosividad (C) P 01

Reactividad (R) P 02

Explosividad (E) P 03

Toxicidad al Ambiente (T)

Inflamabilidad (I) P 04

Biológico Infecciosas (B) P 05

Además de los residuos peligrosos comprendidos se considerarán peligrosos aquellos que presenten una o más de las siguientes características: corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad y/o biológico infecciosas; atendiendo a los siguientes criterios.

Un residuo se considera peligroso por su corrosividad cuando presenta cualquiera de las siguientes propiedades:

- En estado líquido o en solución acuosa presenta un pH sobre la escala menor o igual a 2.0, o mayor o igual a 12.5.

- En estado líquido o en solución acuosa y a una temperatura de 55° C es capaz de corroer el acero al carbón (SAE 1020), a una velocidad de 6.35 milímetros o más por año.

Un residuo se considera peligroso por su reactividad cuando presenta cualquiera de las siguientes propiedades:

- Bajo condiciones normales (25 °C y 1 atmósfera), se combina o polimeriza violentamente sin detonación.
- En condiciones normales (25° °C y 1 atmósfera) cuando se pone en contacto con agua en relación (residuo-agua) de 5:1, 5:3, 5:5 reacciona violentamente formando gases, vapores o humos.
- Bajo condiciones normales cuando se ponen en contacto con soluciones de pH; ácido (HCl 1.0 N) y básico (NaOH 1.0 N), en relación (residuo-solución) de 5:1, 5:3, 5:5 reacciona violentamente formando gases, vapores o humos.
- Posee en su constitución cianuros o sulfuros que cuando se exponen a condiciones de pH entre 2.0 y 12.5 pueden generar gases, vapores o humos tóxicos en cantidades mayores a 250 mg de HCN/kg de residuo o 500 mg de H₂S/kg de residuo.
- Es capaz de producir radicales libres.

Un residuo se considera peligroso por su explosividad cuando presenta cualquiera de las siguientes propiedades:

- Tiene una constante de explosividad igual o mayor a la del dinitrobenzeno.
- Es capaz de producir una reacción o descomposición detonante o explosiva a 25°C y a 1.03 kg/cm² de presión.

Un residuo se considera peligroso por su toxicidad al ambiente cuando presenta la siguiente propiedad:

- Cuando se somete a la prueba de extracción para toxicidad conforme a la norma oficial mexicana NOM-CRP-002-ECOL/1993, el lixiviado de la muestra representativa que contenga cualquiera de los constituyentes listados en las concentraciones mayores a los límites señalados en dichas Tablas.

Un residuo se considera peligroso por su inflamabilidad cuando presenta cualquiera de las siguientes propiedades:

- En solución acuosa contiene más de 24% de alcohol en volumen.
- Es líquido y tiene un punto de inflamación inferior a 60° C.
- No es líquido pero es capaz de provocar fuego por fricción, absorción de humedad o cambios químicos espontáneos (a 25°C y a 1.03 kg/cm²).
- Se trata de gases comprimidos inflamables o agentes oxidantes que estimulan la combustión.

Un residuo con características biológico infecciosas se considera peligroso cuando presenta cualquiera de las siguientes propiedades:

- Cuando el residuo contiene bacterias, virus u otros microorganismos con capacidad de infección.
- Cuando contiene toxinas producidas por microorganismos que causen efectos nocivos a seres vivos.

La mezcla de un residuo peligroso conforme a esta norma con un residuo no peligroso será considerada residuo peligroso.

MANEJO

Los residuos que hayan sido clasificados como peligrosos y los que tengan las características de peligrosidad conforme a esta norma oficial mexicana deberán ser manejados de acuerdo a lo previsto en el Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Residuos Peligrosos, las normas oficiales mexicanas correspondientes y demás procedimientos aplicables.

VIGILANCIA

La Secretaría de Desarrollo Social por conducto de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, es la autoridad competente para vigilar el cumplimiento de la presente norma oficial mexicana.

SANCIONES

El incumplimiento a esta norma oficial mexicana será sancionado conforme a lo establecido en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, su Reglamento en Materia de Residuos Peligrosos y demás disposiciones jurídicas aplicables.

BIBLIOGRAFIA

- Code of Federal Regulationsódigo de Regulaciones Federales, Vol. 40, Part, 260, 1991. U.S.A. (Código Federal de Regulaciones, Vol. 40, Parte 260, 1991, Estados Unidos de América).
- NIOSH/OSHA, U.S. Departamento de Salud y Recursos Humanos. U.S. Departamento de Trabajo. DHHS (NIOSH) No. 81-123, January 1981, (Guía Sanitaria para Residuos Químicos).
- Registro Internacional de Tóxicos Químicos Potenciales, Génova 1982.

CONCORDANCIA CON NORMAS INTERNACIONALES

Esta norma oficial mexicana coincide parcialmente con el Code of Federal Regulations, Vol. 40, Part, 260, 1991. U.S.A. (Código Federal de Regulaciones, Vol. 40, Parte 260, 1991, Estados Unidos de América).

VIGENCIA

La presente norma oficial mexicana entrará en vigor al día siguiente de su publicación en el Diario Oficial de la Federación.

Se abroga el Acuerdo por el que se expidió la Norma Técnica Ecológica NTE-CRP-001/88, que establece los criterios para la determinación de residuos peligrosos y el listado de los mismos, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 6 de junio de 1988.

Dada en la Ciudad de México, Distrito Federal, a los dieciocho días del mes de octubre de mil novecientos noventa y tres.- El Presidente del Instituto Nacional de Ecología, Sergio Reyes Lujan.- Rúbrica.

ANEXO XIII

NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-CRP-002-ECOL/1993, QUE ESTABLECE EL PROCEDIMIENTO PARA LLEVAR A CABO LA PRUEBA DE EXTRACCIÓN PARA DETERMINAR LOS CONSTITUYENTES QUE HACEN A UN RESIDUO PELIGROSO POR SU TOXICIDAD AL AMBIENTE

NORMA oficial mexicana NOM-CRP-002-ECOL/93, que establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.

Al margen un sello con el Esduco Nacional, que dice: Estados Unidos Mexicanos.-
Secretaría de Desarrollo Social.

SERGIO REYES LUJAN, Presidente del Instituto Nacional de Ecología, con fundamento en los artículos 32 fracción XXV de la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal; 5o. fracciones VIII y XIX, 8o. fracción II y VII, 36, 37, 43, 152, 160, y 171 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente; 4_ fracción II, 5_ y 6_ del Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Residuos Peligrosos; 38 fracción II, 40 fracciones X y XVII, 41, 43, 46, 47, 52, 62, 63 y 64 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización; Primero y Segundo del Acuerdo por el que se delega en el Subsecretario de Vivienda y Bienes Inmuebles y en el Presidente del Instituto Nacional de Ecología, la facultad de expedir las normas oficiales mexicanas en materia de vivienda y ecología, respectivamente

CONSIDERANDO

Que para determinar las técnicas de manejo más apropiadas y la toxicidad al ambiente de un residuo peligroso es necesario establecer los procedimientos para llevar a cabo la prueba de extracción y determinar los constituyentes del mismo.

Que habiéndose cumplido el procedimiento establecido en la Ley Federal sobre Metrología y Normalización para la elaboración de proyectos de normas oficiales mexicanas, el C. Presidente del Comité Consultivo Nacional de Normalización para la Protección Ambiental ordenó la publicación del proyecto de norma oficial mexicana NOM-PA-CRP-002/93, que establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 2 de julio de 1993, con el objeto de que los interesados presentaran sus comentarios al citado Comité Consultivo.

Que la Comisión Nacional de Normalización determinó en sesión de fecha 1_ de julio de 1993, la sustitución de la clave NOM-PA-CRP-002/93, con que fue publicado el proyecto de la presente norma oficial mexicana, por la clave NOM-CRP-002-ECOL/1993, que en lo subsecuente la identificará.

Que durante el plazo de noventa días naturales contados a partir de la fecha de la publicación de dicho proyecto de norma oficial mexicana, los análisis a que se refiere el artículo 45 del citado ordenamiento jurídico, estuvieron a disposición del público para su consulta.

Que dentro del mismo plazo, los interesados presentaron sus comentarios al proyecto de norma, los cuales fueron analizados en el citado Comité Consultivo Nacional de Normalización, realizándose las modificaciones procedentes. La Secretaría de Desarrollo Social, por conducto del Instituto Nacional de Ecología, publicó las respuestas a los comentarios recibidos en la Gaceta Ecológica, Volumen V, número especial de octubre de 1993.

Que previa aprobación del Comité Consultivo Nacional de Normalización para la Protección Ambiental, en sesión de fecha 5 de octubre de 1993, he tenido a bien expedir siguiente prefacio.

En la elaboración de esta norma oficial mexicana participaron:

SECRETARIA DE DESARROLLO SOCIAL

Instituto Nacional de Ecología

Procuraduría Federal de Protección al Ambiente

SECRETARIA DE GOBERNACION

SECRETARIA DE ENERGIA, MINAS E INDUSTRIA PARAESTATAL

SECRETARIA DE COMERCIO Y FOMENTO INDUSTRIAL

SECRETARIA DE AGRICULTURA Y RECURSOS HIDRAULICOS

SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

SECRETARIA DE SALUD

Dirección General de Salud Ambiental

DEPARTAMENTO DEL DISTRITO FEDERAL

GOBIERNO DEL ESTADO DE MEXICO

Secretaría de Ecología

COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD

PETROLEOS MEXICANOS

Auditoría de Seguridad Industrial, Protección Ambiental y Ahorro de Energía

Gerencia de Protección Ambiental y Ahorro de Energía

Pemex-Gas y Petroquímica Básica

Gerencia de Seguridad Industrial y Protección Ambiental

ALTOS HORNOS DE MEXICO, S.A. DE C.V.

ASOCIACION NACIONAL DE FABRICANTES DE PINTURAS Y TINTAS

ASOCIACION MEXICANA DE LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ, A.C.

ASOCIACION NACIONAL DE LA INDUSTRIA QUIMICA

BECTON DICKINSON DE MEXICO, S.A. DE C.V.

BUFETE QUIMICO, S.A. DE C.V.

CAMARA DE LA INDUSTRIA DE TRANSFORMACION DE MONTERREY

CAMARA MINERA DE MEXICO

CAMARA NACIONAL DE LA INDUSTRIA DE LA CELULOSA Y DEL PAPEL

CAMARA NACIONAL DE LA INDUSTRIA DE LA TRANSFORMACION

CAMARA NACIONAL DE LA INDUSTRIA DEL HIERRO Y DEL ACERO

CAMARA NACIONAL DE LA INDUSTRIA FARMACEUTICA

CAMARA NACIONAL DE LA INDUSTRIA HULERA

CELANESE MEXICANA, S.A. DE C.V.

CEMENTOS APASCO, S.A. DE C.V.

CHEMICAL WASTE MANAGEMENT DE MEXICO, S.A. DE C.V.

COLEGIO NACIONAL DE INGENIEROS QUIMICOS

COMERCIAL MEXICANA DE PINTURAS

COMPAÑIA HULERA TORNEL, S.A. DE C.V.
CONFEDERACION NACIONAL DE CAMARAS INDUSTRIALES
DISTRIBUIDORA KROMA, S.A. DE C.V.
DUPONT, S.A. DE C.V.
GENERAL MOTORS DE MEXICO, S.A. DE C.V.
GRUPO PRyC ASESORIA INDUSTRIAL, S.C.
INGENIERIA PARA EL CONTROL DE RESIDUOS MUNICIPALES E
INDUSTRIALES, S.A. DE C.V.
INSTITUTO DE PROTECCION AMBIENTAL
INSTITUTO MEXICANO DE FIBRO INDUSTRIAS
INSTITUTO MEXICANO DEL PETROLEO
INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
MAPLE CONSTRUCCIONES Y CONSULTORIAS, S.A. DE C.V.
MATERIALES INOXIDABLES, S.A.
METALOIDES, S.A. DE C.V.
MEXALIT INDUSTRIAL, S.A. DE C.V.
PROCTER & GAMBLE DE MEXICO, S.A. DE C.V.
PRODUCTOS TEXACO, S.A. DE C.V.
RESIDUOS INDUSTRIALES MULTIQUM, S.A. DE C.V.
SERVICIO DE INGENIERIA Y CONTROL AMBIENTAL, S.A.
TF VICTOR
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
UNIVERSIDAD AUTONOMA METROPOLITANA

OBJETO

Esta norma oficial mexicana establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.

CAMPO DE APLICACION

Esta norma oficial mexicana es de observancia obligatoria en la generación y manejo de residuos peligrosos.

REFERENCIAS

NOM-CRP-001-ECOL Que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.

DEFINICIONES

Agua desionizada o desmineralizada

El agua que no presenta interferencia en las determinaciones de los constituyentes que se van a analizar.

Porcentaje de sólido

La fracción de una muestra que se retiene en el filtro al aplicar el procedimiento de filtración

Prueba de extracción (PECT).

El procedimiento de laboratorio que permite determinar la movilidad de los constituyentes de un residuo, que lo hacen peligroso por su toxicidad al ambiente.

RESUMEN DEL METODO

- El método PECT se resume en forma simplificada.
Para residuos líquidos (es decir aquellos que contiene menos del 0.5% de material sólido seco) después de la filtración a través de un filtro de fibra de vidrio de 0.6 a 0.8 micrómetros (mm), el filtrado se define como el extracto PECT.
Para residuos que contienen 0.5% o más de sólidos, el líquido se separa de la fase sólida y se preserva para su posterior análisis; el tamaño de la partícula de la fase sólida, se reduce en caso de ser necesario. La fase sólida se lleva al proceso de extracción con una cantidad del reactivo de extracción igual a 20 veces el peso de los sólidos. El reactivo de extracción empleado estará en función de la alcalinidad de la fase sólida y del tipo de residuo analizado.
- Para extraer compuestos volátiles se requiere el equipo de extracción de volumen muerto cero (VMC) descrito. Después de la extracción, el líquido se separa de la fase sólida usando un filtro de fibra de vidrio de 0.6 a 0.8 mm.

- Si la fase líquida inicial del residuo y el extracto son compatibles (es decir, al combinarse no forman fases múltiples) se pueden mezclar y analizar juntos. Si son incompatibles, se analizan separadamente y los resultados se combinan matemáticamente para obtener una concentración promedio en volumen.
- Si al efectuarse un análisis físico-químico completo del residuo en cuestión no se encuentran en el mismo los constituyentes regulados en la NOM-CRP-001-ECOL/1993, o están presentes a bajas concentraciones de modo que no rebasen en los límites máximos permisibles, no es necesario llevar a cabo la prueba de extracción.

MUESTREO, PRESERVACION Y MANEJO DE MUESTRAS

Para llevar a cabo las pruebas de extracción de los constituyentes volátiles y no volátiles de un residuo, deberán tomarse previamente las muestras del mismo, de acuerdo con los siguientes requisitos:

- Se deben coleccionar en los términos de la norma oficial mexicana aplicable, un mínimo de dos muestras representativas del residuo a analizar; la primera muestra se emplea para las pruebas preliminares, la segunda se emplea para la extracción.
- Las muestras y los extractos obtenidos deben ser preparados para el análisis tan pronto como sea posible. Si se requiere preservación, esta debe ser mediante refrigeración a 4° C y por un período máximo de 14 días.
- Cuando el residuo va a ser evaluado para compuestos volátiles, se debe tener cuidado para minimizar las pérdidas de éstos. Las muestras deberán ser recolectadas y preservadas de modo que se prevenga la pérdida de compuestos volátiles (por ejemplo tomarse en frascos sellados y preservarse a 4°C).
- Los extractos o porción de ellos para la determinación de metales, deben acidificarse con ácido nítrico a un pH menor de 2, si hay precipitación véase el numeral 10.15.1 de esta norma.

ANEXO XIV

NORMA TÉCNICA ECUATORIANA INEN 1 488 (1986-10)

ADOQUINES. REQUISITOS

1. Objeto

Esta norma establece los requisitos para la fabricación de los adoquines de hormigón, ya sea patentados o rectangulares, empleados en la pavimentación de áreas transitadas por vehículos y peatones.

Dimensiones y tolerancias

Dimensiones. En cuanto al tamaño del adoquín se recomienda que la relación longitud/ancho en el plano no sea mayor de 2,0 y el espesor no deberá ser menor de 60 mm ni mayor de 100 mm. el espesor mínimo para tránsito peatonal será de 60 mm y para tránsito vehicular de 80 mm.

Tolerancia del espesor. El espesor de cada uno de los 10 adoquines de muestra deberá comprender el valor de ± 3 mm del espesor nominal.

Tolerancia de longitud. La longitud real de cada uno de los 10 adoquines de muestra puede tener una tolerancia de ± 2 mm de la longitud nominal.

Tolerancia del ancho. El ancho real de cada uno de los 10 adoquines de muestra puede tener una tolerancia de ± 2 mm del ancho nominal.

Resistencia del adoquín

La resistencia a la compresión característica de los adoquines de la muestra cumplirá con la Tabla A.50.

Tabla A.52. Clasificación de tránsito y tipo de adoquín.

Tipo de uso	No. De vehículos por día mayores a 3 t brutas	Equivalente total de repeticiones de eje estándar después de 20 años de servicio	Forma recomendada de adoquín	Resistencia característica (MPa) compresión a los 28 días
Peatonal	0	0	A,B,C	20
Estacionamiento y	0-150	$0-4,5 \times 10^5$	A,B,C	30

calles residenciales				
Caminos secundarios y calles principales	150-1500	$4,5 \times 10^5 - 4,5 \times 10^6$	A	40

NOTA: 1MPa= 10 Kg/cm² aproximadamente.

A fin de adaptar el efecto espesor/ancho del adoquín y la influencia de cualquier bisel o radio, aplicar la Tabla A.51, como factor de corrección a la resistencia a la compresión.

Tabla A.53. Factores de corrección.

Espesor del adoquín (mm)	Tipo de adoquín	
	Liso	Biselado
60	1,00	1,06
80	1,04	1,11
100	1,08	1,16

ANEXO XV

NORMA TÉCNICA ECUATORIANA INEN 1 485 (1986-10) ADOQUINES. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

1. Objeto

Esta norma establece el método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión en adoquines.

2. Alcance

Esta norma es aplicable a cualquier tipo o forma de adoquín utilizados para tránsito peatonal y tráfico vehicular ligero o pesado.

3. Resumen

El procedimiento que se describe en esta norma se basa en someter un adoquín a la aplicación de una carga creciente de compresión, hasta provocar su falla (se considerará que esta ocurre cuando la muestra no puede soportar más carga).

4. Aparatos de ensayo

Máquina de ensayo. Podrá ser cualquier tipo confiable, con la capacidad suficiente para efectuar el ensayo y que sea también capaz de aplicar la carga de rotura.

La máquina debe estar equipada con dos placas de acero de dureza mínima Rockell C 55. La placa superior debe estar provista de una rótula esférica. Las caras de apoyo de las placas deben ser planas dentro de una tolerancia de 0,15 por mil. Las superficies de contacto de las placas deben tener grabadas circunferencias concéntricas de 1mm de profundidad y de 1mm de ancho, aproximadamente, para facilitar el centrado de las probetas. El centro de la rótula debe coincidir con el centro de la cara de apoyo. Si el radio de la rótula es más pequeño que el radio o longitud de la probeta que va a ensayarse, la porción de superficie de apoyo extendida más allá de la rótula tendrá un espesor no menor

que la diferencia entre el radio de la rótula y el lado de la probeta. La menor dimensión de la superficie de apoyo será al menos como el diámetro mayor de la rótula, y la superficie de apoyo del bloque tendrá como dimensión mínima lo más cerca + 3 % a la mayor dimensión de la probeta que va a ensayarse.

5. Procedimiento

Las muestras deben someterse a prueba en condiciones húmedas, después de haber estado almacenadas por lo menos durante 24 horas en agua, a una temperatura de $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Antes de sumergir los adoquines en el agua, será preciso determinar el área suficiente, de acuerdo al método descrito en la Norma INEN 1 486. Las placas de la máquina se limpiarán con un paño y se debe quitar cualquier residuo de arenilla suelta u otro material que se encuentre en las caras de contacto del adoquín. Por otra parte, se refrentará las probetas con capping o triplay 4 mm de espesor como empaque, el cual se colocará las caras superiores e inferiores de la muestra, y entre las placas de la máquina y la muestra se colocará una plancha de acero de aproximadamente 25 mm de espesor, que cubra toda la superficie de la muestra y sea capaz de distribuir uniformemente las cargas.

El adoquín se debe colocar en la máquina con la superficie de desgaste hacia arriba, de manera que los ejes longitudinales y transversales del mismo queden alineados con los ejes de las placas de la máquina. La aplicación de la carga debe ser continua y no intermitente, a una velocidad aproximada de 15 MPa por minuto, hasta que no se pueda soportar una carga mayor, debiendo registrarse la carga máxima aplicada. La resistencia a la compresión de cada muestra deberá calcularse, dividiendo la carga máxima para el área total de la cara de contacto del adoquín, representado por A y multiplicando por el factor correspondiente tomado de la Tabla A.51, de la Norma INEN 1 488. Dicha resistencia se expresará con una precisión de 1 MPa.

ANEXO XVI CATÁLOGO

TAMIZ VIBRATORIO

Lugar de origen: Henan China (continental)

Marca: PK **Número de modelo:** XZS

Tipo: Circular

Aplicación: productos químicos

Estado: Nuevo

Construcción: Acero al carbono, acero inoxidable

Diámetro: 400-2000mm

Cubierta: 1-5 cubiertas

Granularidad de alimentación: 30 mm-500mesh

Aplicación: la separación en seco / clasificación húmeda

Industria aplicable: alimentaria, química, minería, alimentación

Certificación: ISO9001: 2008, CE

Embalaje y Entrega

Empaque Detalle: Embalaje estándar

Entrega Detalle: 15-20 días laborables

Especificaciones



Figura A.11.Tamiz Vibratorio Industrial.

La separación en seco

La separación de materiales diferentes sobre la base de su forma de partícula
De alimentos, productos químicos, productos farmacéuticos, minerales, alimentos para animales, granos

Clasificación en seco

La separación de partículas sólidas en fracciones exactas del tamaño de

Separación sólido / líquido

De deshidratación de sólidos y la clarificación de líquidos

Sólidos clasificación en medio líquido

La separación de sólidos en una fracción de tamaño en un medio líquido. Para productos químicos, minerales, pulpa y papel, la cerámica, la eliminación de residuos

Características principales

Pequeño volumen con la mudanza fácil

Alto rendimiento con una estructura compacta

Fácil operación y mantenimiento

Larga vida de la pantalla, cambio de pantalla de tela fácil y rápida

Equipado con anti-deslumbrante equipo (pelotas de rebote), así como a prueba de polvo

ISO9001: 2008, la certificación CE

Tabla A.54. Especificaciones técnicas

Model	Diameter (mm)	Screen Surface		Feeding Granularity (mm)	Screen Opening	Deck	Power (kw)
		Diameter (mm)	Area (m ²)				
XZS-600	600	540	0.2281	<10	2-500 mesh	1-5	0.55
XZS-800	800	730	0.4183	<20		1-5	0.75
XZS-1000	1000	900	0.6359	<20		1-5	1.1
XZS-1200	1200	1100	0.9499	<20		1-5	1.5
XZS-1500	1500	1400	1.5386	<20		1-5	2.2
XZS-1800	1800	1700	2.2687	<30		1-3	3.0
XZS-2000	2000	1886	2.7922	<30		1-3	3.7

FILTRO

Proceso de separación líquido/sólido

Los filtros-prensa con traslado lateral J-Press® son la solución rentable para conseguir tortas de filtro de alto contenido sólido con efluentes líquidos de claridad extremadamente alta. El filtro-prensa J-Press® es considerado por los profesionales del sector como el mejor filtro-prensa con traslado lateral, al combinar una construcción robusta, ingeniería de precisión, un fácil manejo y gran variedad de características y opciones para resolver los problemas de secado más difíciles.

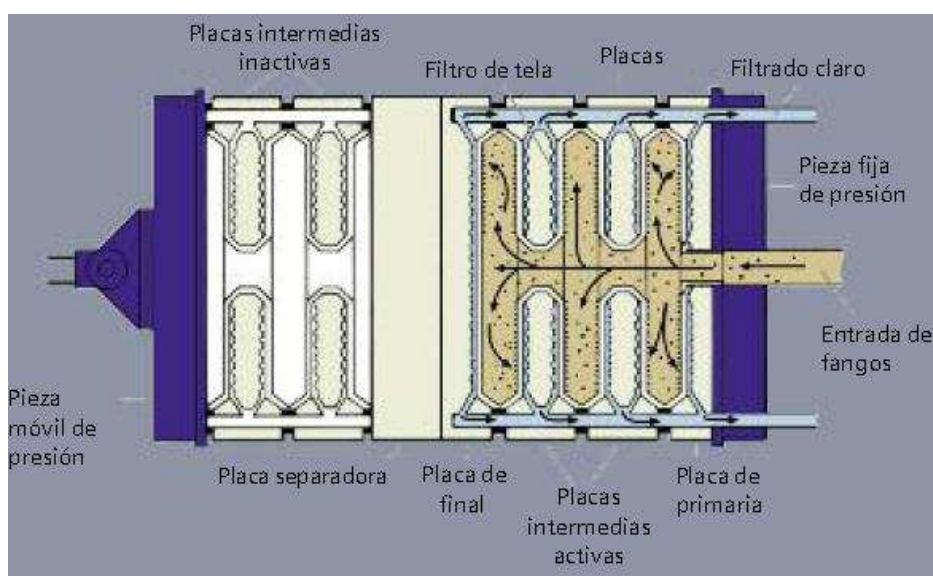


Figura A.12. Funcionamiento del filtro prensa.

El filtro-prensa J-Press® es uno de los secadores más versátiles del mercado y se usa en numerosas aplicaciones industriales y municipales. Los filtros-prensa J-Press® se pueden usar para recuperar sólidos y líquidos de un flujo residual o de proceso. Gracias a los excelentes materiales utilizados en su construcción, los filtros prensa J-Press® están especialmente indicados en el secado de suspensiones agresivas, ácidas o básicas. Los filtros-prensa J-Press® están disponibles en una amplia variedad de tamaños y tipos y se pueden configurar para solucionar el secado un amplio rango de caudales de proceso, desde 95 litros diarios hasta 3.800 m³ diarios. Estos filtros consiguen resultados consistentes en condiciones variables de afluentes.

Los filtros-prensa J-Press® también pueden montar placas de prensa de diafragma (o de membrana) que comprimen mecánicamente la torta de filtro antes de que se descargue del filtro-prensa, con lo que se obtienen sólidos más secos.

A continuación se presenta la forma de selección de la capacidad del filtro que se necesita.

Es posible utilizar la siguiente fórmula para calcular el volumen (ft³) (l) de un filtro-prensa J-Press® en la mayoría de las aplicaciones de secado:

$$\text{Volumen total del filtro-prensa (ft}^3\text{) (l)} = \frac{\text{Volumen total de alimentación de producto (galones) (litros)} \times \text{\% concentración en sólidos de la entrada de producto}^* \times 8,34 \text{ (lb por galón de agua) (1 kg/l) (densidad del agua)} \times \text{peso específico del fango de entrada}}{\text{Densidad de la torta de filtro húmeda}^{**} \text{ (lb/ft}^3\text{)(kg/l)} \times \text{\% de sólido seco en la torta de filtro}^* \text{ or } \text{densidad de la torta (lb/ft}^3\text{) (kg/l) } \times \text{\% de sólido en la torta}}$$

* La concentración en % se debe expresar en forma decimal (por ejemplo, 2% = 0,02).

** Densidad de la torta de filtro húmeda = Peso específico de la torta de filtro húmeda x Densidad del agua

Figura A.13. Tablas de selección y capacidad.

A partir de la capacidad del filtro se obtienen las siguientes dimensiones disponibles por la empresa SIEMENS.

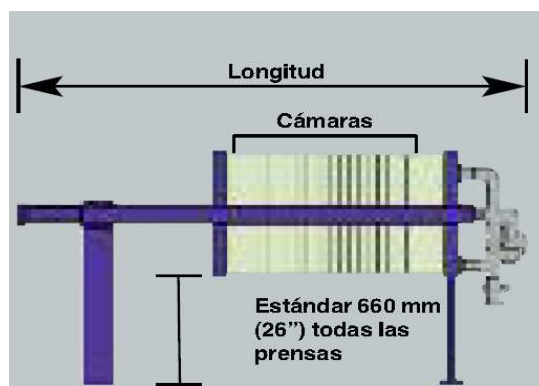


Figura A.14. Dimensiones del filtro prensa.

Tabla A. 55. Especificaciones técnicas del filtro prensa.

Prensa	Medida	Mínimo	Máximo
250 mm	Volumen (ft ³)	0,1	0,4
	Volumen (l)	2,8	11,3
Altura 381mm(15")	Longitud (pulg)	24,0	38,0

Ancho 470mm(18,5")	Longitud (mm)	607,0	975,0
470mm	Volumen (ft3)	0,5	4,0
	Volumen (l)	14,2	113,0
Altura 1.162mm(45,8")	Longitud (pulg)	41,0	93,0
Ancho 838mm(33,0")	Longitud (mm)	1.041,0	2.362,0
630mm	Volumen (ft3)	2,0	8,0
	Volumen (l)	57,0	227,0
Altura 1.299mm(51,0")	Longitud (pulg)	85,0	129,0
Ancho 916mm(36,0")	Longitud (mm)	2.168,0	3.277,0
800mm	Volumen (ft3)	8,0	25,0
	Volumen (l)	227,0	708,0
Altura 1.473mm(58,0")	Longitud (pulg)	122,0	196,0
Ancho 1.105mm(43,5")	Longitud (mm)	3.099,0	4.978,0
1.000mm	Volumen (ft3)	25,0	55,0
	Volumen (l)	708,0	1.558,0
Altura 1.689mm(66,5")	Longitud (pulg)	175,0	260,0
Ancho 1.308mm(51,5")	Longitud (mm)	4.445,0	6.604,0
1.200mm	Volumen (ft3)	50,0	125,0
	Volumen (l)	1.416,0	3.540,0
Altura 1.892mm(74,5")	Longitud (pulg)	217,0	356,0
Ancho 1.524mm(60,0")	Longitud (mm)	5.512,0	9.042,0
1.500mm	Volumen (ft3)	130,0	270,0
	Volumen (l)	3.682,0	7.646,0
Altura 2.432mm(95,7")	Longitud (pulg)	313,0	500,0
Ancho 1.903mm(74,9")	Longitud (mm)	7.950,0	12.700,0
1,5 x 2,0m	Volumen (ft3)	275,0	350,0
	Volumen (l)	7.788,0	9.912,0
Altura 3.470mm(136,6")	Longitud (pulg)	430,0	507,0
Ancho 2.007mm(79,0")	Longitud (mm)	10.922,0	14.097,0
2,0 x 2,0m	Volumen (ft3)	300,0	600,0
	Volumen (l)	8.496,0	16.992,0
Altura 2.692mm(106,0")	Longitud (pulg)	405,0	562,0
Ancho 3.480mm(137,0")	Longitud (mm)	10,287,0	14.275,0

VIBROCOMPACTADORA

Cortadora y dobladora computarizada, mayor precisión en nuestros equipos.

- Soldadores tipo micro wire y tic.
- Para mejor acabado y sin escoria
- Acabado y precisión en piezas.
- Torno industrial digital

Planta para fabricación de bloques y adoquines hidráulico-mecánica compactadora: capacidad (según el molde) para bloques 500 bloques/ 8 horas, 3500 adoquines/8 horas,

Componentes:

Motor de 0,5 hp monofásico 220 v para el sistema hidráulico.

Motor de 0,5 hp monofásico 220 v del sistema vibrador y bomba hidráulica auxiliar.

2 gatos de desmoldar

2 válvulas de comando para accionar los gatos.

Presión de trabajo: 100 psi.

Descripción y aplicaciones: la máquina presentada es una vibrocompactadora hidráulica universal, la misma que puede emplearse en la confección de bloques, adoquines, etc. La fuerza y velocidad desarrolladas en sus gatos le permite conformar el material de una manera rápida y confiable de tal suerte que los vibrocompactados puedan pasar las pruebas estándar.



Figura A.15. Modelo de vibrocompactadora.