

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA

**DISEÑO DEL PROCESO DE DISPOSICIÓN FINAL DE LOS
DESECHOS DE PINTURAS COMERCIALES DE LA EMPRESA
INCINEROX**

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO

ANDRÉS VINICIO GARZÓN ROBAYO

andyvgr100@hotmail.com

DIRECTOR: ING. MARCELO FERNANDO SALVADOR QUIÑONES MSC.

marcelo.salvadorq@epn.edu.ec

Quito, septiembre 2016

© Escuela Politécnica Nacional (2016)
Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN

Yo, Andrés Vinicio Garzón Robayo, 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.

Andrés Vinicio Garzón Robayo

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Andrés Vinicio Garzón Robayo, bajo mi supervisión.

Ing. Marcelo Salvador
DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Extiendo mis más profundos agradecimientos a mi familia; a mi padre Ramiro Garzón por ser un ejemplo de lucha constante; a mi madre Mercedes Robayo por ser el soporte emocional que un hijo necesita para cumplir sus objetivos; a mi hermana Yadira Garzón por el cariño brindado a pesar de todas las circunstancias; a mi sobrino Alexander Mendoza por llegar a la familia en el momento preciso y llenarnos de alegría. A todos ellos muchas gracias porque con su ejemplo, su sacrificio y esfuerzo me han ayudado a crecer como una persona de bien y a incentivarme a ser un profesional. Gracias por el apoyo brindado; por cambiar el tiempo no compartido por comprensión y afecto; por no dejarme rendir y por siempre ser mi impulso y motivación para alcanzar siempre lo anhelado.

Agradezco a mi esposa Edith Alvarez por permitir compartir con ella mis logros y por aceptar emprender conmigo un nuevo proyecto de vida que contemplan nuevos objetivos. De hoy en adelante todos los logros obtenidos serán fruto del esfuerzo mutuo y en un futuro será el éxito de una familia formada con amor y con valores. Agradezco a mi suegra, Teresita Zapata, a mi cuñada Ana María Alvarez y a su familia, por extenderme siempre una mano amiga.

Agradezco a todos los profesores que influyeron en mi carrera de una u otra forma, pero sobre todo a la Magister Lucía Montenegro por ser mi guía en el desarrollo de este proyecto; por dedicar su tiempo, paciencia, experiencia, conocimiento y ayuda que me han servido de mucho para culminar con mi carrera profesional; porque a más de ser mi profesora ha sido una amiga y un ejemplo de superación personal.

Agradezco al personal de la empresa Obsidian Cia. Ltda, especialmente a la Ingeniería Ana Dávila y al Doctor Adolfo Holguín por su apertura y su apoyo para la culminación de este proyecto

Agradezco de una manera especial al Ingeniero Marcelo Salvador por aceptar ayudarme, por extenderme una mano para que yo pueda al fin cerrar este largo y duro proceso.

Agradezco a la empresa INCINEROX CIA.LTDA., especialmente al señor Diego Román, al Biólogo Iván Tapia y al Ingeniero Pedro Mantilla por darme la correspondiente apertura, por compartirme su conocimiento, por el esfuerzo económico realizado y por darme todas las facilidades del caso para el desarrollo de esta investigación.

DEDICATORIA

Dedico esta victoria a todos aquellos que pensaron que no lo iba a lograr incluyéndome a mí mismo. A todos aquellos que tienen ganas de luchar para conseguir sus objetivos y que no se rinden por nada a pesar de todas las circunstancias incluyendo la falta de posibilidades. A todos aquellos que se cansaron de luchar. A todos aquellos que no tuvieron la necesidad de luchar pero que no se sienten realizados. A todos aquellos que en algún momento se desviaron del camino y eligieron otro rumbo. A todos aquellos que piensan que el dinero es todo en la vida. A todos aquellos que piensan que también es necesario sentir amor en su corazón. A todos aquellos que viven para servir. A todos aquellos que les gusta la ciencia. A todos aquellos que caminan por la vía del Señor. A todos aquellos que comparten mi ideología, pero sobre todo, a todos aquellos que la entienden.

Dedico este logro principalmente a mi familia por haber permanecido unida a pesar de todos los sacrificios realizados con el objetivo de que yo culmine hoy un proyecto de vida más y por incentivar el emprendimiento de muchos otros proyectos, los mismos que me llevarán en un camino sin fin en busca del éxito. Una dedicatoria especial a mi esposa porque ahora es ella mi impulso de superación.

Dedico este triunfo a mis compañeros ya que con ellos hemos compartido 6 años de nuestras vidas en los que hemos tenido que intercambiar conocimientos, ideas, pensamientos y experiencias, siempre con la oportunidad de sacar el mejor provecho de todo aquello que compartimos. No voy a mencionar nombres porque no quiero olvidarme de ninguno. A pesar de los momentos malos, estoy seguro que los momentos buenos fueron más sobre todo aquellos en los que estuvo la ciencia de por medio.

Dedico este proyecto a toda la comunidad industrial, la misma que busca la manera de dar destino final a sus desechos peligrosos y les invito a permanecer dentro de una investigación constante que les permita obtener los conocimientos

necesarios referentes a los diferentes métodos de disposición final y a tomar en cuenta que existen más opciones a parte de la incineración, las mismas que al ser controladas de tal forma que sean técnicamente eficientes, pueden llegar a ser la mejor decisión para la disposición final de sus residuos y de esta manera ayudar a reducir la contaminación del medio ambiente.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
RESUMEN	xii
INTRODUCCIÓN	xiv
1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	1
1.1 Generalidades de las pinturas	1
1.1.1 Definiciones	1
1.1.2 Componentes de las pinturas y barnices	2
1.1.3 Clasificación de las pinturas	4
1.1.3.1 Pinturas a base de solventes	5
1.1.3.2 Pinturas con alto contenido en sólidos	5
1.1.3.3 Pinturas a base de agua	5
1.1.3.4 Pinturas en polvo	6
1.1.3.5 Pinturas de curado por radiación	7
1.2 Problemática ambiental ocasionada por los desechos de pinturas	8
1.2.1 Las pinturas como desechos	8
1.2.2 Efectos a la salud y al medio ambiente	13
1.3 Métodos de tratamiento y eliminación de residuos tóxicos y peligrosos	16
1.3.1 Procesos físico-químicos	16
1.3.2 Métodos biológicos	17
1.3.3 Estabilización y solidificación	18
1.3.3.1 Mecanismos de estabilización/solidificación	19
1.3.3.2 Tecnología de estabilización/solidificación	23
1.3.4 Métodos térmicos	29
1.3.5 Celda de confinamiento	30
2 PARTE EXPERIMENTAL	36
2.1 Caracterización de la mezcla de los desechos de pintura	36
2.1.1 Muestreo de la mezcla de desechos de pintura	36
2.1.2 Determinación de la densidad	36
2.1.3 Determinación de la corrosividad	37
2.1.3.1 Determinación del pH	37
2.1.3.2 Determinación de la corrosión a la lámina de acero	38
2.1.4 Determinación de la reactividad y explosividad	38
2.1.5 Determinación de la toxicidad	39
2.1.6 Determinación de la inflamabilidad	39
2.2 Evaluación del proceso de estabilización/solidificación	40
2.2.1 Estabilización/solidificación de la mezcla de desechos de pintura	40
2.2.2 Caracterización toxicológica de las cenizas volantes	42
2.2.3 Propiedades físicas y químicas de las mezclas estabilizadas/solidificadas	42
2.2.3.1 Determinación de la resistencia a la compresión	42

2.2.3.2	Determinación de la humedad	43
2.2.3.3	Determinación del pH y la conductividad	44
2.2.4	Caracterización toxicología de las mezclas estabilizadas/solidificadas	44
2.3	Diseño de la planta de estabilización/solidificación de los desechos de pintura	45
2.3.1	Dimensionamiento del tanque de almacenamiento de los desechos de pintura	46
2.3.2	Dimensionamiento de los silos de almacenamiento del cemento, cal y cenizas	48
2.3.3	Selección de la banda transportador	48
2.3.4	Dimensionamiento del tanque mezclador	49
2.3.5	Diseño de la bomba centrífuga	49
2.3.6	Diseño de las tuberías	50
2.3.7	Diseño de las válvulas	50
2.4	Diseño de la celda de confinamiento para el producto estabilizado/solidificado	51
2.5	Análisis económico del proceso de disposición final de los desechos de pinturas	52
3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	54
3.1	Caracterización de la mezcla de los desechos de pintura	54
3.1.1	Determinación de la densidad	54
3.1.2	Determinación de la corrosividad	54
3.1.3	Determinación de la reactividad y explosividad	55
3.1.4	Determinación de la toxicidad	56
3.1.5	Determinación de la inflamabilidad	59
3.2	Evaluación del proceso de estabilización/solidificación	60
3.2.1	Caracterización toxicológica de las cenizas volantes	60
3.2.2	Propiedades físicas y químicas de las mezclas estabilizadas/solidificadas	61
3.2.3	Caracterización toxicológica de las mezclas estabilizadas/solidificadas	73
3.2.4	Selección de la mejor propuesta de estabilización y solidificación	83
3.3	Diseño de la planta de estabilización/solidificación de los desechos de pintura	84
3.3.1	Balance de masa	84
3.3.2	Balance de energía	85
3.3.3	Diagrama de flujo del proceso propuesto para la estabilización/solidificación de los desechos de pintura	86
3.3.4	Especificaciones de los equipos para la planta de estabilización/solidificación de los desechos de pintura	89
3.3.4.1	Tanque de almacenamiento de la mezcla de desechos de pinturas	89
3.3.5.2	Silos de almacenamiento	90
3.3.5.3	Banda Transportadora	91
3.3.5.4	Tanque mezclador	92
3.3.5.5	Bomba centrífuga	93
3.3.5.6	Tuberías para el transporte de la mezcla de desechos de pintura hacia el tanque mezclador	94
3.3.5.7	Válvula manual	96

3.3.5	Distribución de los equipos en la planta de estabilización/solidificación de los desechos de pintura	97
3.4	Diseño de la celda de confinamiento para el producto estabilizado/solidificado	99
3.4.1	Especificaciones de la celda de confinamiento	99
3.4.2	Sistema de sellado de la celda y recolección de lixiviados	101
3.4.3	Sistema de cobertura final, clausura y cuidados post clausura	103
3.5	Análisis económico del proceso de disposición final de los desechos de pinturas	105
3.5.1	Inversión para la implementación de la planta de estabilización/solidificación de desechos de pintura y su celda de confinamiento	105
3.5.1.1	Inversión fija	105
3.5.1.2	Capital de trabajo	107
3.5.1.3	Inversión fija total	109
3.5.2	Costos de producción	110
3.5.3	Ingresos percibidos por la prestación de servicios	111
3.5.4	Costo-beneficio	112
3.5.5	Evaluación económica	112
3.5.8	Comparación entre la disposición final que incinerar realiza actualmente con la propuesta desarrollada en el presente proyecto	113
3.5.9	Comparación económica y ambiental entre la incineración y estabilización/solidificación de la mezcla de desechos de pintura	116
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	118
4.1	Conclusiones	118
4.2	Recomendaciones	121
	BIBLIOGRAFÍA	122
	ANEXOS	134

ÍNDICE DE TABLAS

		PÁGINA
Tabla 1.1.	Límites máximos permisibles en el extracto TCLP (Prueba de Lixiviación)	10
Tabla 1.2.	Criterios microbiológicos para no catalogar a un desecho biológico como peligroso	12
Tabla 1.3.	Composición química del cemento Portland	24
Tabla 1.4.	Criterios de ordenamiento y elegibilidad para que un desechos pueda ser depositado en una celda de confinamiento	32
Tabla 2.1.	Mezcla estabilizada/solidificada con cemento, cal y pinturas	41
Tabla 2.2.	Mezcla estabilizada/solidificada con cemento, cal, pinturas y ceniza	41
Tabla 3.1.	Valores de densidad determinados en las muestras de pintura	54
Tabla 3.2.	Resultados de pH en las muestras de la mezcla de pintura	55
Tabla 3.3.	Resultados de corrosividad de la muestras de la mezcla de pinturas	55
Tabla 3.4.	Reactividad y explosividad de la mezcla de pinturas	56
Tabla 3.5.	Concentración de compuestos inorgánicos y orgánicos en la mezcla de desechos de pinturas	57
Tabla 3.6.	Valores del punto de inflamación de las muestras de pintura	59
Tabla 3.7.	Concentración de compuestos inorgánicos en las cenizas volantes	60
Tabla 3.8.	Caracterización de las mezclas (M) y su respectiva repetición (R), de la estabilización/solidificación de pinturas con cemento y cal	61
Tabla 3.9.	Caracterización de las mezclas (M) y su respectiva repetición (R), de la estabilización/solidificación de pinturas con cemento, cal y cenizas	69
Tabla 3.10.	Caracterización toxicológica de las mezclas (M) y su respectiva repetición (R), de la estabilización/solidificación de pinturas con cemento y cal	73
Tabla 3.11.	Caracterización toxicológica de las mezclas (M) y su respectiva repetición (R), de la estabilización/solidificación de pinturas con cemento, cal y cenizas	79
Tabla 3.12.	Consumo de energía eléctrica en un día de proceso de estabilización/solidificación de la mezcla de desechos de pintura	85

Tabla 3.13.	Nomenclatura de los equipos del diagrama de flujo del proceso de estabilización/solidificación de los desechos de pintura	86
Tabla 3.14.	Cantidad de cemento, cal y cenizas a ser transportados hacia el tanque mezclador en un día de operación	88
Tabla 3.15.	Especificaciones y esquema del tanque de almacenamiento de la mezcla de desechos de pintura	89
Tabla 3.16.	Especificaciones y esquemas de los silos de almacenamiento del cemento, cal y cenizas	91
Tabla 3.17.	Especificaciones de la banda transportadora	92
Tabla 3.18.	Especificaciones del tanque mezclador	93
Tabla 3.19.	Especificaciones de la bomba utilizada para el transporte de la mezcla de desechos de pintura desde el tanque de almacenamiento hasta el tanque mezclador	94
Tabla 3.20.	Características de las tuberías por donde va a circular la mezcla de desechos de pintura	95
Tabla 3.21.	Características y esquema de la válvula de descarga de la mezcla de desechos de pintura	96
Tabla 3.22.	Nomenclatura de los equipos y vehículos de la distribución en planta del proceso de estabilización/solidificación de los desechos de pintura	97
Tabla 3.23.	Especificaciones de la celda de confinamiento	100
Tabla 3.24.	Especificaciones de la piscina de recolección de lixiviados	103
Tabla 3.25.	Inversión en construcciones	105
Tabla 3.26.	Inversión en maquinaria y equipos	106
Tabla 3.27.	Inversión fija	107
Tabla 3.28.	Inversión en materia prima	107
Tabla 3.29.	Costo de energía eléctrica	108
Tabla 3.30.	Costo de mano de obra	109
Tabla 3.31.	Inversión en capital de trabajo para la puesta en marcha de la planta de disposición final de desechos de pintura	109

Tabla 3.32.	Inversión fija total para la puesta en marcha de la planta de disposición final de desechos de pintura	109
Tabla 3.33.	Depreciaciones de las construcciones, maquinaria y equipos	110
Tabla 3.34.	Costos totales	110
Tabla 3.35.	Costos de producción	111
Tabla 3.36.	Ingresos por disposición final y transporte de los desechos de pintura	111
Tabla 3.37.	Flujo de caja	112
Tabla 3.38.	Proceso de estabilización/solidificación de pinturas de la empresa Incinerox	113
Tabla 3.39.	Resultados de las pruebas preliminares del proceso de estabilización/solidificación realizado por Incinerox	114
Tabla 3.40.	Concentración de metales pesados en la mezcla de desechos de pinturas y en el extracto TCLP de la mezcla semi solidificada con cemento, cal y cenizas	114
Tabla 3.41.	Comparación de los resultados obtenidos en el proyecto de titulación y en las pruebas preliminares del proceso de estabilización/solidificación realizado por Incinerox	115
Tabla 3.42.	Comparación entre la incineración y la estabilización/solidificación de la mezcla de desechos de pintura	116
Tabla AI.1.	Datos para el cálculo de la densidad de la mezcla de pinturas	135
Tabla AI.2.	Valores de pH medidos en las 3 muestras de la mezcla de pintura	136
Tabla AI.3.	Peso perdido por la rodela de acero SAE 1020 después de la prueba de corrosión	138
Tabla AI.4.	Valores del punto de inflamación determinados en las 3 muestras de la mezcla de los desechos de pintura	140
Tabla AI.5.	Valores de puntos de inflamación corregidos	141
Tabla AII.1.	Datos experimentales para la determinación de la densidad del cemento, cal y cenizas empleados para la estabilización/solidificación de los desechos de pintura	145
Tabla AII.2.	Densidad del cemento, cal y cenizas empleados para la estabilización/solidificación de los desechos de pintura	145
Tabla AII.3.	Cantidad del cemento, cal y pinturas correspondientes a las mezclas de estabilización/solidificación de los desechos de pintura	145

Tabla AII.4.	Cantidad del cemento, cal, cenizas y pinturas correspondientes a las mezclas de la estabilización/solidificación de los desechos de pintura	146
Tabla AII.5.	Datos experimentales para determinar la resistencia a la compresión de los cilindros correspondientes a los mezclas de las 2 propuestas de estabilización/solidificación	149
Tabla AII.6.	Resistencia a la compresión de los cilindros correspondientes a las mezclas de las 2 propuestas de estabilización/solidificación	150
Tabla AII.7.	Datos experimentales para determinar la humedad de los cilindros de la estabilización/solidificación de pinturas con cemento y cal	151
Tabla AII.8.	Datos experimentales para determinar la humedad de los cilindros de la estabilización/solidificación de pinturas con cemento, cal y cenizas	152
Tabla AII.9.	Datos experimentales para determinar el pH y la conductividad de las mezclas de la estabilización/solidificación de pinturas con cemento y cal	153
Tabla AII.10.	Datos experimentales para determinar el pH y la conductividad de las mezclas de la estabilización/solidificación de pinturas con cemento, cal y cenizas	154
Tabla AIII.1.	Cantidad de cemento, cal, cenizas y pinturas a ser almacenadas en un mes de operación	156
Tabla AIII.2.	Dimensiones de los tanques de almacenamiento del cemento, cal y cenizas	164

ÍNDICE DE FIGURAS

		PÁGINA
Figura 1.1.	Contenido de solvente y/o agua en las pinturas convencionales, a base de agua y con alto contenido en sólidos	4
Figura 1.2.	Contaminación ambiental ocasionada por un mal manejo de residuos	8
Figura 1.3.	Rutas de movilización de residuos peligrosos	14
Figura 1.4.	Residuo aceitoso encapsulado en matriz aglomerante	20
Figura 1.5.	Microencapsulación de Cd en matriz de cemento. a) baja y b) alta magnificación	21
Figura 1.6.	Residuo orgánico adsorbido a una arcilla organofílica	22
Figura 1.7.	Reacciones de hidratación del cemento Portland	25
Figura 1.8.	Representación esquemática del fraguado del cemento	26
Figura 1.9.	Sistema de sellado y recolección de lixiviados	31
Figura 3.1.	Humedad en función de las relaciones pintura:cemento de las mezclas de pinturas estabilizadas/solidificadas con cemento y cal	63
Figura 3.2.	Humedad en función de las relaciones cal:cemento de las mezclas de pinturas estabilizadas/solidificadas con cemento y cal	63
Figura 3.3.	pH en función de las relaciones pintura:cemento de las mezclas de pinturas estabilizadas/solidificadas con cemento y cal	64
Figura 3.4.	pH en función de las relaciones cal:cemento de las mezclas de pinturas estabilizadas/solidificadas con cemento y cal	64
Figura 3.5.	Conductividad en función de las relaciones pintura:cemento de las mezclas de pinturas estabilizadas/solidificadas con cemento y cal	66
Figura 3.6.	Conductividad en función de las relaciones pintura:cemento de las mezclas de pinturas estabilizadas/solidificadas con cemento y cal	66
Figura 3.7.	Resistencia a la compresión en función de las relaciones pintura:cemento de las mezclas de pinturas estabilizadas/solidificadas con cemento y cal	67
Figura 3.8.	Resistencia a la compresión en función de las relaciones pintura:cemento de las mezclas de pinturas estabilizadas/solidificadas con cemento y cal	67

Figura 3.9.	Porcentaje de humedad de las mezclas (M) y su respectiva repetición (R) de la estabilización/solidificación de pinturas con cemento, cal y cenizas respectivamente	70
Figura 3.10.	pH de las mezclas (M) y su respectiva repetición (R) de la estabilización/solidificación de pinturas con cemento, cal y cenizas respectivamente	70
Figura 3.11.	Conductividad de las mezclas (M) y su respectiva repetición (R) de la estabilización/solidificación de pinturas con cemento, cal y cenizas respectivamente	71
Figura 3.12.	Resistencia a la compresión de las mezclas (M) y su respectiva repetición (R) de la estabilización/solidificación de pinturas con cemento, cal y cenizas respectivamente	71
Figura 3.13.	Concentración de arsénico, tolueno e isobutanol, en la caracterización de pinturas y en las mezclas (M) y su respectiva repetición (R), de la estabilización/solidificación con cemento y cal	75
Figura 3.14.	Concentración de arsénico en función de las relaciones pintura:cemento de la mezcla de pintura estabilizada/solidificada con cemento y cal	77
Figura 3.15.	Concentración de arsénico en función de las relaciones cal:cemento de la mezcla de pintura estabilizada/solidificada con cemento y cal	77
Figura 3.16.	Concentración de bario en la caracterización de pinturas y en las mezclas (M) y su respectiva repetición (R), de la estabilización/solidificación con cemento y cal	78
Figura 3.17.	Concentración de arsénico, tolueno e isobutanol, en la caracterización de pinturas, cenizas volantes y en las mezclas (M) y su respectiva repetición (R), en la estabilización/solidificación de pinturas con cemento, cal	81
Figura 3.18.	Concentración de bario, en la caracterización de pinturas, cenizas volantes y en las mezclas (M) y su respectiva repetición (R), en la estabilización/solidificación de pinturas con cemento, cal y cenizas	82
Figura 3.19	Balance de masa del proceso de estabilización/solidificación de la mezcla de desechos de pintura	85
Figura 3.20.	Diagrama de flujo del proceso de estabilización/solidificación de la mezcla de desechos de pinturas	87
Figura 3.21.	Distribución de los equipos en la planta de estabilización/solidificación de la mezcla de desechos de pinturas	98
Figura 3.22.	Esquema de la altura de cada nivel de la celda de disposición final de	

	la mezcla de desechos de pintura	100
Figura 3.23.	Esquema del sistema de sellado multilaminar para la celda de disposición final de la mezcla de desechos de pintura estabilizada	101
Figura 3.24.	Esquema de los cimientos de la celda de disposición final de la mezcla de desechos de pintura	103
Figura 3.25.	Esquema de la cubierta final de la celda de confinamiento de los desechos de pintura	104
Figura AI.1.	Esquema del equipo para determinar la corrosividad de la mezcla de los desechos de pinturas	137
Figura AII.1.	Probetas de los dos experimentos de estabilización/solidificación a los 28 días de curado	147
Figura AIII.1.	Esquema del recipiente cilíndrico con sistema de agitación para el almacenamiento de pinturas	157
Figura AIII.2.	Longitudes características de diferentes tipos de rodetes	160
Figura AIII.3.	Consumo de energía de diversos agitadores, expresado por el número de potencia, Po o Np , y el número de Reynolds, Re	161
Figura AIII.4.	Esquema del recipiente cilíndrico con tapa cónica para el almacenamiento del cemento, cal y cenizas	162
Figura AIII.5.	Esquema del recipiente cilíndrico con sistema de agitación para el mezclado de cemento, cal, pinturas y cenizas	166
Figura AIV.1.	Especificaciones de la banda transportadora	175
Figura AIV.2.	Especificaciones de la bomba centrífuga	176
Figura AIV.3.	Especificaciones de las tuberías de succión y de descarga del tanque de almacenamiento de la mezcla de desechos de pintura la mezcla	177
Figura AIV.4.	Especificaciones de la válvula de descarga de la mezcla de desechos de pintura	178

ÍNDICE DE ANEXOS

	PÁGINA
ANEXO I Cálculo de las propiedades que comprenden la caracterización de la mezcla de los desechos de pintura	135
ANEXO II Cálculo de las propiedades que comprenden la evaluación del proceso de estabilización/solidificación de la mezcla de los desechos de pintura	142
ANEXO III Diseño de la planta de estabilización/solidificación de los desechos de pintura	156
ANEXO IV Catálogo de los equipos seleccionados	175
ANEXO V Diseño de la celda de confinamiento	179
ANEXO VI Análisis económico	182

RESUMEN

En el presente proyecto se diseñó un proceso de disposición final de los desechos de pinturas comerciales que llegan a la empresa Incinerox. Para esto, se caracterizó una mezcla de los desechos conformada por pinturas a base de agua, pinturas a base de solvente, pinturas y barnices residuales caducados bajo criterios CRETIB, es decir, se determinó su corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad e inflamabilidad.

Mediante la experimentación se determinó que la mezcla no es corrosiva por tener un pH entre 2,0 y 12,5 y por corroer al acero SAE 1020 a una razón menor que 6,35 mm/año, no es reactiva ni explosiva ya que en ella no se observó ningún tipo de reacción que pueda ser capaz de formar gases, vapores o humos, no es tóxica porque la concentración de metales pesados y compuestos orgánicos volátiles están por debajo de los límites máximos permisibles, pero sí es inflamable debido a que es líquida y su punto de inflamación resultó menor a 60,5 °C. Entonces, la mezcla de desechos de pintura es considerada como un desecho peligroso por su inflamabilidad (Norma Oficial Mexicana, 2005, pp. 6-10).

Se experimentaron dos procesos de estabilización/solidificación, el primero consistió en hacer mezclas con cemento, cal y pinturas, y el segundo en mezclas de cemento, cal, pinturas y cenizas previamente caracterizadas en cuanto a toxicidad. Para el efecto, se obtuvieron bloques compactos en forma de cilindro de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura. Se ensayaron las relaciones pinturas/cemento de 0,45 y 0,50 ya que estas presentan buenos resultados en cuanto a la resistencia del producto estabilizado (Casseres, Mesa y Hernández, 2008, p. 172). Para obtener una fuerza aceptable en el producto estabilizado se probaron las relaciones cal/cemento del 20 % y del 30 % (Anfacal, 2012, p. 1). Se trabajó con la relación ceniza/cemento del 10 % para obtener una buena resistencia a la compresión (Burgos, Angulo y Mejía, 2011, p. 62).

Los ensayos fueron evaluados según los criterios de ordenamiento y elegibilidad que debe cumplir un proceso de estabilización/solidificación para que el producto pueda ser depositado en una celda de confinamiento. Los parámetros que

contemplan los criterios antes mencionados son la resistencia a la compresión, humedad, pH y conductividad. En este estudio se encontró que todas las mezclas presentaron buena resistencia a la compresión cuyos valores fueron mayores a 50 kPa, pero la mejor propuesta es la mezcla cuya composición contempló las relaciones pintura/cemento: 0,45, cal/cemento: 0,20 y cenizas/cemento: 0,10, por su alta resistencia a la compresión de 1 725,95 kPa, contenido de humedad menor al 10 %, pH entre 3 y 13 y conductividad menor a 100 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Ruiz, 2003, p. 17).

En un día de operación normal, Incinerox procesa 25,0 m³/día de mezcla estabilizada/solidificada, es por esto que se diseñó una planta de procesamiento de la mezcla de desechos de pintura con una capacidad de 37,5 m³/día por razones de seguridad y en el caso de futuras expansiones. Además se diseñó una celda de confinamiento con un tiempo de vida útil de 5 años, tiempo mínimo recomendado para un vertedero destinado a contener los residuos de una comunidad (Jaramillo, 2002, p. 68). El diseño de la celda está acompañado de un sistema de sellado multicapa para minimizar la migración de contaminantes al ambiente debido a los lixiviados y de una piscina de recolección de los mismos.

Se realizó el análisis económico de la implementación del proyecto, encontrándose que se requiere una inversión de 1 242 946,45 USD para las construcciones y para solventar los gastos del primer mes de operación. A lo largo de los 5 años, el flujo de caja es negativo, es decir, los costos correspondientes a 2 421 582,00 USD son mayores a los ingresos de 1 084 800,00 USD por lo que no se percibe utilidades. El costo de proceso es de 152,00 USD/t. Además, en los 5 años de operación de la planta, Incinerox acabará perdiendo 4 498 771,11 USD debido a la estabilización/solidificación de los desechos de pintura, por lo anteriormente mencionado, el proyecto no es económicamente viable.

Finalmente se realizó una comparación entre el proceso de estabilización/solidificación/confinamiento y la incineración, concluyéndose que el primer proceso es el más viable desde el punto de vista económico y ambiental.

INTRODUCCIÓN

Los desechos peligrosos se definen como aquellos desechos sólidos, pastosos, líquidos o gaseosos resultantes de un proceso de producción, transformación, reciclaje, utilización o consumo, que contengan algún compuesto con características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables o infecciosas, que representen un riesgo para la salud humana, los recursos naturales y al ambiente de acuerdo a las disposiciones legales vigentes en el país (Ministerio de Ambiente, 2015, p. 43). Muchas de las industrias, entre ellas, petrolera, pinturas, medicamentos, cosméticos, entre otras, generan desechos de este tipo.

Según lo manifestado en el Art. 88 de la Reforma del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio de Ambiente, TULSMA, referente a la gestión integral de desechos peligrosos y/o especiales, todo generador de desechos peligrosos es el titular y responsable del manejo de los mismos hasta su disposición final, siendo una de sus responsabilidades la entrega de los desechos para su adecuado manejo a un prestador de servicios autorizado por el Ministerio del Ambiente o por alguna autoridad seccional (Ministerio de Ambiente, 2015, p. 46).

Incinerox Cía. Ltda., es una empresa legalmente constituida en el país cuyo principal objetivo es el de preservar el medio ambiente, por lo que sus actividades son: pre tratamiento, tratamiento y disposición final adecuada de residuos tóxicos y peligrosos. La empresa está dedicada principalmente a la incineración controlada de residuos, presta sus servicios a la industria petrolera y al sector de las pinturas, medicamentos, cosméticos, entre otros.

Incinerox ha optado por diversificar sus procesos de disposición final debido a que no todos los desechos se pueden incinerar por las siguientes razones: por la generación de gases de combustión y de gases contaminantes dañinos para la salud, por la disposición que se debe dar a las cenizas producidas, además de que los metales no son destruidos, por la acidificación del agua de lavado de los gases producto de la incineración y la necesidad de su posterior tratamiento y porque es un proceso que requiere un alto costo económico.

Además de la incineración, actualmente, Incinerox se encuentra desarrollando las tecnologías de estabilización/solidificación y biocompostaje como técnicas de disposición final de los residuos tóxicos que llegan a la empresa. Es precisamente el proceso de estabilización/solidificación el que la empresa emplea para los desechos de pinturas. Con esto se pretende reducir la solubilidad, reactividad o movilidad de los compuestos contaminantes convirtiendo a los desechos en un sólido para evitar así el riesgo de volatilización, lixiviación o fugas (LaGrega, Buckingham y Evans, 2001, p. 678).

Los desechos de pinturas llegan hasta Incinerox, aproximadamente 20 000 kg semanales. Los diferentes tipos de pintura (pinturas a base de agua, pinturas a base de solventes, pinturas y barnices residuales caducados) son mezclados con cemento, cal y cenizas, según sea el caso, para su estabilización/solidificación. Luego las mezclas son depositadas en una celda de confinamiento.

Incinerox no ha realizado ningún tipo de estudio para verificar el resultado de su proceso de disposición final, además, pruebas preliminares manifiestan que sus mezclas no cumplen con los criterios para ser depositadas en celdas de confinamiento (Ruiz, 2003, p. 17), por lo tanto, se hace necesaria una investigación que ayude a la empresa en determinar un proceso que evite una contaminación futura por la migración de los contaminantes al medio ambiente.

1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1 GENERALIDADES DE LAS PINTURAS

En el presente proyecto se diseñó el proceso de disposición final de una mezcla conformada por pinturas a base de agua, pinturas a base de solventes, pinturas y barnices residuales caducados, por esta razón es necesario definir qué son las pinturas y los barnices, cuáles son sus componentes y cómo se clasifican.

1.1.1 DEFINICIONES

Pintura, es una suspensión coloidal de pigmentos opacos o de color, que puede contener o no extendedores (cargas) en un ligante de resinas sólidas, líquidas, pastosas, o de aceites secantes vegetales o sintéticos, y ciertos aditivos para mejorar sus características. Cuando los ligantes están en solución, la pintura es capaz de fluir a través de la superficie de aplicación para formar una película sólida y opaca mediante un proceso de curado. Pero cuando los ligantes no están en solución, la fluidez se logra aplicando otros medios como por ejemplo el calor (INEN, 1983, p. 18).

Barniz, es un revestimiento transparente compuesto esencialmente de aceites secantes, resinas y disolventes, capaz de formar una película seca y elástica debido a la reacción química y a la evaporación de los solventes que se producen una vez que ha sido aplicado sobre una superficie (INEN, 1983, p. 6).

En otras palabras, se define como pintura a una dispersión homogénea de uno o varios pigmentos en un ligante que está dispuesto en un solvente al que se incorporan cargas y/o aditivos, que se utiliza para decorar y/o proteger objetos con una película coloreada (Giudice y Pereyra, 2009, p. 2). Por su parte, el barniz está compuesto por un ligante dispuesto en un solvente al que se le incorporan aditivos, es un producto no pigmentado, por lo que, al ser aplicado en forma de película delgada, el sustrato base puede ser observado (Giudice y Pereyra, 2009, p. 126).

1.1.2 COMPONENTES DE LAS PINTURAS Y BARNICES

Los componentes de las pinturas varían según el tipo de pintura, color y grado de brillo. Los principales componentes son: solventes (50-60 %), ligantes o resinas (15-45 %), pigmentos (3-35 %) y aditivos (1-5 %). Los barnices se componen de: solventes (45 %), ligantes o resinas (55 %) y aditivos (5 %) (Ormazabal y Larrañaga, 2002, p. 41).

Antes de conocer la acción de cada uno de los componentes de las pinturas y barnices, se debe entender el mecanismo por el cual estas mezclas actúan sobre un sustrato, el mismo que se describe a continuación.

Las pinturas y barnices se aplican en capas delgadas sobre un sustrato y tienen la propiedad de transformarse en una película sólida, continua y adherente debido a un mecanismo físico (secado) y/o químico (curado) (Giudice y Pereyra, 2009, p. 4).

El secado consiste en la evaporación de los solventes que forman parte de la composición de una pintura líquida aplicada a un sustrato en forma delgada. Las pinturas que forman película por cambios físicos se las denomina termoplásticas o no convertibles, las mismas que son solubles en solventes similares a los de su composición. Este tipo de pinturas presentan la propiedad de secado rápido (Giudice y Pereyra, 2009, p. 4).

El curado es el conjunto de cambios físicos y químicos que transforman el estado termoplástico inicial de las pinturas (líquido soluble) a un estado termoestable (sólido insoluble). Las pinturas que completan la formación de película por mecanismos combinados secado/curado se denominan termoestables o convertibles. El curado puede llevarse a cabo a temperatura ambiente, por acción del calor o por la aplicación de radiación (Giudice y Pereyra, 2009, p. 4). A continuación se describe la acción de cada uno de los componentes que forman parte de las pinturas y barnices:

- a) Los solventes se añaden a los recubrimientos con el fin de dispersar los otros componentes de la mezcla y para reducir la viscosidad de tal forma que se

pueda aplicar el recubrimiento. Se evaporan durante el secado/curado del recubrimiento, por lo que se seleccionan de acuerdo a su capacidad para disolver las resinas y a su velocidad de evaporación. En las formulaciones de pinturas se pueden encontrar mezclas de solventes, los más usados son: hidrocarburos alifáticos (white spirit), hidrocarburos aromáticos (tolueno, xileno y nafta aromática), cetonas (metil etil cetona), alcoholes (metanol, isobutanol), ésteres (acetato de etilo, acetato de butilo) y ésteres glicólicos (metoxipropanol, butilglicol) (Ormazabal y Larrañaga, 2002, pp. 41-42).

- b) Los ligantes o resinas se usan en los recubrimientos para unir los pigmentos y aditivos, son los responsables de la formación de la película plástica final, proporcionan las propiedades al recubrimiento y determinan el comportamiento de la película (brillo, durabilidad, resistencia química, etc.) Las resinas se eligen sobre la base de las propiedades físicas y químicas deseadas para la película. Las más utilizadas son: resinas alquídicas, resinas acrílicas (base solvente o base agua), poliuretanos y poliésteres, vinílicas, termoplásticas y termoestables. (Ormazabal y Larrañaga, 2002, p. 42).
- c) Los pigmentos son sustancias insolubles orgánicas o inorgánicas que se dispersan en el recubrimiento para dar color y opacidad a un sustrato o mejorar su resistencia mecánica. El tipo de pigmento determina el color de la pintura mientras que la cantidad determina el brillo y la opacidad del recubrimiento.

Existen varios tipos de pigmentos: (Ormazabal y Larrañaga, 2002, p. 42).

Pigmentos coloreados: óxidos de hierro

Pigmentos blancos: dióxido de titanio, óxido de zinc

Pigmentos metálicos: escamas de aluminio, níquel y plata

Pigmentos funcionales o cargas: carbonato de calcio, sulfato de bario, sílice

Pigmentos perlescentes: micas tratadas con óxidos metálicos

Se entiende por perlescente a aquel efecto que se produce cuando los pigmentos cambian de color en función del ángulo de incidencia de la luz, lo que brinda un contraste perlado y nacarado (Osaka, 2012).

- d) Los aditivos se usan para mejorar las propiedades físicas y químicas del recubrimiento como por ejemplo el secado, el brillo, la estabilidad, etc. Algunos ejemplos de aditivos son los espesantes, los biocidas y fungicidas, los estabilizadores, los antiespumantes, etc. (Ormazabal y Larrañaga, 2002, p. 42).
- e) Las cargas o extendedores son compuestos inorgánicos insolubles que actúan como agentes de relleno, están dispersos con los pigmentos por lo que no alteran el peso específico de la mezcla, matizan la película, no dan color o brindan un color muy débil por efectos de opalescencia. Las cargas más comunes son los compuestos de bario, calcio o magnesio en forma de carbonatos, sulfatos, silicatos y óxidos (Estrella y Lugar, 2007, p. 7)

1.1.3 CLASIFICACIÓN DE LAS PINTURAS

Las pinturas se clasifican en pinturas a base de solventes o convencionales, pinturas con alto contenido en sólidos, pinturas a base de agua, pinturas en polvo, pinturas de curado por radiación (Ormazabal y Larrañaga, 2002, p. 44).

En la Figura 1.1 se expone un esquema representativo de la composición de las pinturas y barnices convencionales, en base agua y con alto contenido de sólidos.

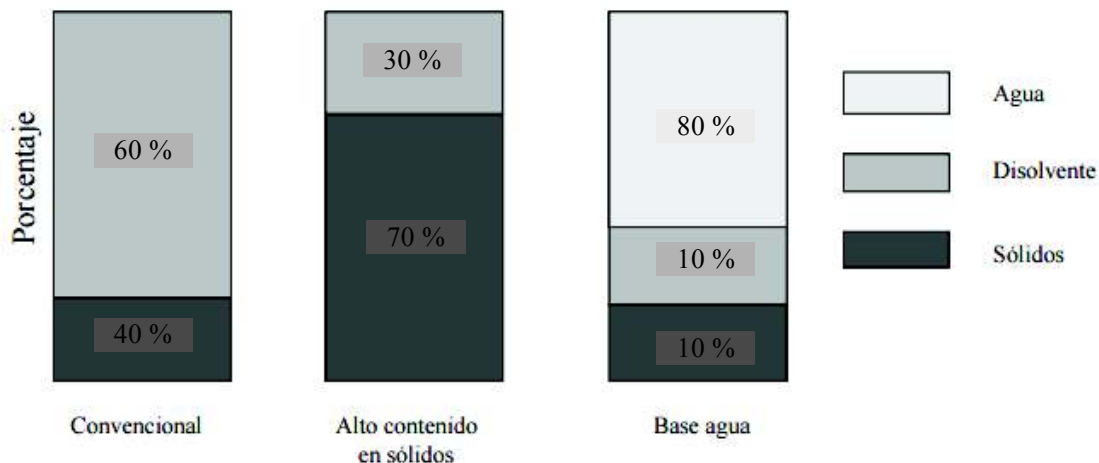


Figura 1.1. Contenido de solvente y/o agua en las pinturas convencionales, a base de agua y con alto contenido en sólidos (Ormazabal y Larrañaga, 2002, p. 46)

1.1.3.1 Pinturas a base de solventes

Son las pinturas convencionales, se caracterizan por (Ormazabal y Larrañaga, 2002, p. 44):

- Contienen en su composición una concentración de solventes entre el 40 % y el 60 % en peso.
- Los solventes más utilizados son: tolueno, xileno, nafta aromática, metil etil cetona, metil isobutil cetona y acetato de butilo.
- Emiten compuestos orgánicos volátiles (VOC's) cuya exposición puede afectar a la salud humana y al medio ambiente.

1.1.3.2 Pinturas con alto contenido en sólidos

Las características de este tipo de pinturas son las siguientes (Ormazabal y Larrañaga, 2002, p. 45):

- Contienen más del 70 % de sólidos en su composición. Para lograr este contenido en sólidos, el ligante o resina tiene que ser modificado químicamente de tal forma que su viscosidad sea más baja que la de las resinas de las pinturas a base de disolventes.
- Las resinas más usadas son las resinas alquídicas, resinas poliéster, poliuretanos, acrílicas, epoxi y plastisoles de cloruro de polivinilo.
- Este tipo de pintura se puede aplicar a madera, plásticos y metales.
- Reducen el uso de disolventes, lo que disminuyen las emisiones de VOC's y por ende los peligros relacionados con incendios y las afectaciones laborales (Eco Diseño, 2006, p. 9)

1.1.3.3 Pinturas a base de agua

Este tipo de pinturas presentan las siguientes características (Ormazabal y Larrañaga, 2002, p. 46):

- Utilizan agua como solvente para dispersar la resina.
- Contienen un 80 % de agua y pequeñas cantidad de otros solventes como los éteres glicólicos.
- El secado de este tipo de pinturas es más lento que aquellas a base de solventes debido a que la evaporación del agua es más lenta. El tiempo de secado puede durar alrededor de 24 horas (Eco Diseño, 2006, p. 10), aunque se debe considerar que la evaporación depende de la humedad relativa ambiental, mientras más baja humedad más rápido será el secado.
- El ambiente ideal para la utilización de este tipo de pinturas es aquel que tiene una temperatura entre 20 y 30 °C y una humedad relativa entre el 30 y 70 %. Cabe mencionar que el secado lento se puede contrarrestar con la utilización de aire o calor (Auto Body Magazine, 2016).
- Para la aplicación de este tipo de pinturas es necesario que la superficie esté totalmente limpia de polvos y grasa para su adecuada adherencia.
- Se aplican en superficies metálicas, de madera y de plástico.
- Reducen la emisión de VOC's, reducen el riesgo de incendio y son fáciles de limpiar.

1.1.3.4 Pinturas en polvo

Las pinturas en polvo se caracterizan por (Ormazabal y Larrañaga, 2002, p. 47):

- Son una mezcla de resinas con pigmentos, no contienen solventes.
- La mezcla es finamente pulverizada en seco con equipos electrostáticos o en lecho fluidizado.
- El curado se realiza por la fundición y posterior polimerización de la resina.
- Son de dos tipos: termoestables y termoplásticas.
- Las resinas termoestables se basan en sistemas epoxi, poliéster, poliuretano y acrílicos que cuando se calientan, se fusionan en una película continua para luego reaccionar químicamente y formar un polímero de gran peso molecular que soporta el calor y no puede volver a fundirse. Su curado se realiza en hornos, por lo que el sustrato debe ser capaz de resistir temperaturas de 180°C.

- Las resinas termoplásticas son polímeros de mayor peso molecular como la poliamida, PVC, fluoropolímeros y poliolefinas que se usan en aplicaciones de película más gruesas, estas resinas forman un recubrimiento que no sufre cambios en su estructura molecular por lo que pueden volver a fundirse una vez que han sido aplicadas, para su curado, el sustrato debe calentarse antes de su aplicación de modo que la resina se funda directamente sobre el soporte.
- Para la aplicación de estas resinas, el sustrato debe estar muy limpio, libre de grasa y otros contaminantes.
- Se puede utilizar directamente sin diluir y se reduce la exposición de los trabajadores a los solventes y a las emisiones de compuestos orgánicos volátiles.

1.1.3.5 Pinturas de curado por radiación

Las propiedades de este tipo de pinturas son (Ormazabal y Larrañaga, 2002, p.48):

- Consisten en una mezcla de oligómeros (polímeros de bajo peso molecular), monómeros, aditivos, pigmentos y fotoiniciadores que se exponen a radiación ultravioleta o electromagnética por un haz de electrones para que se lleve a cabo el curado de las pinturas mediante reticulación.
- Los fotoiniciadores actúan como el catalizador de la reacción.
- El curado mediante haz de electrones es un método costoso y el equipo es complejo y grande, en cambio, el curado UV es incluso más barato que los hornos para el curado convencional.
- El curado es rápido, no requiere de alta temperatura para su reticulación y es útil en materiales sensibles al calor como el papel, madera y plásticos.
- No contienen disolventes, pero los monómeros pueden ocasionar emisión de compuestos orgánicos volátiles debido a la radiación.
- Los oligómeros más comunes son: uretanos, epoxis, poliésteres, siliconas y acrilatos.
- El curado es rápido, no requiere de alta temperatura para su reticulación y es útil en materiales sensibles al calor como el papel, madera y plásticos.

1.2 PROBLEMÁTICA AMBIENTAL OCASIONADA POR LOS DESECHOS DE PINTURAS

1.2.1 LAS PINTURAS COMO DESECHOS

Las actividades industriales, la agricultura e incluso las actividades domésticas generan una gran variedad de residuos (Márquez, 2002, p. 1).

En la Figura 1.2 se puede apreciar la contaminación ambiental generada como consecuencia de un mal manejo de residuos.

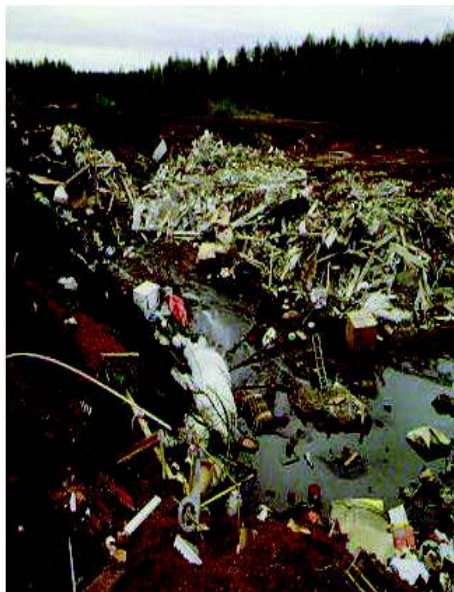


Figura 1.2. Contaminación ambiental ocasionada por un mal manejo de residuos
(Márquez, 2002, p. 1)

Se definen como desechos o residuos a las sustancias sólidas, líquidas, gaseosas o pastosas, así como también a los objetos cuya eliminación se realiza, se pretende realizar o se está obligado a efectuar de acuerdo a la legislación ambiental vigente (Ministerio de Ambiente, 2015, p. 7).

Los desechos industriales son aquellos materiales que resultan de un proceso de fabricación, transformación, uso, consumo o limpieza cuyo productor o poseedor los destina al abandono (Márquez, 2002, p. 11).

Los desechos industriales se dividen en:

a) Inertes

Son aquellos materiales que no necesitan de un tratamiento previo para su disposición en un vertedero controlado, no implican riesgos para la salud ni al medio ambiente y pueden ser utilizados como material de relleno en movimientos de tierra. Ejemplos: escombros, arcillas, arenas, etc. (Márquez, 2002, p. 12).

b) Municipales

Son aquellos producidos en las actividades auxiliares a la industria como las actividades de oficina, sanitarios, comedores etc. Su similitud a los desechos urbanos les permite ser tratados conjuntamente (Márquez, 2002, p. 12).

c) Peligrosos

Los desechos peligrosos se definen como aquellos desechos sólidos, pastosos, líquidos o gaseosos resultantes de un proceso de producción, transformación, reciclaje, utilización o consumo, que contengan algún compuesto con características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables o infecciosas, que representen un riesgo para la salud humana, los recursos naturales y el ambiente de acuerdo a las disposiciones legales vigentes en el país (Ministerio de Ambiente, 2015, p. 43).

Un desecho es corrosivo, si una muestra representativa, presenta una de las siguientes propiedades (Norma Técnica de Residuos Peligrosos y Especiales, 2014, p. 65):

- El residuo se presente como una disolución acuosa con pH Inferior o igual a 2,0, o superior o igual a 12,5, o su mezcla con agua en la proporción de 1:1 en peso, produzca una solución que tenga pH inferior a 2,0 o superior o igual a 12,5.
- Esté en estado líquido, o su mezcla con un peso equivalente de agua, produzca un líquido que corroa al acero SAE 1020, a una razón mayor a 6,35 mm al año, a una temperatura de 55 °C, de acuerdo al método NACE, Standard TM-01-693 o equivalente.

Un desecho es reactivo y explosivo, si una muestra representativa presenta una de las siguientes propiedades (Norma Técnica de Residuos Peligrosos y Especiales, 2014, p. 67):

- Se encuentre normalmente inestable y reaccione de forma violenta e inmediata, sin detonar.
- Reaccione violentamente con el agua.
- Genere gases, vapores o humos tóxicos en cantidades suficientes para provocar daños a la salud o al ambiente, cuando son mezclados con agua.
- Posea en su constitución cianuros o sulfuros, que pueda, por reacción, liberar gases, vapores o humos tóxicos en cantidades suficientes para poner en riesgo la salud humana o al ambiente.
- Produzca reacción explosiva o detonante bajo la acción de un fuerte estímulo, acción catalítica o temperatura en ambientes confinados.

Un desecho es tóxico, cuando el extracto TCLP (prueba de lixiviación) obtenido de una muestra de lixiviación de desechos, contenga cualquiera de los contaminantes en concentraciones superiores a los valores expresados en la Tabla 1.1 (Norma Técnica de Residuos Peligrosos y Especiales, 2014, p. 67).

Tabla 1.1. Límites máximos permisibles en el extracto TCLP (Prueba de Lixiviación)

No. CAS	CONTAMINANTE	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE (mg/L)
CONSTITUYENTES INORGANICOS (METALES)		
7440-38-2	Arsénico	5,0
7440-39-3	Bario	100,0
7440-43-9	Cadmio	1,0
7440-47-3	Cromo	5,0
7439-97-6	Mercurio	0,2
7440-22-4	Plata	5,0
7439-92-1	Plomo	5,0
7782-49-2	Selenio	1,0
CONSTITUYENTES ORGÁNICOS SEMIVOLÁTILES		
94-75-7	Ácido 2,4-Diclorofenoxiacético (2,4-D)	10,0

Tabla 1.1. Límites máximos permisibles en el extracto PECT (Prueba de Lixiviación)
(continuación...)

No. CAS	CONTAMINANTE	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE (mg/L)
93-72-1	Ácido 2, 4, 5- Triclorofenoxipropiónico (Silvex)	1,0
57-74-9	Clordano ⁸	0,03
95-48-7	o-Cresol	200,0
108-39-4	m-Cresol	200,0
106-44-5	p-Cresol	200,0
1319-77-3	Cresol	200,0
121-14-2	2,4-Dinitrotolueno	0,13
72-20-8	Endrin ⁸	0,02
76-44-8	Heptacloro y su epóxido	0,008
67-72-1	Hexacloroetano	3,0
58-89-9	Lindano ⁸	0,4
74-43-5	Metoxicloro	10,0
98-95-3	Nitrobenceno	2,0
87-86-5	Pentaclorofenol ⁸	100,0
8001-35-2	Toxafeno	0,5
95-95-4	2,4,5-Triclorofenol	400,0
88-06-2	2,4,6-Triclorofenol	2,0
CONSTITUYENTES ORGÁNICOS VOLÁTILES		
71-43-2	Benceno	0,5
108-90-7	Clorobenceno	100,0
67-66-3	Cloroformo	6,0
75-01-4	Cloruro de Vinilo	0,2
106-46-7	1,4-Diclorobenceno	7,5
107-06-2	1,2-Dicloroetano	0,5
75-35-4	1,1-Dicloroetileno	0,7
118-74-1	Hexaclorobenceno	0,13
87-68-3	Hexaclorobutadieno	0,5
78-93-3	Metil etil cetona	200,0
110-86-1	Piridina	5,0
127-18-4	Tetracloroetileno	0,7
56-23-5	Tetracloruro de carbono	0,5
79-01-6	Tricloroetileno	0,5
127-18-4	Tetracloroetileno	0,7

Tabla 1.1. Límites máximos permisibles en el extracto PECT (Prueba de Lixiviación)
(continuación...)

No. CAS	CONTAMINANTE	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE (mg/L)
56-23-5	Tetracloruro de carbono	0,5
79-01-6	Tricloroetileno	0,5

(Norma Oficial Mexicana, 2005, pp. 8-9)

Un desecho será considerado como inflamable una vez que una muestra representativa presente cualquiera de las siguientes propiedades (Norma Técnica de Residuos Peligrosos y Especiales, 2014, p. 67):

- Se encuentre en estado líquido y tenga punto de ignición inferior a 60 °C, determinado conforme la norma NTE INEN 1047, a excepción de las soluciones acuosas con menos de 24 % de alcohol en volumen.
- No sea líquida y sea capaz de producir fuego por fricción, absorción de humedad o por alteraciones químicas espontáneas bajo condiciones de temperatura y presión de 25 °C y 1 atm, o cuando esté inflamada, queme vigorosa y persistentemente, dificultando la extinción del fuego.
- Corresponda a un oxidante definido como una sustancia que pueda liberar oxígeno, estimular la combustión y aumentar la intensidad del fuego en otro material.

Un desecho presenta un riesgo biológico infeccioso cuando contiene patógenos en cantidad o concentración suficiente para producir enfermedades. Estos parámetros están expresados en la Tabla 1.2 (Norma Técnica de Residuos Peligrosos y Especiales, 2014, p. 65).

Tabla 1.2. Criterios microbiológicos para no catalogar a un desecho biológico como peligroso

Parámetro	Concentración máxima permitida
Coliformes fecales	2×10^6 NMP o UFC/g ST
Huevos de Helmintos	15 H/g
Salmonella sp	10^3 UFC/g

(Norma Técnica de Residuos Peligrosos y Especiales, 2014, pp. 72-73)

NMP: número más probable.
UFC: unidades formadoras de colonias.
ST: sólidos totales
H: número de huevos de Helminthos en la muestra

Aguiñaga (2012) manifiesta que las pinturas, en una forma general, son clasificadas como desechos peligrosos por su toxicidad e inflamabilidad (p. 13).

Echanique (2005) menciona también que las pinturas son consideradas como residuos peligrosos por sus características tóxicas e inflamables (p. 37).

Las pinturas no se clasifican como biológicamente infecciosas por la improbable presencia de coliformes fecales, huevos de helmintos y salmonella debido a la presencia de bactericidas y fungicidas en su composición (Aguiñaga, 2012, p. 13).

Se debe dar una disposición final adecuada a los desechos peligrosos con el propósito de disminuir su peligrosidad.

La disposición final se define como el depósito permanente de los desechos en sitios indicados bajo condiciones adecuadas para evitar el daño a la salud y al ambiente (Ministerio de Ambiente, 2015, p. 8).

Uno de los métodos de disposición final permitidos es el relleno de seguridad o confinamiento controlado. En este método se debe minimizar el ingreso de líquidos que provienen de las lluvias así como de los desechos que contengan líquidos libres con el fin de evitar la producción de percolado. En el caso de existir lixiviados, estos deberán ser analizados, tratados y finalmente dispuestos de acuerdo a la normativa vigente. (Ministerio de Ambiente, 2015, p. 8).

1.2.2 EFECTOS A LA SALUD Y AL MEDIO AMBIENTE

Los desechos peligrosos generados en las actividades productivas, entre ellos las pinturas y barnices, pueden causar daño en el medio ambiente según su concentración y el tiempo de exposición, de tal forma que causan efectos nocivos

en los sistemas bióticos y abióticos, sobre todo si tienen propiedades de alta toxicidad, de persistencia ambiental y de bioacumulación. El ambiente está expuesto a una acumulación de aquellas sustancias que persisten más ante la degradación química o biológica natural como por ejemplo los compuestos organoclorados y los metales pesados, los mismos que pueden llegar a formar parte de la cadena alimenticia (Ruiz, Fernández y Rodríguez, 2001, p. 153).

Con el fin de establecer una relación causa-efecto entre la contaminación y los efectos en la salud, se debe definir la ruta de exposición, es decir, el proceso mediante el cual un individuo se pone en contacto con los contaminantes originados en una fuente de contaminación. En la Figura 1.3 se puede observar en una forma esquemática las rutas de movilización de residuos peligrosos a partir de un sitio de disposición final sin control (Organización Panamericana de la Salud, 2006, p. 1).

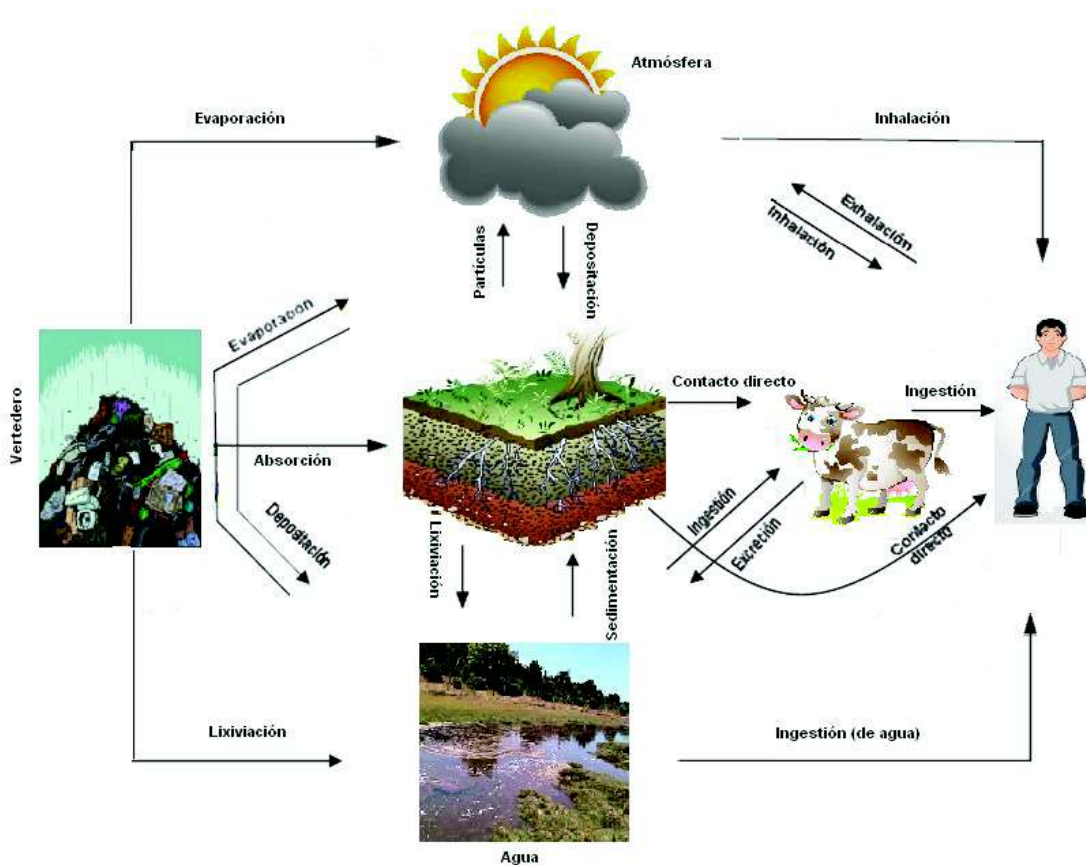


Figura 1.3. Rutas de movilización de residuos peligrosos
(Cruz, 2006, p. 9)

La ruta de exposición se compone de (Organización Panamericana de la Salud, 2006, p. 1):

a) Fuentes de contaminación

Las fuentes son aquellas que emiten el contaminante hacia el ambiente como por ejemplo los sectores industrias tales como petrolero, minero, agrícola, micro y macro industria, depósitos no controlados y contaminación natural.

b) Medios de transporte

Los medios ambientales por los que se mueven los contaminantes desde las fuente de emisión hasta los puntos de exposición humana son: el aire, agua (superficial y profunda), suelo (superficial y subsuelo), polvo y alimentos.

c) Puntos de exposición

Son aquellos sitios donde puede ocurrir u ocurre el contacto entre un individuo en exposición y un medio ambiental contaminado, por ejemplo: una residencia, un parque, un manantial, una fuente de alimentos, etc.

d) Vías de exposición

Son las vías por las que un contaminante puede establecer contacto con el organismo de un individuo como por ejemplo:

- Inhalación: aire, partículas de suelo y polvo.
- Ingesta: agua y alimentos.
- Absorción: contaminantes orgánicos en contacto con la piel.
- Radiación: todas las anteriores.

e) Población Receptora

Son todos los individuos que pueden estar o están expuestos a los contaminantes en un punto de exposición, sobre todo las mujeres, más si están en estado de gestación y los niños, además de los animales marinos y terrestres.

Cuando los residuos tóxicos entran en el ambiente, pueden ser ingeridos y retenidos en altas concentraciones por los individuos expuestos, provocando

trastornos que pueden causar la muerte. Si las concentraciones son bajas, pueden reducir su tiempo de vida, incrementar la susceptibilidad a enfermedades o provocar efectos mutagénicos y teratogénicos (Ruiz et al., 2001, p. 155).

Los problemas en la salud asociados a las sustancias contaminantes son: anomalías inmunológicas, cáncer, daño reproductivo y defectos del nacimiento, enfermedades respiratorias y del pulmón, problemas de funcionamiento hepático, neurológico y renal (Ruiz et al., 2001, p. 155). Además de los problemas de salud, la disposición no controlada de los desechos peligrosos puede provocar fugas o derrames que ocasionen accidentes con graves consecuencias ambientales como son las explosiones o incendios provocando el desequilibrio en los ecosistemas y el agotamiento de los recursos naturales (Ruiz et al., 2001, p. 155).

1.3 MÉTODOS DE TRATAMIENTO Y ELIMINACIÓN DE RESIDUOS TÓXICOS Y PELIGROSOS

El tratamiento de residuos peligrosos consiste en un proceso de transformación al que se someten los desechos para modificar sus características físicas, químicas y/o biológicas con el fin de recuperarlos, estabilizarlos, reducir su volumen o facilitar el manejo para su disposición final. Dentro de los procesos de tratamiento se encuentran los físico-químicos, biológicos, estabilización/solidificación y térmicos (Secretaría de Desarrollo Social, 2013, p. 24).

1.3.1 PROCESOS FÍSICO-QUÍMICOS

Los procesos físicos son aquellos que no cambian la estructura química del residuo sino que se encargan de separar y concentrar las sustancias peligrosas para una mejor y más segura manipulación (Loayza y Silva, 2009, p. 5).

Los procesos químicos son aquellos que modifican la estructura química de las sustancias peligrosas de los residuos y los transforman a otros componentes

menos peligrosos o contaminantes (Loayza y Silva, 2009, p. 6).

Los procesos físico-químicos modifican las propiedades físicas o químicas de un residuo con el propósito de recuperar un compuesto para su reutilización, separar los componentes peligrosos, reducir su peligrosidad y movilidad en el medio ambiente, y facilitar su manejo para una adecuada disposición final (Martínez, 2005, p. 100).

Los procesos físico-químicos utilizados para el tratamiento y eliminación de los desechos peligrosos son: arrastre con aire o vapor, adsorción en carbón, oxidación química, fluidos supercríticos, procesos de membrana (LaGrega et al., 2001, pp. 463-551).

1.3.2 MÉTODOS BIOLÓGICOS

Los métodos biológicos consisten en la descomposición de los contaminantes por acción de un conjunto de microorganismos que transforman las moléculas complejas de los residuos en especies químicas más simples (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2007, p. 106).

Este tipo de tratamientos se aplican a residuos que contienen materia orgánica o en aquellos en donde se ha comprobado que los microorganismos pueden descomponer moléculas químicas complejas. La descomposición de los contaminantes depende de la capacidad de adaptación que tengan los microorganismos, ya sean cepas nativas o cepas seleccionadas y aclimatadas (Loayza y Silva, 2009, p. 5). Cabe mencionar que estos métodos son sensibles a la alta concentración de tóxicos presentes, a la temperatura, al pH y a la humedad, es por esto que se debe acondicionar el medio para el correcto desempeño de los microorganismos (Martínez, 2005, p. 103).

Estos métodos son recomendables para la eliminación de sustancias químicas tóxicas como los fenoles, para la biorremediación de suelos contaminados con

hidrocarburos y sus derivados, y para el tratamiento de efluentes líquidos (Loayza y Silva, 2009, p. 6).

Los tratamientos biológicos utilizados para el tratamiento y eliminación de los desechos peligrosos son: tratamiento convencional en fase líquida (reactores de biomasa), biorrecuperación in situ, tratamiento en fase de lechada (reactores de lecho fijo), tratamiento en fase sólida (sobre el terreno, compostaje, amontonamiento) (LaGrega et al., 2001, pp. 553-672).

1.3.3 ESTABILIZACIÓN Y SOLIDIFICACIÓN

La estabilización y solidificación son parte de un método de gestión de residuos peligrosos que ha sido empleado en el tratamiento de residuos procedentes de otros procesos de eliminación (por ejemplo, cenizas de la incineración) y en el tratamiento de terrenos contaminados (LaGrega et al., 2001, p. 677).

La estabilización es el proceso en el que se mezclan aditivos con el fin de reducir la naturaleza peligrosa de los residuos al transformarlos en un bloque, con lo que se mejora el manejo y las características físicas del residuo, se limita la solubilidad de los contaminantes presentes en él, se minimiza la velocidad de migración de los contaminantes al medio ambiente y por ende se disminuye su nivel de toxicidad (LaGrega et al., 2001, p. 678).

Con la estabilización se reduce el riesgo de un residuo peligroso ya que sus contaminantes son convertidos en sus formas menos solubles, móviles o tóxicas mediante reacciones químicas que fijan los compuestos tóxicos en matrices impermeables y estables. Cabe mencionar que, la naturaleza física del residuo o sus características de manejo no cambian necesariamente con este proceso (Martínez, 2005, p. 101).

La solidificación se define como el proceso en el que se mezclan los residuos con material solidificante para generar una masa solidificada con el fin de aumentar la

resistencia y disminuir la compresibilidad y la permeabilidad del material peligroso (LaGrega et al., 2001, p. 678).

Este proceso no necesariamente implica una interacción química entre los residuos y los materiales solidificantes, pero pueden ligarse mecánicamente a la matriz solidificada. En la matriz, la superficie expuesta a lixiviación disminuye debido a que los residuos son aislados dentro de una cápsula impermeable, esto disminuye su poder contaminante (Martínez, 2005, p. 101). La lixiviación es el proceso en el que los contaminantes se transfieren desde una matriz estabilizada/solidificada hacia un medio líquido como el agua (Romero y Vargas, 2009, p. 81).

Por lo tanto, la estabilización y solidificación comprenden tanto la reducción de la toxicidad y lixiviación de los residuos así como la mejora de las propiedades técnicas de resistencia, compresibilidad y/o permeabilidad del material estabilizado (LaGrega et al., 2001, p. 678).

La estabilización/solidificación se aplica preferentemente a residuos sólidos o pastosos, aunque los desechos acuosos pueden ser tratados como agentes hidratantes en el fraguado de los materiales solidificantes (cemento). Este método se utiliza para la gestión de residuos inorgánicos como por ejemplo escorias de acería, lodos provenientes de limpieza, reactivos de laboratorio, productos caducados, etc. Los desechos orgánicos también pueden ser tratados pero en presencia de residuos inorgánicos, así por ejemplo lodos de tintas y pintura, productos farmacéuticos, medicamentos, productos veterinarios, etc. (Pérez, 2011, p. 43).

1.3.3.1 Mecanismos de estabilización/solidificación

a) Macroencapsulación

Es el proceso mediante el cual los constituyentes de los residuos peligrosos quedan atrapados físicamente en los poros discontinuos de una matriz compuesta por el material estabilizante. Si la matriz se descompone en partículas de gran tamaño, los componentes atrapados se liberan y migran hacia el medio ambiente

(LaGrega et al., 2001, p. 684; Pérez, 2011, p. 51, Chattopadhyay y Condit, 2002, pp. 1-3).

En la Figura 1.4 se pueden observar los nódulos oscuros de un residuo aceitoso encapsulado en el interior de una matriz grisácea de cenizas volantes, cal y cemento aglomerante. Parte del residuo se estabiliza por macroencapsulación, pero como sólo está ligado a la matriz por enlaces físicos, si ésta se llega a romper, el residuo quedaría libre para migrar al medio ambiente. Entiéndase como cenizas volantes a los materiales que se obtienen por precipitación electrostática o mecánica del polvo suspendido en los gases de la combustión del carbón (Caballero y Médico, 2013, p. 1).

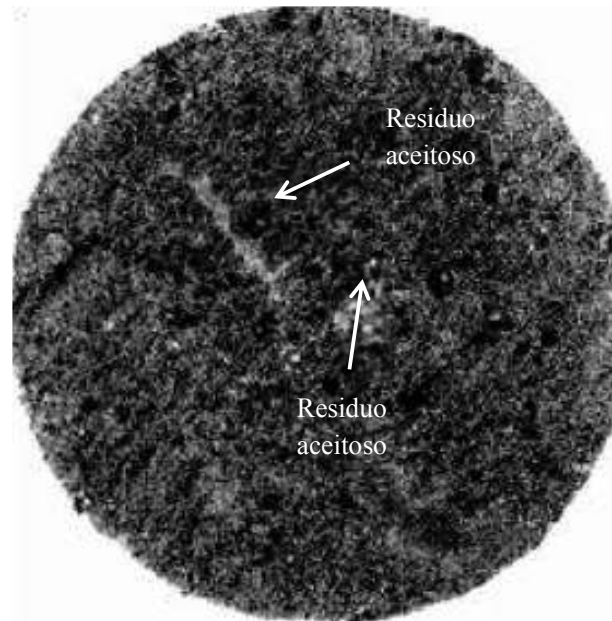


Figura 1.4. Residuo aceitoso encapsulado en matriz aglomerante
(LaGrega et al., 2001, p. 685)

b) Microencapsulación

En la microencapsulación los componentes de los materiales peligrosos quedan atrapados en el interior de la estructura cristalina de la matriz solidificada a nivel microscópico. Es por esto que, si la matriz se descompone en partículas relativamente pequeñas, la mayor parte del residuo peligroso queda atrapado, pero como la microencapsulación se trata también de una interacción física y no química, el material puede quedar libre si las partículas son de menor

tamaño (LaGrega et al., 2001, p. 684; Pérez, 2011, p. 52, Chattopadhyay y Condit, 2002, pp. 1-3).

La Figura 1.5 corresponde a una fotografía tomada con un microscopio electrónico de barrido, en ella se muestra la microencapsulación de cadmio (Cd) en una matriz de cemento una vez que la mezcla homogénea conformada por el encapsulante y el residuo se ha solidificado.

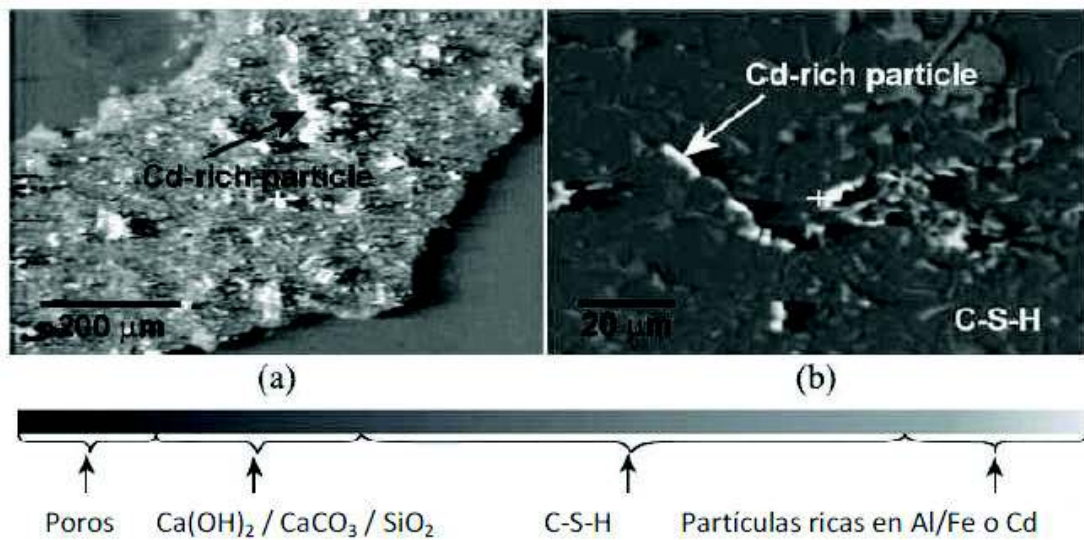


Figura 1.5. Microencapsulación de Cd en matriz de cemento. a) baja y b) alta magnificación

(Halim, Amala, Beydouna, Scotta y Low, 2004, p. 1097)

c) Absorción

El absorbente utilizado absorbe los componentes peligrosos de la misma manera como una esponja toma el agua. Es utilizada como un método temporal para mejorar las características de manejo de los residuos líquidos ya que los componentes pueden escurrir si la masa es sometida a tensiones. Los absorbentes más utilizados son: suelo, cenizas volantes, polvos de horno de cemento, polvos de hornos de cal, aserrín, heno y paja (LaGrega et al., 2001, p. 685; Pérez, 2011, p. 53)

d) Adsorción

La adsorción es el proceso mediante el cual los contaminantes, además de interactuar físicamente con los componentes de la matriz estabilizante, interactúan

químicamente mediante enlaces, los mismos que pueden ser fuerzas de Van der Waals o puente de hidrógeno. De esta manera, se disminuye la probabilidad de migración de los contaminantes en el caso de descomposición de la matriz (LaGrega et al., 2001, p. 685; Pérez, 2011, p. 54).

Las arcillas modificadas son ampliamente utilizadas en este mecanismo. La modificación se basa en reemplazar los cationes inorgánicos adsorbidos a su superficie por cationes orgánicos de cadenas largas para activar su carácter organofílico. Las arcillas organofílicas presentan afinidad con las moléculas orgánicas (LaGrega et al., 2001, p. 685).

En la Figura 1.6 se puede observar una representación de este mecanismo.

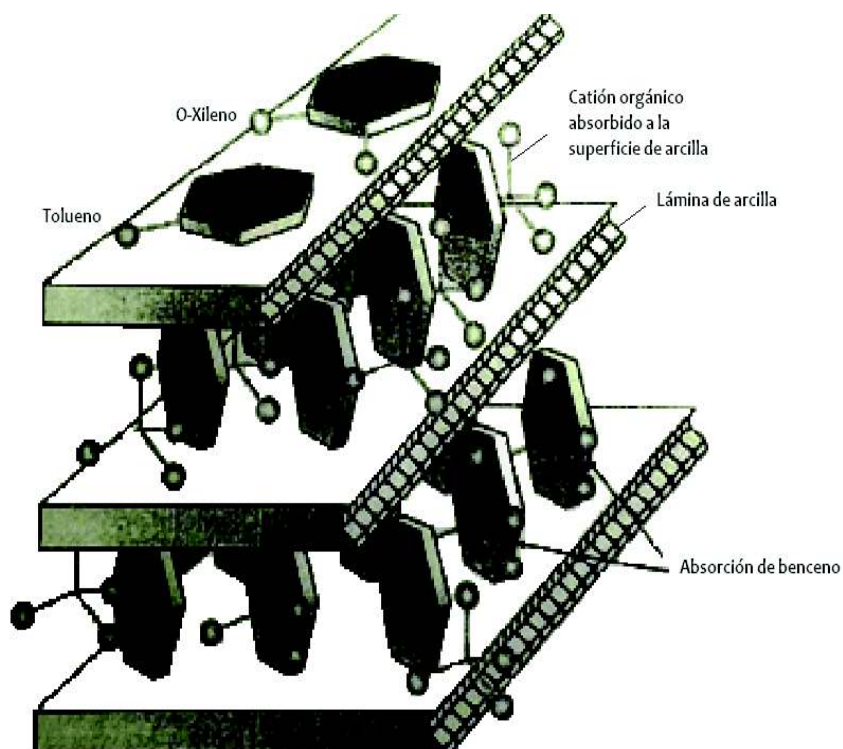


Figura 1.6. Residuo orgánico adsorbido a una arcilla organofílica
(LaGrega et al., 2001, p. 686)

e) Precipitación

La precipitación consiste en hacer reaccionar los componentes contaminantes con agentes que causen compuestos precipitados, los mismos que quedarán estables

y formarán parte de la matriz estabilizada. Los precipitados en general son hidróxidos, sulfuros, silicatos, carbonatos y fosfatos. Este mecanismo se aplica para la estabilización de residuos inorgánicos como por ejemplo los lodos que contienen metales pesados (LaGrega et al., 2001, p. 686; Pérez, 2011, p. 55; Hale, Evans y Lambert, 2011, p. 124)

En el presente proyecto este mecanismo también tiene participación debido al uso de carbonato de calcio dentro de la formulación.

f) Detoxificación

Se denomina así a cualquier mecanismo mediante el cual se reduce la toxicidad de un componente peligroso. Así por ejemplo, al cromo hexavalente se lo reduce a cromo trivalente mediante el empleo de sulfatos (ferroso y sódico) disminuyendo así su solubilidad y toxicidad durante la solidificación con materiales tipo cemento (LaGrega et al., 2001, p. 687; Pérez, 2011, p. 56).

1.3.3.2 Tecnología de estabilización/solidificación

La tecnología se detalla mediante la descripción de los reactivos utilizados en la estabilización y solidificación, los mismos que pueden ser usados en forma individual o en combinación con otros para obtener mejores resultados en el proceso. La aplicación de uno de estos reactivos o su combinación depende básicamente de la concentración y del tipo de contaminantes y el efecto sinérgico que se produzca entre ellos, así por ejemplo, una mezcla de cemento, carbonato de calcio (CaCO_3) y cenizas volantes son compatibles para estabilizar/solidificar desechos con alto contenido de metales pesado y de compuestos orgánicos volátiles, los primeros por acción del cemento y del carbonato, y los segundos por acción de las cenizas, además todos juntos proporcionan a la mezcla una alta resistencia a la compresión que evita el rompimiento de la matriz solidificada y consecuentemente la migración de los contaminantes al ambiente (LaGrega et al., 2001, p. 687).

Son varios los reactivos que pueden ser utilizados en un proceso de estabilización y solidificación como por ejemplo: cemento, puzolanas, cal, cal modificada, silicatos

solubles, polímeros orgánicos termoestables, materiales termoplásticos, etc. (LaGrega et al., 2001, p. 687). A continuación se describen los reactivos que serán empleados en el presente proyecto de titulación:

a) Cemento

El cemento, además de ser empleado en la industria de la construcción, es considerado el principal agente de estabilización/solidificación gracias a su disponibilidad, bajo costo, consistencia dura, baja permeabilidad y relativa durabilidad. El cemento portland es el material comúnmente empleado en los procesos de estabilización de los residuos peligrosos ya que reduce la permeabilidad, solubilidad y toxicidad del material solidificado. Su composición característica se presenta en Tabla 1.3 (Chen, Tyrer, Hills, Yang, Carey, 2008, p. 391; Wilk, 2008, p. 3-4).

Tabla 1.3. Composición química del cemento Portland

Compuesto	(% w/w)
Óxido de calcio (CaO)	61,0 - 67,0
Óxido de silicio (SiO ₂)	17,0 - 24,0
Óxido de aluminio (Al ₂ O ₃)	3,0 - 8,0
Óxido férrico (Fe ₂ O ₃)	1,0 - 6,0
Óxido de magnesio (MgO)	0,1 - 4,0
Óxido de sodio o potasio (Na ₂ O o K ₂ O)	0,5 - 1,5
Óxido de azufre (SO ₃)	1,0 - 3,0

(Yilmaz, Çorça y Ünlü, 2003, p. 201)

El cemento Portland se obtiene por una mezcla de caliza y arcilla en un horno a alta temperatura. El horno produce una escoria denominada clínquer que se muele para obtener un polvo constituido por la mezcla de los óxidos descrita en la Tabla 1.3. Cuando el cemento se hidrata, se genera una estructura cristalina de aluminosilicato cálcico que da lugar a una masa dura de aspecto rocoso (LaGrega et al., 2001, p. 689; Yilmaz, Çorça y Ünlü et al., 2001, p. 201-202).

La hidratación del cemento se puede representar mediante las reacciones que se muestran en la Figura 1.7.

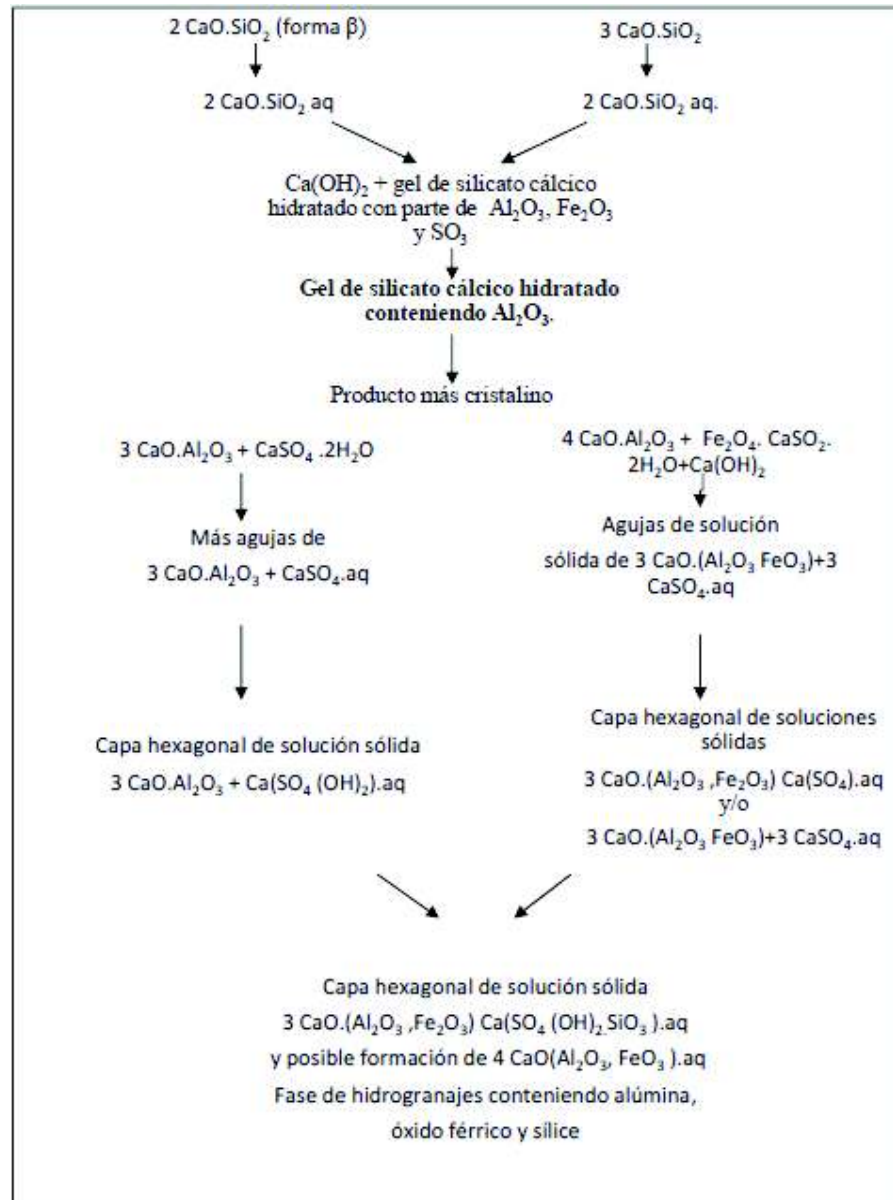


Figura 1.7. Reacciones de hidratación del cemento Portland
(LaGrega et al., 2001, p. 690)

En la Figura 1.8 se observa una representación gráfica que describe el fraguado del cemento. El gel silicato cálcico es un producto intermedio del fraguado que tiene relación con la fijación de metales pesados y es el responsable de la consistencia del material. Es una mezcla de hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) y silicatos pobremente cristalizados. Su naturaleza microporosa incrementa el área superficial y controla los procesos de adsorción de los metales mediante la teoría de la triple capa electrostática, la cual consiste en que los iones Ca^{++} que participan en la hidratación inicial, forman una bicapa con la superficie del compuesto que

está cargado negativamente, entonces los cationes de los metales pesados como el cobre (Cu), zinc (Zn), níquel (Ni), cadmio (Cd) y plomo (Pb) se orientan a esa bicapa y forman una tricapa mediante la cual quedan fijados químicamente a la matriz (Wilk, 2008, p. 5; Chen et al., 2008, pp. 394-395).

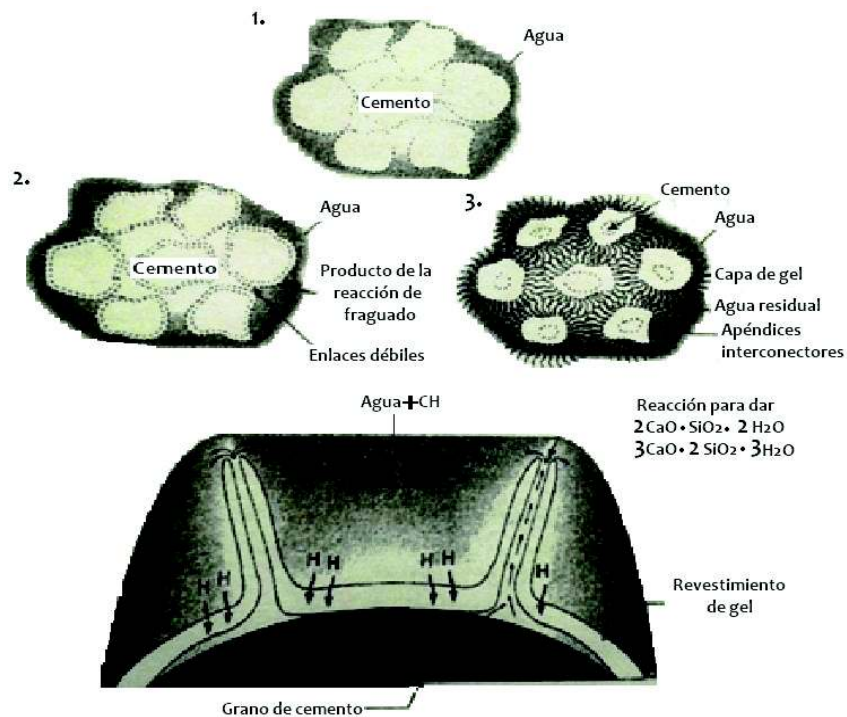


Figura 1.8. Representación esquemática del fraguado del cemento
(LaGrega et al., 2001, p. 691)

El cemento es funcional para la estabilización de desechos inorgánicos sobre todo aquellos que contienen metales pesados. El elevado pH del cemento hace que los metales queden retenidos en la matriz endurecida como hidróxidos insolubles o carbonatos. Estudios demuestran que el plomo, cromo, zinc, estaño y cadmio quedan retenidos en la matriz al formar compuestos insolubles, mientras que el mercurio lo hace por microencapsulación física (LaGrega et al., 2001, p. 689).

Los contaminantes orgánicos son difíciles de estabilizar con cemento ya que estos producen interferencias en el proceso de hidratación, reducen la resistencia final y reducen la formación de una estructura cristalina al originar un material más amorfo. Para disminuir las interferencias, es recomendable usar otros aditivos además de cemento como por ejemplo arcillas naturales o modificadas, vermiculita

(silicatos de hierro o magnesio) y silicatos de sodio solubles (LaGrega et al., 2001, p. 689).

Cuando se va a estabilizar/solidificar a un residuo, es necesario conocer su efecto sobre los componentes de la mezcla solidificante, es por eso que se debe encontrar una formulación que permita obtener una mezcla que brinde una resistencia a la compresión adecuada para su posterior utilización, además de asegurar una disminución en la peligrosidad del residuo. Así por ejemplo, Casseres, Mesa y Hernández (2008) en su estudio de tratamiento de los lodos generados en los procesos de recubrimientos metálicos, encontraron que una relación agua/cemento menor de 0,45 disminuye la manejabilidad de la mezcla solidificada, mientras que con una relación superior a 0,50 resulta una mezcla más manejable pero fluida, lo que disminuye su resistencia y posterior utilidad. Además, trabajar dentro de este rango, permite una retención del 99% de metales como el cobre (Cu), níquel (Ni) y zinc (Zn), garantizando que la mezcla sólida puede ser colocada en una celda de confinamiento sin riesgo de contaminación al medio ambiente (p. 172).

En el presente proyecto se experimentarán las relaciones de agua de fraguado/cemento de 0,45 y 0,50 (Casseres, Mesa y Hernández, 2008, p. 172) pero se considerarán a los desechos de pintura como agua de fraguado ya que estos representan la fase líquida de las mezclas, si se llegara añadir más agua, las mezclas no llegarían a solidificarse.

b) Cenizas volantes

Las cenizas volantes junto con las escorias de incineración y los polvos de hornos de cemento constituyen los denominados materiales puzolánicos. Las puzolanas son materiales aluminosilíceos que reaccionan con la cal y el agua para dar lugar a un material de cementación denominado hormigón puzolánico. La composición de las cenizas volantes es 45 % sílice (SiO_2), 25 % óxido de aluminio (Al_2O_3), 15 % óxido férrico (Fe_2O_3), 10 % óxido de calcio (CaO), 1 % óxido de magnesio (MgO), 1% óxido de potasio (K_2O), 1 % óxido de sodio (Na_2O) y 1 % trióxido de azufre (SO_3). Las cenizas son recomendables para la estabilización y solidificación de residuos inorgánicos que contienen metales pesados, pero el carbón no calcinado

puede adsorber compuestos orgánicos del residuo, por lo que las cenizas pueden ser utilizadas para el tratamiento de los dos tipos de residuos (LaGrega et al., 2001, pp. 691-692).

Romero y Vargas (2009) afirman que el uso de cenizas en un proceso de estabilización/solidificación aumenta la resistencia mecánica de la mezcla y brinda una mayor capacidad de inmovilización en comparación con una mezcla en la que solo se utilizó carbonato de calcio (p. 89).

Se conoce que Burgos, Angulo y Mejía (2001), en su estudio de durabilidad de morteros, encontraron que con una relación ceniza/cemento del 10 % se obtiene una buena resistencia a la compresión (p. 62). Por esto, se experimentará esta relación en el presente proyecto de titulación.

c) Carbonato de calcio

El carbonato de calcio es el principal componente de la piedra caliza (obtenida en canteras), cuya composición depende de la pureza del yacimiento. Se pueden encontrar calizas compuestas por un 98 % de carbonato de calcio con pequeñas cantidades de carbonato de magnesio ($MgCO_3$), óxido férrico (Fe_2O_3), sílice (SiO_2), carbonato ferroso ($FeCO_3$) y arcilla (Alanís y Covarrubias, 2009, p. 23). Se utiliza como carga de pinturas, papel, plásticos, cauchos, resinas, balanceados, etc. (Alanís y Covarrubias, 2009, p. 19).

Es un mineral que puede ser procesado a varios niveles de pureza con el fin de obtener una atractiva blancura y brillo, baja dureza y propiedades reactivas. Puede ser aplicado en el control ambiental de sistemas de tratamiento de agua, en lavado de gases de chimenea y en aquellos procesos de fabricación cuyos subproductos requieran ser neutralizados (Alanís y Covarrubias, 2009, p. 2). Es recomendable para la estabilización de metales pesados ya que interacciona con los residuos peligrosos bajo el mecanismo de precipitación, el mismo que consiste en convertir los compuestos solubles en precipitados carbonatados insolubles que se adhieren a una matriz sólida de cemento (Sandoval y Jauregui, 2002, p. 4). También puede utilizarse junto con otros materiales de estabilización como las cenizas volantes para subir el pH de lodos ácidos (LaGrega et al., 2001, p. 693).

Este componente se utiliza en el proceso de estabilización/solidificación ya que reduce el pH inicial del cemento fraguado, de 13,5 a valores menores de 12,5, con esto se disminuye la lixiviación de los metales pesados (Romero y Vargas, 2009, p. 84).

La mezcla con cemento brinda un incremento aceptable en la resistencia mecánica pero es mucho mejor si en la mezcla se incluye cenizas volantes (Romero y Vargas, 2009, p. 89).

Anfacal (2012) recomienda una concentración entre el 20 y 30 % de carbonato de calcio para obtener una fuerza aceptable en el producto estabilizado (p. 1). Por esto, se probarán las relaciones cal/cemento del 20 % y del 30 % en el presente proyecto de titulación.

1.3.4 MÉTODOS TÉRMICOS

Los métodos térmicos son aquellos que involucran una reacción química a altas temperaturas como mecanismo de destrucción de los residuos peligrosos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2007, p. 106).

El método térmico más utilizado para la disposición final de los residuos peligrosos es la incineración, la misma que es definida como un proceso en el que se reduce en peso y volumen a los residuos mediante la combustión controlada en presencia de oxígeno (Organización Panamericana de la Salud, 2007, p. 89).

La incineración reduce el volumen de los residuos y su amenaza al ambiente ya que la combustión que se produce destruye los componentes orgánicos combustibles presentes en ellos, convirtiéndolos en dióxido de carbono (CO_2) y vapor de agua (H_2O). Sin embargo, este método presenta varios aspectos negativos que cuestionan su efectividad. Los compuestos inorgánicos no combustibles, como por ejemplo los metales pesados, no pueden ser destruidos. Se generan también otros compuestos producto de una combustión incompleta: monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x),

dioxinas y furanos, compuestos clorados, hidrocarburos policíclicos, entre otros, los mismos que tienen que ser monitoreados y controlados para evitar la contaminación del ambiente. Adicionalmente, las cenizas que quedan como producto de la reducción del volumen de los residuos requieren una disposición final adecuada (LaGrega et al., 2001, p. 741).

Los incineradores utilizados para el tratamiento de los residuos peligrosos son: incineradores de gases y vapores (chimeneas y quemadores), Incineradores de residuos líquidos (hornos o quemadores con boquillas atomizadoras), incineradores de residuos sólidos (parrillas, hornos, lecho fluidizado) (LaGrega et al., 2001, pp. 759-776).

Cabe considerar que existen otras tecnologías térmicas que están en desarrollo, que son alternativas a la incineración para el tratamiento de los residuos peligrosos y que deberían ser utilizadas según la disponibilidad en el mercado. Estas tecnologías son: co-procesamiento, pirólisis, gasificación, arco de plasma, oxidación en sal fundida (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2007, p. 110; Martínez, 2005, pp. 106-107).

1.3.5 CELDA DE CONFINAMIENTO

La celda de confinamiento se define como un sistema diseñado y construido para dar una disposición final adecuada a los residuos desechados de tal forma que se minimice la liberación de contaminantes al medio ambiente. Esta es una buena alternativa frente a otros métodos como por ejemplo la incineración o los tratamientos biológicos en donde se generan más residuos (LaGrega, et al., 2001, p. 812). El diseño de una celda de este tipo forma parte del presente proyecto de titulación para dar una disposición final adecuada a la mezcla de desechos de pintura.

El diseño de la celda está acompañada por un sistema de sellado y de recolección de lixiviados. El propósito de estos sistemas es actuar como una barrera filtrante que minimice la migración de los contaminantes del residuo. La recolección es

necesaria ya que inevitablemente se va a genera algún tipo de migración con el paso de los lixiviados, los mismos que son recogidos en una piscina diseñada para este fin (LaGrega, et al., 2001, p. 812).

Los sistemas de sellado pueden tener varias configuraciones, por lo general están compuestos por varias capas: a) geomembranas o geosintéticos que cumplen funciones impermeables, b) bentonita y zeolita utilizados para retener los compuestos orgánicos del lixiviado, c) arcillas modificadas orgánicamente y cenizas volantes con alto contenido de carbono ya que son adecuadas para los compuesto orgánicos del lixiviado. Entre estas capas se colocan las tuberías que desembocan en una piscina para la recolección del material que haya filtrado a través del sello (LaGrega, et al., 2001, p. 824).

En la Figura 1.9 se expone un ejemplo de un sistema de sellado y recolección de lixiviados para una instalación de disposición final de residuos peligrosos.

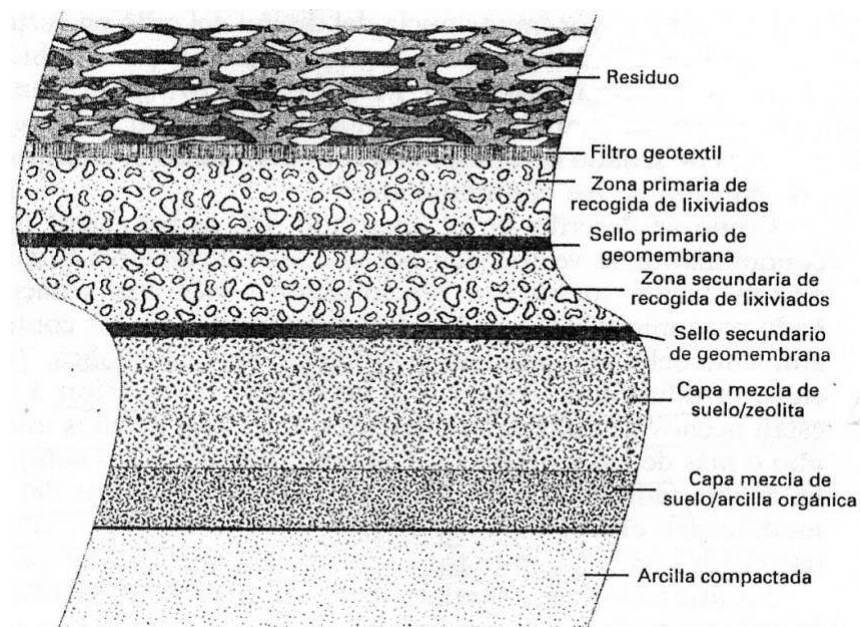


Figura 1.9. Sistema de sellado y recolección de lixiviados
(LaGrega et al., 2001, p. 824)

Existen varios criterios para que los desechos sean depositados en celdas de confinamientos, entre ellos están los criterios de ordenamiento y elegibilidad, los mismos que se presentan en la Tabla 1.4.

Tabla 1.4. Criterios de ordenamiento y elegibilidad para que un desechos pueda ser depositado en una celda de confinamiento

Parámetro	Valor
Resistencia contra arado o cortado	25,0 kPa
Resistencia contra deforma axial	20,0 %
Resistencia a la compresión	50,0 kPa
Contenido de cenizas del material secado	10,0 %
Sustancias extraíbles	4,0 %
Valor de pH	4,0 – 13,0
Conductividad eléctrica	< 100 000,0 μ S/cm
Carbón orgánico total	< 200,0 mg/L
Fenoles	< 100,0 mg/L
Arsénico	< 1,0 mg/L
Plomo	< 2,0 mg/L
Cadmio	< 0,5 mg/L
Cromo (VI)	< 0,5 mg/L
Cobre	< 10,0 mg/L
Níquel	< 2,0 mg/L
Mercurio	< 0,1 mg/L
Zinc	< 10,0 mg/L
Fluoruros	< 50,0 mg/L
Amonio	< 1 000,0 mg/L
Cloruros	< 10 000,0 mg/L
Cianuros	< 1,0 mg/L
Sulfatos	< 5 000,0 mg/L
Nitritos	< 30,0 mg/L
Compuestos orgánicos halogenados	< 3,0 mg/L
Fracción soluble en agua	< 10,0 %

(Ruiz, 2003, p. 17)

En el presente proyecto de titulación se pretende disponer en la celda los desechos de pintura estabilizados/solidificados, es por esto que los sólidos serán evaluados sobre la base de los criterios de toxicidad manifestados en la Norma NOM-052-2005 y en la Ordenanza 404 de Distrito Metropolitano de Quito con respecto a los metales y los compuestos orgánicos volátiles para considerar a un desecho como peligrosos con el fin de investigar si el proceso de estabilización/solidificación de

las pinturas es efectivo para reducir la peligrosidad de las mismas (Norma Oficial Mexicana, 2005, p. 14-15; Norma Técnica de Residuos Peligrosos y Especiales, 2014, p. 67).

Adicionalmente, los sólidos serán evaluados bajo los criterios de ordenamiento y elegibilidad correspondientes a la humedad, pH, Conductividad y resistencia a la compresión por las razones que se mencionan a continuación:

La humedad será un indicativo de la reacción que se llevará a cabo entre el cemento y la mezcla de desechos de pintura (fraguado) y por ende será una propiedad que esté relacionada con la dureza que adquiera el producto solidificado. Se presume que las propiedades serán diferentes en comparación cuando el cemento es fraguado con agua (Hirschi, Knauber, Lanz, Schlumpf, Schrabback, Spiring y Waeber, 2010, p. 17).

El pH y la conductividad serán indicativos de un efectivo proceso de estabilización/solidificación ya que se conoce que a pH alcalinos se favorece la formación de compuestos insolubles que se quedan atrapados en la matriz solidificada y no pasan a formar parte del lixiviado, el mismo que carecerá de iones que reflejen conductividad (Sandoval y Jauregui, 2002, p. 4; Romero y Vargas, 2009, p. 84).

La obtención de un valor más alto de resistencia a la compresión que el recomendado por Ruiz (2003) asegurará que los productos sólidos no sufran desgaste o rompimiento para evitar la migración de contaminantes al ambiente (p.17) (Martínez, 2005, p. 101; LaGrega et al., 2001, p. 678).

Además de los criterios mencionados hasta el momento para que Incinerox obtenga un proceso de disposición final adecuado de los desechos de pintura para minimizar el riesgo de migración de contaminantes al medio ambiente, la empresa debe tomar en consideración los requisitos legales manifestados en el título V, sección V del libro VI del Texto Unificado de Legislación Medio Ambiental, TULMAS, referente al reglamento para la disposición final de los desechos

peligrosos. Este reglamento se resumen a continuación (TULMAS, 2003, pp. 81-107):

- El método de confinamiento controlado es un método permitido por el Ministerio del Ambiente, MAE.
- Deberá tener la licencia ambiental otorgada por el MAE o por la delegación seccional autorizada. Deberá presentar un estudio de impacto ambiental para su solicitud.
- El ingreso de líquidos deberá ser minimizado para evitar la generación de percolado.
- La construcción de las celdas de confinamiento deberán cumplir con requisitos técnicos.
- En el caso de existir lixiviados, estos deberán ser analizados, tratados y finalmente dispuestos. Las aguas subterráneas deberán ser monitoreadas cada seis meses para evaluar presencia de lixiviados.
- Una vez terminada la vida útil de la celda, el sitio deberá ser monitoreado durante 30 años y su uso será restringido y el área debidamente señalada.
- Está prohibido el vertido de los desechos peligrosos en sitios no autorizados por el MAE. También se prohíbe la mezcla de desechos peligrosos con no peligrosos para fines de dilución.
- Se deberá contar con un plan de contingencia en caso de accidentes, el mismo que tendrá que ser actualizado y aprobado por el MAE.
- Deberá tener una póliza de seguros que cubra accidentes y daños contra terceros.
- El MAE o cualquier otra autoridad seccional competente podrá realizar inspecciones cuando crea necesario.
- Para la ampliación o extensión de los procesos de disposición final, deberá ser notificado al MAE para su respectiva aprobación.
- Los empleados encargados del manejo de desechos peligrosos deberán tener entrenamiento necesario y contar con el equipo apropiado con el fin de garantizar salud.
- La planta de tratamiento deberá estar al menos a 500 m del poblado más cercano y contar con una franja de amortiguamiento alrededor de la planta de por lo menos 100 m.

- Los desechos peligrosos deberán ser recibidos únicamente con el manifiesto, es decir, el documento oficial con el que la autoridad ambiental y el generador del residuo mantienen un estricto control sobre el transporte y destino de los desechos peligrosos producidos dentro del territorio nacional

Incinerox deberá cumplir con todos los requisitos técnicos y legales para poder implementar el presente proyecto.

2 PARTE EXPERIMENTAL

2.1 CARACTERIZACIÓN DE LA MEZCLA DE LOS DESECHOS DE PINTURA.

2.1.1 MUESTREO DE LA MEZCLA DE DESECHOS DE PINTURA

Para caracterizar a la mezcla de desechos de pintura comprendida por pinturas a base de agua, pinturas a base de solventes, pinturas y barnices residuales caducados, se los mezcló en un mixer con capacidad de 3,5 m³ y se recolectó aproximadamente 60 litros de muestra destinados a la caracterización y al desarrollo de la experimentación del presente proyecto. De los 60 litros se recolectaron 3 muestras de 1 litro y a cada una de ellas se les caracterizó al determinar la densidad, CRETIB: corrosividad, reactividad, explosividad, e inflamabilidad (Norma Técnica de Residuos Peligrosos y Especiales, 2014, pp. 65-67). El análisis de toxicidad no se realizó a las 3 muestras sino a una muestra compuesta de ellas debido a que la concentración de los componentes es la misma en toda la mezcla. No se determinó el parámetro biológico infeccioso de la mezcla debido a la improbable presencia de coliformes fecales, huevos de helmintos y salmonella (Aguñaga, 2012, p. 13; Echanique, 2005, p. 37). Cabe mencionar que la caracterización de las 3 muestras servirá para garantizar reproducibilidad de resultados.

2.1.2 DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD

La densidad de la mezcla de desechos de pintura se determinó mediante el método del picnómetro cuyo procedimiento se expone en la sección A1.1 del Anexo I (Duarte, 2005, pp. 7-9).

Primero, se calculó el volumen del picnómetro mediante la Ecuación 2.1 y después, se determinó la densidad de la muestra de pintura mediante la Ecuación 2.2 (Duarte, 2005, pp. 7-9):

$$V_{\text{picnómetro}} = \frac{P_{\text{agua}} - P_{\text{inicial}}}{\varphi_{\text{agua}}} \quad [2.1]$$

Donde:

- $V_{\text{picnómetro}}$: volumen del picnómetro (mL)
 P_{agua} : peso del picnómetro lleno de agua (g)
 P_{inicial} : peso del picnómetro vacío, limpio y seco (g)
 φ_{agua} : densidad del agua a 20°C (g/cm³)

$$\varphi_{\text{muestra}} = \frac{P_{\text{pintura}} - P_{\text{inicial}}}{V_{\text{picnómetro}}} \quad [2.2]$$

Donde:

- φ_{muestra} : Densidad de la muestra (g/mL)
 P_{pintura} : Peso del picnómetro lleno de pintura (g)
 P_{inicial} : Peso del picnómetro vacío, limpio y seco (g)
 $V_{\text{picnómetro}}$: Volumen del picnómetro (mL)

2.1.3 DETERMINACIÓN DE LA CORROSIVIDAD

Para determinar la corrosividad de la mezcla de los desechos de pintura se midió el pH y la corrosión a la lámina de acero.

2.1.3.1 Determinación del pH

Para medir el pH se realizó el procedimiento descrito en la Norma EPA 9045D, el mismo que se resume a continuación (EPA, 2004a, p. 2):

Se pesaron 20 g de muestra en un vaso de precipitación de 50 mL en una balanza con capacidad de 810,00 g y 0,01 g de precisión, después se añadieron 20 mL de agua destilada para luego agitar las muestras durante 5 minutos a 800 rpm en un agitador magnético, por último se midió el pH con un pHmetro.

2.1.1.2 Determinación de la corrosión a la lámina de acero

La corrosividad de la mezcla de los desechos de pintura fue determinada mediante el uso de un equipo adaptado cuyo esquema se presenta en la Figura Al.1 del Anexo I. Se empleó una rodela circular de acero SAE 1020 de 3,75 cm de diámetro, 0,32 cm de espesor y 0,80 cm de diámetro del círculo interior. El procedimiento que se realizó se basó en la Norma EPA 1110A y se describe en la sección Al.3 del Anexo I (EPA, 2004b, pp. 2-3). Se determinó el área de superficie total de la rodela mediante la Ecuación 2.3 (EPA, 2004b, p. 2). La velocidad de corrosión fue determinada mediante la Ecuación 2.4 (EPA, 2004b, p. 4):

$$A = \frac{3,14 (D^2 - d^2)}{2} - (t * 3,14 * D) - (t * 3,14 * d) \quad [2.3]$$

Donde:

D : diámetro externo de la rodela (cm)

d : diámetro interno de la rodela (cm)

t : espesor (cm)

$$\text{velocidad de corrosión (mmpy)} = \frac{W_p * 87,60}{A * t * \varphi_{metal}} \quad [2.4]$$

Donde:

W_p : peso perdido (mg)

A : superficie total de la rodela (cm²)

t : tiempo (horas)

φ_{metal} : densidad del metal acero SAE 1020, 7,86 g/cm³ (EPA, 2004b, p. 4)

2.1.4 DETERMINACIÓN DE LA REACTIVIDAD Y EXPLOSIVIDAD

La reactividad y la explosividad de la mezcla de los desechos de pintura fueron determinados sobre la base de los criterios descritos en la Norma NOM-052-SEMARNAT-1993 debido a que en esta Normativa se encuentran más

explícitos dichos criterios (Norma Oficial Mexicana, 1993a, pp. 11-12).

El procedimiento se resume en la sección A1.3 del Anexo I, el mismo que consistió en poner en contacto a la mezcla de pinturas con agua, con ácido clorhídico (HCl) 1 N e hidróxido de sodio (NaOH) 1 N para analizar su respuesta reactiva y explosiva (Norma Oficial Mexicana, 1993a, pp. 11-12).

2.1.5 DETERMINACIÓN DE LA TOXICIDAD

Para caracterizar la mezcla de desechos de pintura en cuanto a su toxicidad, se realizó un análisis químico por espectrofotometría de absorción atómica a una muestra compuesta de las tres muestras de la mezcla, para determinar: arsénico (Ar), bario (Ba), cadmio (Cd), cromo (Cr), mercurio (Hg), plata (Ag), plomo (Pb) y selenio (Se). Este análisis se realizó en el Laboratorio de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Central del Ecuador. El procedimiento que se empleó se basó en el método EPA 1311A y las lecturas se hicieron en un equipo de absorción atómica (EPA, 1992, p .7).

Además, se determinaron compuestos orgánicos volátiles tales como benceno (C_6H_6), tolueno ($C_6H_5CH_3$), cloruro de metileno (CH_2Cl_2), etil metil cetona (C_4H_8O) e isobutanol ($C_4H_{10}O$), porque son los que constituyen a las pinturas (Ormazabal y Larrañaga, 2002, pp. 41-42). Este análisis se realizó en un laboratorio privado (LABOLAB) mediante el uso de un cromatógrafo de gases. Los resultados se exponen en el capítulo 3 del presente proyecto.

2.1.6 DETERMINACIÓN DE LA INFLAMABILIDAD

La inflamabilidad de la mezcla de desechos de pintura fue determinada según el método descrito en la Norma INEN 1047, el mismo que consiste en la determinación de la temperatura mediante el uso de un equipo Tag de copa cerrada. El procedimiento se resume en la sección A1.4 Anexo I. La temperatura de inflamación observada se corrigió mediante la Ecuación 2.5 (INEN, 2013, pp. 2-4).

$$PI_c = PI_o + 0,033 * (760 - P) \quad [2.5]$$

Donde:

PI_c : Punto de Inflamación corregido (°C)

PI_o : Punto de inflamación observado (°C)

P : Presión barométrica en Quito (540 mmHg)

2.2 EVALUACIÓN DEL PROCESO DE ESTABILIZACIÓN/SOLIDIFICACIÓN.

2.2.1 ESTABILIZACIÓN/SOLIDIFICACIÓN DE LA MEZCLA DE DESECHOS DE PINTURA

Para lograr la estabilización/solidificación de los desechos de pinturas se hicieron dos mezclas, la primera consistió en mezclar cemento, carbonato de calcio (CaCO_3) y pinturas, mientras que la segunda mezcla fue de cemento, carbonato de calcio, pinturas y cenizas. Las mezclas se realizaron en moldes cilíndricos de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura. Por facilidad de expresión, al carbonato de calcio se lo nombrará como cal en el desarrollo de todo el documento.

Se ensayaron las relaciones pinturas/cemento de 0,45 y 0,50 ya que estas presentan buenos resultados en cuanto a la resistencia del producto estabilizado (Casseres, Mesa y Hernández, 2008, p. 172). Para obtener una fuerza aceptable en el producto estabilizado se probaron las relaciones cal/cemento del 20 % y del 30 % (Anfacal, 2012, p. 1). Se trabajó con la relación ceniza/cemento del 10 % para obtener una buena resistencia a la compresión (Burgos, Angulo y Mejía, 2011, p. 62). Las relaciones con las que se realizaron las mezclas se encuentran resumidas en las Tablas 2.1 y 2.2.

La Tabla 2.1 corresponde a un diseño factorial A x B. Es un diseño 2 x 2 y el número de mezclas (M) es 4, éstas se realizaron de forma aleatoria para asegurar independencia de resultados. El diseño involucró 3 réplicas y 2 repeticiones.

Tabla 2.1. Mezcla estabilizada/solidificada con cemento, cal y pinturas

Variable	Tratamiento			
	M1	M2	M3	M4
pintura/cemento	0,45	0,50	0,45	0,50
cal/cemento	0,20	0,30	0,30	0,20

La Tabla 2.2 describe un diseño factorial A x B x C. Es un diseño 2 x 2 x 1 y el número de mezclas (M) es 4. Al igual que en el experimento anterior, las mezclas se realizaron de forma aleatoria y el diseño involucró 3 réplicas y 2 repeticiones.

Tabla 2.2. Mezcla estabilizada/solidificada con cemento, cal, pinturas y cenizas

Variable	Tratamiento			
	M1	M2	M3	M4
agua/cemento	0,45	0,50	0,45	0,50
cal/cemento	0,20	0,30	0,30	0,20
cenizas/cemento	0,10	0,10	0,10	0,10

Al final se obtuvieron 16 mezclas: 4 mezclas correspondientes a la propuesta con cemento, cal y pinturas con su respectiva repetición y 4 mezclas de la propuesta con cemento, cal, pinturas y cenizas con su correspondiente repetición. Se entiende por repetición a una mezcla (M) igual a la inicial (igual composición). En cada mezcla y su correspondiente repetición se determinaron la humedad, el pH, la conductividad y la resistencia a la compresión para verificar si se cumplen los criterios de ordenamiento y elegibilidad para ser depositados en una celda de confinamiento. De cada propiedad se obtuvieron 3 valores (réplicas) para garantizar reproducibilidad de resultados, excepto de la resistencia a la compresión de la que solo se hizo una medición (Ruiz, 2003, p. 17). Adicionalmente, en cada mezcla y su respectiva repetición, se realizó la caracterización toxicológica con el propósito de evaluar el proceso de estabilización/solidificación al realizar la comparación con la concentración inicial de metales pesados y compuestos orgánicos volátiles presentes en la mezcla de desechos de pintura (Norma Oficial Mexicana, 2005, pp. 14-15; Norma Técnica de Residuos Peligrosos y Especiales, 2014, p. 67;). El procedimiento que se realizó para elaborar las mezclas se describe en la sección AII.1 del Anexo II.

Cabe mencionar que este procedimiento no se basó en ningún método normalizado. Con estos métodos se obtienen características conocidas mediante composiciones de mezcla preestablecidas, así por ejemplo, se conoce que mediante la aplicación de la Norma ACI 211.1, se obtienen hormigones cuya resistencia a la compresión es de 210 kg/cm² (ACI, 2002, pp. 7-11). Al contrario, lo que se propone en el presente proyecto de titulación, es probar varias relaciones de mezcla que han dado buenos resultados en estudios similares, con el fin de analizar si las mezclas propuestas pueden estabilizar/solidificar a la mezcla de desechos de pinturas y cumplir con criterios de ordenamiento y elegibilidad para ser depositadas en celdas de confinamiento (Ruiz, 2003, p. 17).

2.2.2 CARACTERIZACIÓN TOXICOLÓGICA DE LAS CENIZAS VOLANTES

Antes de realizar las mezclas con ceniza, ésta fue evaluada desde el punto de vista tóxico mediante el método del ensayo TCLP descrito en la Norma EPA 1311 (EPA, 1992, p. 7-19). El procedimiento llevado a cabo se describe en la sección AII.2 del Anexo II. Los metales que se determinaron fueron arsénico, bario, cadmio, cromo, mercurio, plata, plomo y selenio (Norma Técnica de Residuos Peligrosos y Especiales, 2014, pp. 70-71). Las cenizas volantes provienen de la captación mecánica del polvo suspendido en los gases de la combustión del proceso de incineración de varios desechos industriales que la empresa Incinerox realiza habitualmente, es por esto que se requiere caracterizar a las cenizas para evaluar su aporte de metales pesados a la mezcla.

2.2.3 PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LAS MEZCLAS ESTABILIZADAS/SOLIDIFICADAS

2.2.3.1 Determinación de la resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión de los productos solidificados fue determinada mediante el uso de la máquina universal para cilindros de hormigón que se

encuentra disponible en el Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil de la Escuela Politécnica Nacional.

El método se basó en el procedimiento descrito en la Norma INEN 1573 referente a la determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico, el mismo que se resume en la sección AII.3.1 del Anexo II (INEN, 2010, pp. 6-7).

El área transversal de los cilindros se calculó mediante la Ecuación 2.6 (INEN, 2010, p. 5) y la resistencia a la compresión se determinó mediante el uso de la Ecuación 2.7 (INEN, 2010, p. 7):

$$A_t = \frac{\pi * D^2}{4} \quad [2.6]$$

Donde:

D : diámetro del cilindro (cm)

$$\sigma = \frac{F}{A_t} \quad [2.7]$$

Donde:

σ : resistencia a la compresión (Pa)

F : carga máxima aplicada al cilindro antes de su fractura (N)

A_t : área transversal (m²)

2.2.3.2 Determinación de la humedad

Para la determinación de la humedad se empleó una estufa con regulación de temperatura hasta 360 °C, un desecador y crisoles tarados. El procedimiento se describe en la AII.3.2 del Anexo II.

La humedad se determinó con la Ecuación 2.8 (Flores y Alcalá, 2010, p. 6):

$$h = \left(\frac{m_h - m_s}{m_h - m_c} \right) * 100\% \quad [2.8]$$

Donde:

m_h : peso de la muestra húmeda más el peso del crisol (g)

m_s : peso de la muestra seca más el peso del crisol (g)

m_c : peso del crisol (g)

2.2.3.3 Determinación del pH y la conductividad

Para medir el pH se realizó el procedimiento descrito en la Norma EPA 9045D, el mismo que se describe a continuación (EPA, 2004a, p. 2):

En un vaso de precipitación de 50 mL, se pesaron 20 g de muestra mediante el uso de una balanza analítica con capacidad de 810,00 g y 0,01 g de precisión, luego se añadieron 20 mL de agua destilada y se aplicó agitación magnética durante 5 minutos a 800 rpm, finalmente se midieron el pH y la conductividad mediante el uso de un pHmetro.

2.2.4 CARACTERIZACIÓN TOXICOLÓGICA DE LAS MEZCLAS ESTABILIZADAS/SOLIDIFICADAS

La toxicidad de las mezclas estabilizadas/solidificadas se basó en la determinación de metales pesados y compuestos orgánicos mediante el ensayo TCLP descrito en la Norma EPA 1311 (EPA, 1992, pp. 7-19).

Para desarrollar el ensayo TCLP sobre los productos solidificados, se realizó el procedimiento descrito en la sección AII.2 de Anexo II, con 100 g de sólido reducido de tamaño menor a 1 mm de partícula. Una vez que se obtuvo el extracto lixiviado, se envió al Laboratorio de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Central del Ecuador para determinar por absorción atómica los siguientes elementos: arsénico, bario, cadmio, cobre, mercurio, plata, plomo y

selenio. Para cuantificar los compuestos orgánicos volátiles tales como benceno, tolueno, cloruro de metileno, etil metil cetona e Isobutanol, se realizó un ensayo TCLP a cada mezcla estabilizada/solidificada mediante el uso de un extractor ZHE y una solución lixivante compuesta por ácido acético glacial 0,1 N neutralizada con 64 mL de hidróxido de sodio 1 N. La cuantificación se realizó por cromatografía de gases en el Laboratorio LABOLAB (Norma Técnica de Residuos Peligrosos y Especiales, 2014, pp. 70-71).

2.3 DISEÑO DE LA PLANTA DE ESTABILIZACIÓN/SOLIDIFICACIÓN DE LOS DESECHOS DE PINTURA

La capacidad de la planta se determinó al considerar que Incinerox, en un día de operación normal procesa 25 m³/día de mezcla estabilizada/solidificada (12,5 m³ en la mañana y 12,5 m³ en la tarde) mediante la utilización de dos mixer, uno con capacidad de 9 m³ y otro de 3,5 m³ respectivamente. Generalmente, se recomienda un factor de sobredimensionamiento del 10 % en el caso de futuras expansiones (Sinnott y Towler, 2012, p. 18), pero la empresa solicitó considerar un factor del 50 %, por lo que la planta de procesamiento para la estabilización/solidificación de la mezcla de desechos de pintura queda definida en 37,5 m³/día.

Sobre la base de la mejor formulación obtenida en la estabilización/solidificación de los desechos de pintura, y para una producción de 37,5 m³/día de mezcla estabilizada/solidificada, se dimensionó la planta de procesamiento según los requerimientos de la empresa Incinerox, para el efecto, se diseñaron los siguientes equipos: 1 tanque de almacenamiento de las pinturas, 3 silos para el almacenamiento del cemento, cal y cenizas respectivamente, 1 banda transportadora, 1 bomba centrífuga y las respectivas tuberías y válvulas que permitan transportar las pinturas hacia 1 tanque mezclador. A continuación se exponen las ecuaciones utilizadas para el dimensionamiento de los equipos, las mismas que han sido obtenidas en referencias científicas. Los cálculos y el

procedimiento detallado se describen en el Anexo III.

2.3.1 DIMENSIONAMIENTO DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE LOS DESECHOS DE PINTURA

El tanque de almacenamiento de los desechos de pintura se dimensionó mediante la Ecuación 2.9 que corresponde al volumen de un cilindro y se deduce mediante el esquema que se presenta en la Figura AIII.1 del Anexo III (Calvache, Rosero, Yacelga, 2007, p. 47).

$$V_p = \left[\frac{\pi}{4} \times D^2 \times (L - L_{li}) \right] + V_t \quad [2.9]$$

Donde:

V_p : volumen de los desechos de pintura (m^3)

D : diámetro del tanque (m)

L : altura del tanque (m)

L_{li} : altura del espacio libre del tanque (m)

V_t : volumen de la tapa (m^3)

Este tanque requiere de un sistema de agitación para conseguir una mezcla homogénea de los desechos de pintura. Para el dimensionamiento del sistema de agitación, se seleccionó el modelo del agitador sobre la base de la capacidad del tanque, la viscosidad de la mezcla y la velocidad de giro (Palate y Villón, 2006, p. 20; Colina, 2013, p. 18), se determinaron sus dimensiones y la potencia del motor mediante las Ecuaciones 2.10 y 2.11 (Ruiz, 2014, p. 266).

$$P_{eje} = N_p * N^3 * D_i^5 * \rho_{mezcla} \quad [2.10]$$

$$P_{motor} = \frac{P_{eje}}{0,85} \quad [2.11]$$

Donde:

- P_{eje} : potencia del eje (W)
 N_p : número de potencia que depende del número de Reynolds de la mezcla
 N : velocidad del agitador (rpm)
 D_i : diámetro interno (m)
 ρ_{mezcla} : densidad de la mezcla (kg/m^3)
 P_{motor} : potencia del motor (W)

Debido a que es un tanque que operara a presión atmosférica, se eligió una tapa bridada cóncava estándar cuyo volumen se calculó con la Ecuación 2.12 (ASME, 2015).

$$V_t = 0,416 D^3 [m^3] \quad [2.12]$$

Los espesores del tanque y de la tapa se calcularon con las Ecuaciones 2.13 y 2.14 (ASME, 2015).

$$e_T = \frac{P_{diseño} \times R}{K \times E - 0,6 \times P_{diseño}} + C \quad [2.13]$$

$$e_t = \frac{0,885 \times P_{diseño} \times Rc}{K \times E - 0,1 \times P_{diseño}} + C \quad [2.14]$$

Donde:

- e_T : espesor del tanque (mm)
 e_t : espesor de la tapa (mm)
 K : Resistencia de trabajo, 1 000 kgf/cm^2 para el acero inoxidable (Perry y Green, 2008, p. 1345)
 E : eficiencia de la soldadura, equivale a 0,80 (Ruiz, 2014, p. 220)
 C : factor de tolerancia a la corrosión, es igual a 0,16 cm (Ruiz, 2014, p. 220)
 $P_{diseño}$: es igual a 1,1 veces la presión de trabajo (Sinnott y Towler, 2012, p. 81) la presión de trabajo corresponde a 0,72 atm, presión atmosférica de Pifo-Pichincha, parroquia donde se va a instalar el tanque).
 R : radio interior del cilindro (m)
 Rc : radio desde el centro hasta la parte cónica (m)

2.3.2 DIMENSIONAMIENTO DE LOS SILOS DE ALMACENAMIENTO DEL CEMENTO, CAL Y CENIZAS

Los tanques de almacenamiento del cemento, cal y cenizas se dimensionaron mediante el uso de la Ecuación 2.15 (ASME, 2015), pero se consideró una tapa de forma cónica para una mejor descarga del material. La Figura AIII.4 del Anexo III muestra el esquema de los silos.

$$V_t = \frac{1}{3} * \frac{\pi * D^2}{4} * L_t \quad [m^3] \quad [2.15]$$

Donde:

L_t : altura de la tapa (m)

El espesor del tanque se determinó mediante la Ecuación 2.13 mientras que el espesor de la tapa de forma cónica se calculó con la Ecuación 2.16 (ASME, 2015).

$$e_t = \frac{P_{diseño} * D_{ci}}{2 * (K * E - 0,6 * P_{diseño}) * \cos \frac{\theta}{2}} + C \quad [mm] \quad [2.16]$$

Donde:

D_{ci} : Diámetro interno de un cono en el punto de consideración (m)

K : 1 000 kgf/cm² para el acero inoxidable (Perry y Green, 2008, p. 1345)

E : eficiencia de la soldadura, equivale a 0,80 (Ruiz, 2014, p. 220)

C : factor de tolerancia a la corrosión, es igual a 0,16 cm (Ruiz, 2014, p. 220)

θ : Ángulo entre el vértice del cono y la base

2.3.3 SELECCIÓN DE LA BANDA TRANSPORTADORA

La selección de la banda transportadora se hizo sobre la base de la disposición de los equipos en planta para determinar la distancia que tiene que recorrer para transportar todo el material hacia el tanque mezclador. La distancia fue determinada bajo el procedimiento descrito en la sección AIII del Anexo III. Una vez

conocida la capacidad de transporte y el largo de la banda, se la seleccionó en el catálogo mostrado en la Figura AIV.1 del Anexo IV (China Rock Crusher, 2011).

2.3.4 DIMENSIONAMIENTO DEL TANQUE MEZCLADOR

Se realizó el mismo procedimiento con el que se dimensionó el tanque de almacenamiento de los desechos de pintura con un sistema de agitación. En la Figura III.5 del Anexo III se expone el esquema del tanque mezclador.

2.3.5 DISEÑO DE LA BOMBA CENTRÍFUGA

Para el bombeo de la mezcla de desechos de pintura desde su tanque de almacenamiento hasta el tanque mezclador es necesario el diseño de una bomba centrífuga, la misma que es apta para este tipo de desechos según el catálogo que se presenta en el Anexo IV representado por la Figura AIV.2 dadas sus propiedades físicas y termodinámicas correspondientes a una densidad de 1,022 g/cm³ y 500 cP de viscosidad (Debem, 2015).

La potencia del motor de la bomba, valor que es necesario para la selección de la bomba en el catálogo mostrado en el Anexo IV, se determinó de mediante la Ecuación 2.17 (Wilo, 2010, p. 23).

$$P_{bomba} = \frac{H_B * \rho_m * g * Q}{\eta} \quad [2.17]$$

Donde:

P_{bomba} : potencia de la bomba (W)

H_B : altura de bombeo (m)

ρ_m : densidad de la mezcla (kg/m³)

g : gravedad (m/s²)

Q : caudal (m³/s)

η : eficiencia del motor de la bomba (%)

2.3.6 DISEÑO DE LAS TUBERÍAS

Para el diseño de las tuberías por donde se va a transportar la mezcla de desechos de pintura desde el tanque de almacenamiento hasta el tanque mezclador, se hicieron las siguientes consideraciones (Perry y Green, 2008, p. 644):

La velocidad máxima con la que se puede transportar el material en la tubería de succión es 1,83 m/s y con la que se transporta el material por la tubería de descarga es 2,44 m/s. Bajo estas consideraciones, para el dimensionamiento de las tuberías, primero se determinó el área y luego su diámetro mediante las Ecuaciones 2.18 y 2.19 (Bello y Pino, 2008, p. 12)

$$A_i = \frac{Q}{V} \quad [2.18]$$

Donde:

A_i : área de la tubería de succión o de descarga respectivamente (m²)

Q : caudal de la mezcla (m³/s)

V : velocidad a la que se puede transportar la mezcla por esa tubería (m/s)

$$D_i = \sqrt{\frac{4 * A_i}{\pi}} \quad [2.19]$$

Donde:

D_i : diámetro de la tubería de succión o de descarga respectivamente (m)

Las tuberías fueron seleccionadas en el catálogo que se presenta en la Figura AIV.III del Anexo III (Tubacero, 2007).

2.3.7 DISEÑO DE LAS VÁLVULAS

El diseño de la válvula para descargar la mezcla de desechos de pintura desde el tanque de almacenamiento hacia el mezclador, se basó en su diámetro nominal,

el mismo que debe coincidir con el diámetro de la tubería de descarga (Taval, 2015).

Una vez obtenido el diámetro de la tubería de descarga mediante el procedimiento descrito en el apartado anterior, se seleccionó la válvula en el catálogo mostrado en la Figura AIV.4 del Anexo IV (Taval, 2015).

2.4 DISEÑO DE LA CELDA DE CONFINAMIENTO PARA EL PRODUCTO ESTABILIZADO/SOLIDIFICADO

El procedimiento que se llevó a cabo para el diseño de la celda de confinamiento se describe en el Anexo V.

La capacidad de la celda se calculó mediante la Ecuación 2.20 (Bello y Pino, 2008, p. 9).

$$V_c = \dot{Q}_p * t_{\text{útil}} \quad [2.20]$$

Donde:

V_c : Capacidad de la celda (m³)

\dot{Q}_p : Capacidad de la planta (m³/día)

$t_{\text{útil}}$: Tiempo de vida útil (años)

El diseño de la celda está acompañado de la elección de los materiales que conformen un sistema de sellado multicapa que cumpla una función filtrante e impermeable frente al paso de los lixiviados y de una piscina de recolección de los mismos (LaGrega et al., 2001, pp. 818-824).

El flujo de lixiviado se calculó mediante la Ecuación 2.21 (Ruiz, 2014, p. 178) y la capacidad de la piscina se determinó con la Ecuación 2.22 (Bello y Pino, 2008, p. 9).

$$\dot{Q}_{lix} = 1,20 * A_c * h_{prec} \quad [2.21]$$

Donde:

\dot{Q}_{lix} : Flujo de lixiviado (m^3 /mes)

A_c : área de la celda (m^2)

h_{prec} : precipitación media anual de Pifo, 960 mm/año (Capservs Medios, 2015, p. 24)

$$V_p = \dot{Q}_{lix} * t \quad [2.22]$$

Donde:

V_p : Capacidad de la piscina (m^3)

t : Tiempo de almacenamiento (1 mes de operación)

El área de la piscina se calculó con la Ecuación 2.23 (Calvache, Rosero y Yacelga, 2007, p. 42)

$$A_p = \frac{V_p}{h_p} \quad [2.23]$$

Donde:

V_p : Capacidad de la piscina (m^3)

h_p : Altura de la piscina (m)

Los sistemas de sellado y recolección de lixiviados se explican en el capítulo 3.4.

2.5 ANÁLISIS ECONÓMICO DEL PROCESO DE DISPOSICIÓN FINAL DE LOS DESECHOS DE PINTURAS

Sobre la base del balance de masa y de energía, se evaluó económicamente el proceso de estabilización/solidificación con la finalidad de determinar el costo del tratamiento por unidad de desecho de pintura procesado (USD/ m^3). En el análisis se tomó en cuenta: los ingresos que la empresa recibe como cobro por sus servicios, los egresos correspondientes a costos de materias primas (cemento y cal), servicios necesarios para cumplir con el proceso de

estabilización/solidificación (energía), la mano de obra y la inversión en maquinaria, equipos y material de construcción de la celda de confinamiento y de la planta de procesamiento respectivamente (Blank y Tarquin, 2006, pp. 522-640).

El proceso de disposición final que la empresa está desarrollando actualmente fue comparado desde el punto de vista técnico y económico con el proceso diseñado en el presente proyecto para determinar viabilidad, es decir, se comparó el cumplimiento de los criterios para que los desechos puedan ser dispuestos en celdas de confinamiento (Ruiz, 2003, p. 17) y se compararon los costos de producción para concluir cual genera más costos.

Adicionalmente, se comparó la incineración de pinturas frente a una estabilización/solidificación de las mismas y se analizó cual es la mejor opción al tomar en cuenta el punto de vista económico y ambiental (Organización Panamericana de la Salud, 2007, pp. 89-97; Environmental Science and Technology, 2000, pp. 338-339).

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 CARACTERIZACIÓN DE LA MEZCLA DE LOS DESECHOS DE PINTURA

3.1.1 DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD

La densidad fue determinada mediante el procedimiento descrito en la sección 2.1.2 bajo el método del picnómetro. El valor promedio de las 3 muestras de pintura se muestra en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Valores de densidad determinados en las muestras de pintura

Muestra	Densidad (g/mL)	Densidad promedio (g/mL)
Muestra 1	1,021	1,022
Muestra 2	1,021	
Muestra 3	1,024	

La densidad promedio de las 3 muestras de pinturas muestra que la mezcla no es pesada, es muy próxima a la densidad del agua.

La densidad no es una propiedad que caracterice a un desecho como peligroso, pero se la ha determinado con el fin de realizar un balance de masa de los procesos de estabilización/solidificación propuestos en el presente proyecto.

3.1.2 DETERMINACIÓN DE LA CORROSIVIDAD

El ensayo de corrosividad comprendió la determinación del pH y la corrosividad a la lámina de acero, estos parámetros fueron determinados mediante el método descrito en el apartado 2.1.3 bajo las Normas EPA 9045D y 1110A respectivamente. El valor promedio de las 3 muestras de pintura se muestra en las Tablas 3.2 y 3.3.

Tabla 3.2. Resultados de pH en las muestras de la mezcla de pintura

Muestra	pH	pH medio
Muestra 1	7,09	7,18
Muestra 2	7,19	
Muestra 3	7,25	

La mezcla de desechos de pinturas presenta un pH promedio de 7,18, valor que está dentro del rango que excluye a un desecho para ser considerado como peligroso según su corrosividad ya que valores menores a 2,0 y mayores a 12,5 caracterizarían a un desecho como corrosivo por ser muy ácido o muy básico, según sea el caso (Norma Técnica de Residuos Peligrosos y Especiales, 2014, p. 65).

Tabla 3.3. Resultados de corrosividad de la muestras de la mezcla de pinturas

Muestra	Corrosión a la lámina de acero (mm/año)	Corrosión media (mm/año)
Muestra 1	3,04	2,41
Muestra 2	2,33	
Muestra 3	1,87	

La mezcla de desechos de pinturas presenta una corrosión media de 2,41 mm/año, valor menor al estipulado de 6,35 mm/año para que un desecho sea considerado como peligroso según su corrosividad (Norma Técnica de Residuos Peligrosos y Especiales, 2014, p. 65).

3.1.3 DETERMINACIÓN DE LA REACTIVIDAD Y EXPLOSIVIDAD

La reactividad y explosividad fueron determinadas mediante el método descrito en el apartado 2.1.4 (Norma Oficial Mexicana, 1993a, pp. 11-12).

Los resultados de la caracterización de la mezcla de desechos de pinturas se presentan en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Reactividad y explosividad de la mezcla de pinturas

Propiedad	Resultado
Combinación o polimerización	<ul style="list-style-type: none"> • Es líquida y estable. No se observa reacción que pueda dar lugar a una combinación o polimerización violenta.
En contacto con agua en relación (residuo-agua) de 5:1, 5:3, 5:5	<ul style="list-style-type: none"> • No se observa reacción exotérmica, al contacto se mantiene a temperatura ambiente. • No se observa reacción violenta que pueda formar gases, vapores o humos
En contacto con soluciones de pH ácido (HCl 1,0N) y básico (NaOH 1,0N), en relación (residuo-solución) de 5:1, 5:3, 5:5	<ul style="list-style-type: none"> • No se observa reacción exotérmica, al contacto se mantiene a temperatura ambiente. • No se observa reacción violenta que pueda formar gases, vapores o humos. • No se evidencia desprendimiento de sulfuro de hidrógeno (H₂S) (olor desagradable), ni de cianuro de hidrógeno (HCN) (olor a almendras), por lo que la mezcla de pinturas no contiene cianuros ni sulfuros en su composición (Díaz y Moyano, 2000, pp. 58-60)
Reacción o descomposición detonante y explosiva	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo las condiciones de análisis, no se evidenció ninguna reacción o descomposición que provoque algún tipo de explosión o detonación.

Cabe mencionar que el análisis de reactividad y explosividad se llevó a cabo bajo las condiciones ambientales de Quito.

La Norma Oficial Mexicana también considera como criterio que la constante de explosividad de la mezcla de desechos de pintura deberá ser igual o mayor a la del dinitrobenceno. No se pudo determinar dicha constante debido a que los laboratorios no disponen de atmósferas controladas que permitan determinar este tipo de parámetros. Esta información se obtuvo de laboratorios como LABOLAB, OSP, MULTIANALITYCA Y SEIDLABORATORY. No obstante, por lo expuesto en la Tabla 3.4, se concluye que la mezcla de desechos de pintura no puede ser considerada como reactiva y explosiva.

3.1.4 DETERMINACIÓN DE LA TOXICIDAD

La toxicidad fue determinada mediante el método que se presentó en el apartado 2.1.5 bajo la Norma EPA 1311A. En la Tabla 3.5 se muestran los resultados de la caracterización de la toxicidad de la mezcla de los desechos de pinturas.

Tabla 3.5. Concentración de compuestos inorgánicos y orgánicos en la mezcla de desechos de pinturas

Parámetro	Concentración (mg/L)	Límite máximo permisible* (mg/L)
Metales pesados		
Arsénico	0,0007	5,0
Bario	<0,2	100,0
Cadmio	<0,02	1,0
Cromo	<0,04	5,0
Mercurio	<0,0002	0,2
Plata	<0,004	5,0
Plomo	<0,09	5,0
Selenio	<0,0001	1,0
Compuestos orgánicos volátiles		
Benceno	<0,00001	0,5
Tolueno	<0,00001	14,4
Cloruro de Metileno	<0,00001	8,6
Etil Metil Cetona	<0,00001	200,0
Isobutanol	0,00035	36,0

(*Norma Oficial Mexicana, 2005, pp. 8-9)

Los datos que se exponen en la Tabla 3.5 permiten observar que la mezcla de desechos de pintura tiene un contenido muy bajo de metales pesados y de compuestos orgánicos volátiles en su composición, la concentración de estos compuestos es inferior al límite permitido para que un desecho pueda ser considerado como peligroso, razón por la que la mezcla de desechos de pintura no puede ser considerada como peligrosa en cuanto a su toxicidad (Norma Oficial Mexicana, 2005, pp. 8-9). Sin embargo, la caracterización toxicológica inicial de la mezcla se hace necesaria con el fin de analizar la interacción de los metales y de los compuestos orgánicos con los reactivos utilizados en el proceso de estabilización/solidificación (cemento, cal, cenizas) para identificar una posible disminución en la concentración de estos compuestos y evaluar la efectividad del proceso. Esto se analizará una vez que se tope el tema de la caracterización toxicológica de las mezclas estabilizadas/solidificadas en la sección 3.2.3. Ormazabal y Larrañaga (2002) mencionan que las pinturas contienen pigmentos

metálicos en su composición tales como escamas de aluminio, níquel y plata (p.42). El aluminio y el níquel no fueron analizados debido a que dichos metales no son parámetro de toxicidad (Norma Oficial Mexicana, 2005, pp. 8-9), pero sí se determinó la plata.

La baja concentración de los metales analizados, los mismos que están por debajo del límite de detección del equipo, a excepción del arsénico, permite suponer que la mezcla se diluyó. Cabe recordar que la mezcla fue hecha con los desechos de pinturas comerciales de la empresa Incinerox, la misma que está conformada por distintos tipos de pinturas a base de agua, pinturas a base de solventes y pinturas y barnices residuales caducados. La empresa no dispone de caracterizaciones iniciales de concentración de ningún componente de la mezcla y dicha caracterización no formó parte del presente proyecto, razones por las que no se puede comprobar una posible dilución.

La concentración de arsénico en la mezcla va a permitir estudiar la efectividad del proceso de estabilización/solidificación relacionada con la disminución o no de la concentración del metal luego de realizar los análisis toxicológicos correspondientes en los productos solidificados. Se podrá analizar si se produce una macroencapsulación o microencapsulación del metal en la matriz solidificada. No se va poder analizar lo mismo con los otros metales ya que su concentración está por debajo del límite de detección o cuantificación del equipo y no se podría saber si disminuyeron o no al final del proceso.

Son varios los compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles que caracterizan a un desecho como peligroso, los mismos que son mencionados en la Tabla 1.1 del el presente proyecto. Se determinaron aquellos compuestos que según Ormazabal y Larrañaga (2002) forman parte de la composición de las pinturas y barnices (pp. 41-42).

La baja concentración de los compuestos orgánicos analizados, los mismos que están por debajo del límite de detección del equipo, a excepción del isobutanol, permite suponer que la mezcla se diluyó o que dichos compuestos se volatilizaron durante el almacenamiento de los componentes de la mezcla, esto

tampoco se puede comprobar por las razones explicadas anteriormente.

La concentración de isobutanol en la mezcla va a permitir estudiar la efectividad del proceso de estabilización/solidificación relacionada con la disminución o no de la concentración del compuesto en los productos estabilizados. No se va poder analizar lo mismo con los otros compuestos ya que su concentración está por debajo del límite de detección o cuantificación del equipo y no se podría saber si disminuyeron o no al final del proceso.

3.1.5 DETERMINACIÓN DE LA INFLAMABILIDAD

La inflamabilidad fue determinada mediante el método descrito en la sección 2.1.6 bajo la Norma INEN 1047. El valor promedio de las 3 muestras de pintura se muestra en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6. Valores del punto de inflamación de las muestras de pintura

Muestra	Punto de inflamación (°C)	Punto de inflamación promedio (°C)
Muestra 1	45,26	42,00
Muestra 2	38,26	
Muestra 3	42,26	

El punto de inflamación promedio de las 3 muestras de desechos de pintura es inferior a 60 °C. Esto quiere decir que, la mezcla de desechos de pintura es considerada como un desecho peligroso por su inflamabilidad (Norma Técnica de Residuos Peligrosos y Especiales, 2014, p. 67).

La propiedad inflamable de los desechos de pintura fue eliminada mediante los procesos de estabilización/solidificación propuestos en el presente proyecto. El proceso de fraguado fue efectivo dando como resultado productos solidificados con bajo contenido de humedad como se discutirá en la sección 3.2.2, los mismos que no son capaces de producir fuego por fricción, absorción de humedad o por

alteraciones químicas espontáneas bajo condiciones de temperatura y presión de 25 °C y 0,72 atm, además de no inflamarse al ser expuesto al fuego directo (Norma Técnica de Residuos Peligrosos y Especiales, 2014, p. 67).

3.2 EVALUACIÓN DEL PROCESO DE ESTABILIZACIÓN/SOLIDIFICACIÓN

En esta sección se exponen los resultados obtenidos en la evaluación de los procesos de estabilización/solidificación propuestos y descritos en la sección 2.2.1.

3.2.1 CARACTERIZACIÓN TOXICOLÓGICA DE LAS CENIZAS VOLANTES

La caracterización de las cenizas se basó en la determinación de metales pesados mediante el ensayo TCLP descrito en la Norma EPA 1311 cuyo procedimiento se expone en la sección 2.2.2.

En la Tabla 3.7 se presentan los resultados de la caracterización toxicológica de las cenizas utilizadas en la estabilización/solidificación con cemento, cal, pinturas y cenizas. Además se incluyen los límites máximos permisibles para considerar a los desechos como peligrosos (Norma Oficial Mexicana, 2005, pp. 8-9).

Tabla 3.7. Concentración de compuestos inorgánicos en las cenizas volantes

Parámetro	Concentración (mg/L)	Límite máximo permisible* (mg/L)
Arsénico	<0,0002	5,0
Bario	<0,2	100,0
Cadmio	<0,77	1,0
Cromo	<0,5	5,0
Mercurio	<0,05	0,2
Plata	<0,004	5,0
Plomo	<0,90	5,0
Selenio	<0,0001	1,0

(*Norma Oficial Mexicana, 2005, pp. 8-9)

Mediante los datos que se exponen en la Tabla 3.7 se puede dilucidar que los metales analizados están por debajo del límite máximo permisible para que un desecho sea considerado como peligroso (Norma Oficial Mexicana, 2005, pp. 8-9), por ende, su aporte de metales a la mezcla no va a ser significativo.

3.2.2 PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LAS MEZCLAS ESTABILIZADAS/SOLIDIFICADAS

En la Tabla 3.8 se exponen los resultados de las propiedades evaluadas en las mezclas con cemento, pintura y cal, las mismas que fueron determinadas bajo los métodos descritos en la sección 2.2.3.

Tabla 3.8. Caracterización de las mezclas (M) y su respectiva repetición (R), de la estabilización/solidificación de pinturas con cemento y cal

	Humedad	pH	Conductividad	Resistencia a la compresión
Unidad Mezcla	%	-	μS/cm	kPa
M1	3,33	11,83	3,21	939,37
RM1	3,00	11,86	3,02	966,32
M2	1,67	12,00	2,83	1 301,53
RM2	2,00	11,79	2,39	1 209,22
M3	1,67	11,81	3,12	435,73
RM3	1,67	11,55	3,36	477,04
M4	5,00	11,88	3,41	1 301,53
RM4	5,33	11,17	3,31	1 336,77
Límite*	<10	4-13	<100 000	>50

(*Ruiz, 2003, p. 17)

Los datos de la Tabla 3.8 permiten analizar que los resultados son repetitivos y reproducibles ya que los valores obtenidos en cada uno de las mezclas (M) se confirman con los valores de su repetición respectiva (R). Además, se puede afirmar que todas las mezclas cumplen con los valores límite para poder ser depositadas en celdas de confinamiento (Ruiz, 2003, p. 17). Cabe mencionar que los resultados reportados son los valores promedio, los valores determinados en

cada réplica tanto para las mezclas (M) como para las repeticiones (R) se encuentran expresados en el Anexo II.

Es importante aclarar que no existen estudios relacionados con la disposición final de los desechos de pintura, así mismo, hay escasos trabajos realizados en los que se haya evaluado la disposición de desechos en celdas de confinamiento, es por esto que no se puede contar con referencias específicas que permitan analizar si los resultados obtenidos en el presente proyecto de titulación son coherentes. Sin embargo, existen numerosos estudios de estabilización/solidificación de diferentes desechos industriales cuyas relaciones de mezcla (agua, cemento, cal, cenizas, etc.) pueden ayudar a evaluar el comportamiento de las relaciones empleadas para la estabilización/solidificación de los desechos de pintura.

Según la evaluación del diseño experimental empleado en este proyecto, la misma que fue realizada en el software Statgraphics, las relaciones pintura/cemento y cal/cemento no presentan diferencia estadísticamente significativa sobre la humedad con un grado de confianza del 95 % como se aprecia en las Figuras 3.1 y 3.2. Esto quiere decir que los dos factores no influyen en la humedad final de las mezclas estabilizadas/solidificadas, por lo que se puede utilizar cualquier composición para tener un porcentaje de humedad dentro del límite permitido.

Según las tendencias que se exponen en las Figuras 3.1 y 3.2, con la relación pintura/cemento de 0,45 se obtiene la humedad más baja con una media de 2,08 % y con la relación cal/cemento de 0,30 se obtiene la humedad más baja con una media de 1,92 %, es decir, a menor cantidad de pintura y a mayor cantidad de cal se obtiene menor humedad. Con estos resultados se supondría que esa es la mejor combinación que permita tener una mejor reacción de fraguado, pero la evaluación del diseño experimental indica que no hay interacción entre los dos factores, es decir, no se puede saber que composición de la relación pintura/cemento interacciona con la mejor composición de la relación cal/cemento. Lo que se puede concluir es que independientemente de la relación cal/cemento que se use, con la relación pintura/cemento de 0,45 se obtiene la menor humedad, así mismo, independientemente de la relación pintura/cemento que se utilice, con la relación cal/cemento de 0,30 se obtiene la menor humedad.

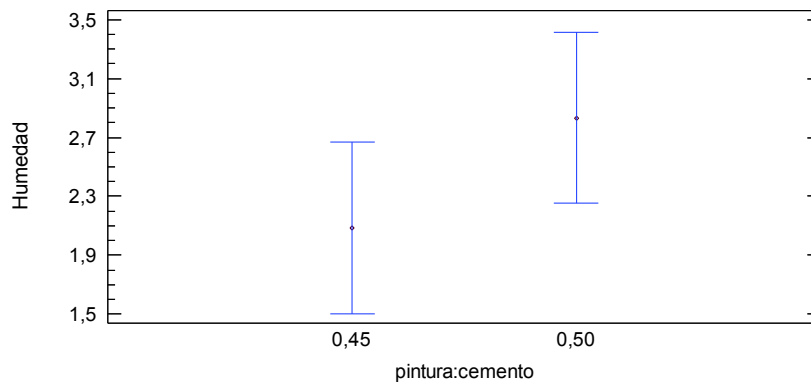


Figura 3.1. Humedad en función de las relaciones pintura:cemento de las mezclas de pinturas estabilizadas/solidificadas con cemento y cal

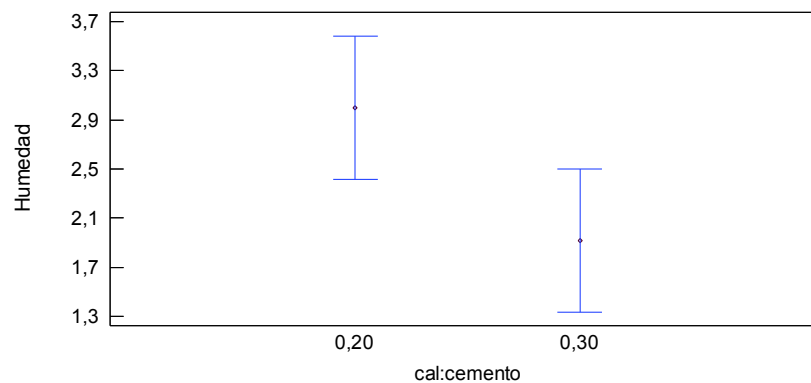


Figura 3.2. Humedad en función de las relaciones cal:cemento de las mezclas de pinturas estabilizadas/solidificadas con cemento y cal

Ruiz (2014) en su estudio referente al diseño de un sistema de tratamiento de los lixiviados generados por la disposición no controlada de polvo de acería sobre suelo, encontró que para fines de solidificación, las relaciones entre 40 % y 50 % de líquido con respecto al sólido son efectivas para que el producto solidificado obtenga una humedad menor al 10 % (p. 114). Determinó que con la relación líquido/sólido del 40 % (menor cantidad de la fase líquida en la experimentación), su producto solidificado obtuvo la menor humedad. Sólo probó la relación cal/cemento del 25 %, esto no permite comparar si un mayor contenido de cal es favorable para disminuir la humedad del producto, pero se conoce que la cal mejora las condiciones de fraguado del cemento proporcionando a la mezcla mejores propiedades mecánicas como la resistencia a la compresión, por lo tanto, a mayor cantidad de cal empleada, se van a obtener mejores propiedades en el producto solidificado (Romero y Vargas, 2009, p. 89), esto demuestra

los resultados obtenidos en la experimentación del presente proyecto.

Cabe mencionar que el bajo contenido de humedad en todas las mezclas denota un buen proceso de fraguado y curado, esto quiere decir que las pinturas reaccionaron satisfactoriamente con el cemento y la cal a pesar de que el tiempo que tardaron las muestras en tener un aspecto endurecido fue mayor (15 días) al que normalmente tardarían si el cemento hubiera sido fraguado con agua (1-12 horas) (Hirschi et al., 2010, p. 17).

Por otro lado, se encontró que las relaciones pintura/cemento y cal/cemento no presentan diferencia estadísticamente significativa sobre el pH de las mezclas con un grado de confianza del 95 % como se aprecia en las Figuras 3.3 y 3.4, entonces, se puede utilizar cualquier composición para tener un valor de pH dentro del límite permitido.

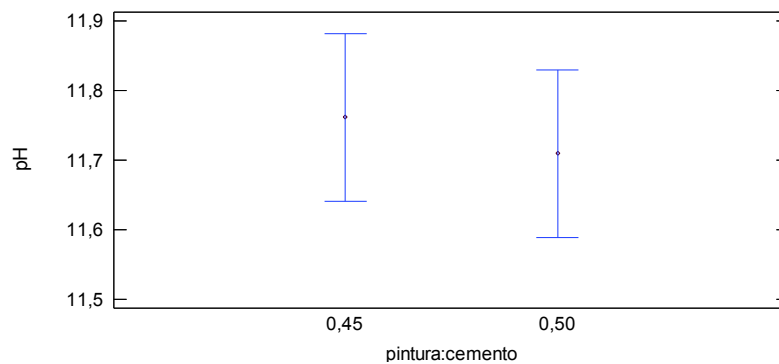


Figura 3.3. pH en función de las relaciones pintura:cemento de las mezclas de pinturas estabilizadas/solidificadas con cemento y cal

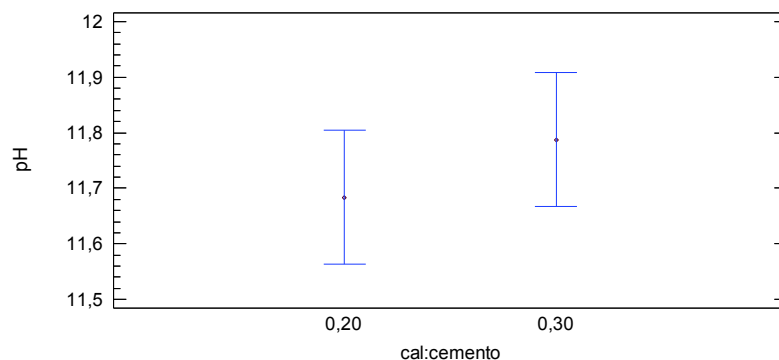


Figura 3.4. pH en función de las relaciones cal:cemento de las mezclas de pinturas estabilizadas/solidificadas con cemento y cal

Las tendencias mostradas en las Figuras 3.3 y 3.4, indican que las relaciones pintura/cemento y cal/cemento tienen medias muy próximas, razón por la que no se puede determinar cuál es mejor, adicionalmente, no hay interacción entre los dos factores, por lo que se concluye que independientemente de las composiciones que se usen, siempre se va a obtener un pH dentro del límite permitido.

Ruiz (2014) obtuvo el mismo valor de pH dentro del rango entre 4 y 13 en sus productos estabilizados cuando utilizó las relaciones líquido/sólido del 40 % y del 50 % respectivamente, esto comprueba los resultados obtenidos en el presente proyecto, es decir, independientemente las relaciones que se utilicen, se va a cumplir con la condición de pH requerida (p. 63).

Cabe mencionar que la condición de pH alcalino en todas las muestras se debe a que hay compuestos que son insolubles en este rango de pH como por ejemplo los carbonatos e hidróxidos (Sandoval y Jauregui, 2002, p. 4). Adicionalmente, la cal reduce el pH del cemento fraguado, de 13,5 a valores menores de 12,5, esta condición es favorable para la estabilización/solidificación ya que se disminuye la lixiviación de los metales pesados, razón por la que quedan atrapados en la matriz solidificada (Romero y Vargas, 2009, p. 84).

Además, se determinó que las relaciones pintura/cemento y cal/cemento no presentan diferencia estadísticamente significativa sobre la conductividad con un grado de confianza del 95 % como se aprecia en las Figuras 3.5 y 3.6, es decir, los dos factores no influyen en la conductividad de las mezclas estabilizadas/solidificadas, por lo que se puede utilizar cualquier composición para obtener una baja conductividad.

Como se observa en los gráficos de las Figura 3.5 y 3.6, con la relación pintura/cemento de 0,50 se obtiene la conductividad más baja con una media de 2,98 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y con la relación cal/cemento de 0,30 se obtiene la conductividad más baja con una media de 2,92 $\mu\text{S}/\text{cm}$, como no hay interacción entre los dos factores, se puede concluir que independientemente de la relación cal/cemento que se use, con la relación pintura/cemento de 0,50 se obtiene la menor conductividad, así

mismo, independientemente de la relación pintura/cemento que se utilice, con la relación cal/cemento de 0,30 se obtiene la menor conductividad.

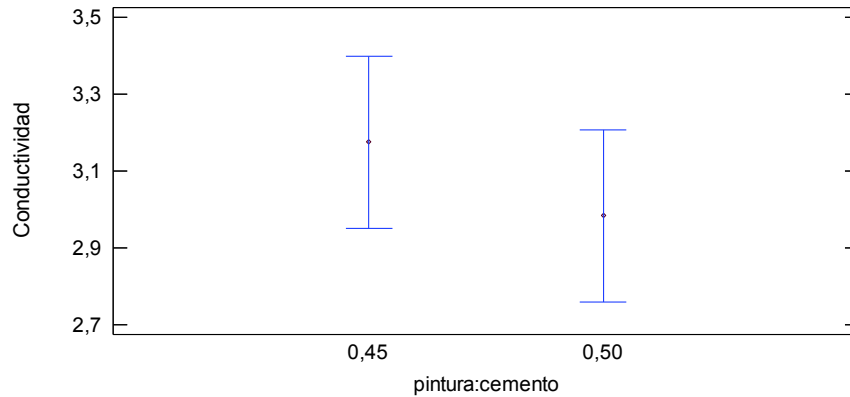


Figura 3.5. Conductividad en función de las relaciones pintura:cemento de las mezclas de pinturas estabilizadas/solidificadas con cemento y cal

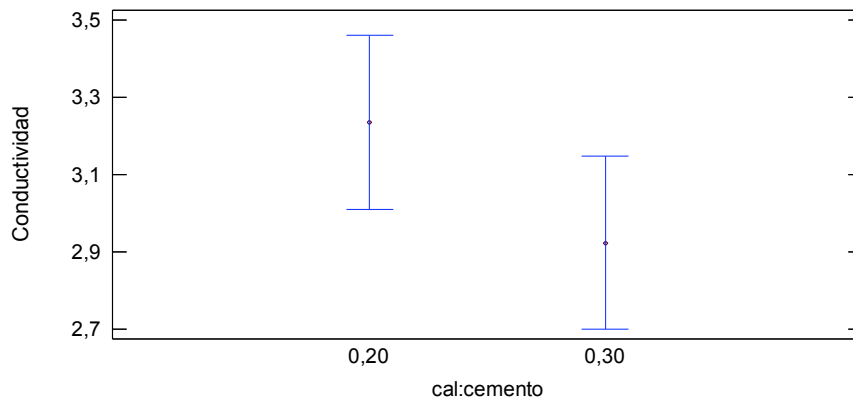


Figura 3.6. Conductividad en función de las relaciones cal:cemento de las mezclas de pinturas estabilizadas/solidificadas con cemento y cal

Ruiz (2014) también obtuvo un menor valor de conductividad en sus lixiviados encapsulados con una mayor cantidad de líquido en la mezcla (relación líquido/sólido del 50 %), esto denota que a mayor cantidad de la fase líquida hay una mejor reacción de cementación (p. 63). La utilización de una mayor cantidad de cal en la mezcla para obtener un menor valor de conductividad puede ser comprobada por las condiciones de pH explicadas anteriormente, es decir, una mayor cantidad de cal asegura mayor presencia de compuestos insolubles que se quedan en la matriz solidificada y no pasan a formar parte del lixiviado, el mismo que carece de iones que reflejen conductividad (Sandoval y Jauregui, 2002, p. 4; Romero y Vargas, 2009, p. 84).

También se determinó que el factor pintura/cemento sí presenta diferencia estadísticamente significativa sobre la resistencia a la compresión de las mezclas estabilizadas/solidificadas con un grado de confianza del 95 % como se aprecia en la Figura 3.7, mientras que el factor cal/cemento no presentan diferencia estadísticamente significativa como se nota en las Figura 3.8. Esto significa que la relación pintura/cemento sí influye en la resistencia a la compresión adquirida por las mezcla, en cambio, la relación cal/cemento no.

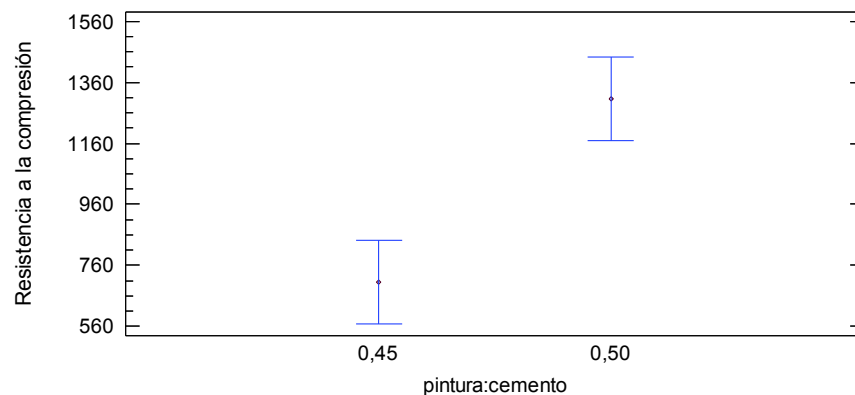


Figura 3.7. Resistencia a la compresión en función de las relaciones pintura:cemento de las mezclas de pinturas estabilizadas/solidificadas con cemento y cal

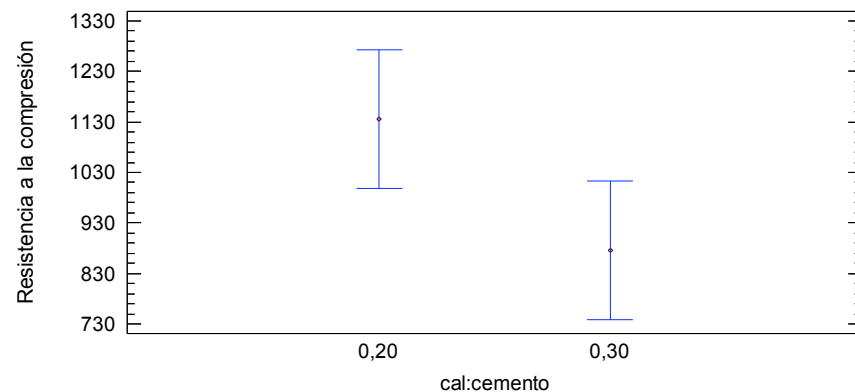


Figura 3.8. Resistencia a la compresión en función de las relaciones pintura:cemento de las mezclas de pinturas estabilizadas/solidificadas con cemento y cal

En la Figura 3.7 se puede notar que con la relación pintura/cemento de 0,50 se obtiene la resistencia a la compresión más alta con una media de 1 307,51 kPa y en la Figura 3.8 se puede distinguir que con la relación cal/cemento de 0,20 se obtiene la resistencia a la compresión más alta con una media de 1 136,00 kPa, como no hay interacción entre los dos factores, lo que se puede concluir es que

independientemente de la relación cal/cemento que se use, mientras se utilice la relación pintura/cemento de 0,50 se obtendrá la mayor resistencia a la compresión. Ruiz (2014) obtuvo un mayor valor de resistencia a la compresión (965 kPa) cuando utilizó menor cantidad de la fase líquida en la mezcla (relación líquido/sólido del 40 %) (p. 63). Calle (2015) en su estudio de encapsulación de lodos provenientes de la industria de galvanizado probó relaciones entre el 40 % y el 60% de lodo con respecto al encapsulante y obtuvo el menor valor de resistencia a la compresión (5 380 kPa) con una relación del 40 % (p. 83). Casseres et al. (2008) hallaron que sus lodos saturados con metales pesados alcanzaron 17 200 kPa con una relación lodo/cemento del 47,5 % (p. 174). Cabe notar que en todos los estudios se obtuvieron diferentes valores de resistencia a la compresión. Esto sólo puede explicarse mediante la diferente manera en que los desechos reaccionan con el cemento y el resto de componentes de la mezcla, esa interacción define una mejor o peor resistencia a la compresión (Casseres et al., 2008, 172).

Por lo expuesto anteriormente, se concluye que, una combinación entre las relaciones pintura/cemento de 0,50 y cal/cemento de 0,30, es la más recomendable para adquirir una resistencia a la compresión aceptable y menor contenido de humedad, pH y conductividad. Por esto, la mezcla M2 es la mejor opción para la estabilización/solidificación de pinturas con cemento y cal.

Sobre la base de los resultados encontrados en el presente proyecto, y por los datos obtenidos en los diferentes estudios citados a lo largo de esta discusión, se confirma lo manifestado por Casseres et al. (2008), que las relaciones entre 0,40 y 0,50 de pintura/cemento son recomendables para obtener una buena resistencia a la compresión del producto solidificado (p. 172). Esto se concatena con lo expresado por Anfal (2012), que las relaciones entre 0,20 y 0,30 de cal/cemento brinda una fuerza aceptable al producto estabilizado (p. 1). Estas relaciones funcionaron para que la mezcla de desechos de pintura estabilizada/solidificada cumpla con este criterio para ser depositada en una celda de confinamiento.

En la Tabla 3.9 se presentan los resultados de las mezclas estabilizadas/solidificadas con cemento, pintura, cal y cenizas los mismos

que fueron determinadas bajo los métodos descritos en el apartado 2.2.3.

Tabla 3.9 Caracterización de las mezclas (M) y su respectiva repetición (R), de la estabilización/solidificación de pinturas con cemento, cal y cenizas

	Humedad	pH	Conductividad	Resistencia a la compresión
Unidad Mezcla	%	-	$\mu\text{S/cm}$	kPa
M1	1,67	11,39	0,62	1 725,95
RM1	1,67	12,13	0,60	1 757,64
M2	0,67	11,55	0,46	1 439,19
RM2	1,00	11,69	0,44	1 403,39
M3	1,67	11,51	0,55	1 369,44
RM3	1,67	11,47	0,55	1 346,80
M4	1,00	11,37	0,43	1 233,63
RM4	0,67	11,47	0,44	1 256,26
Límite*	<10	4-13	<100 000	>50

(*Ruiz, 2003, p. 17)

Los datos de la Tabla 3.9 muestran que los resultados son repetitivos y reproducibles ya que los valores obtenidos en cada una de las mezclas (M) se confirman con los valores de su repetición respectiva (R). Además, se puede observar que todas las formulaciones están por debajo de los valores límite establecidos para que los productos solidificados puedan ser depositados en celdas de confinamiento (Ruiz, 2003, p. 17).

En estas mezclas no se puede realizar el análisis del diseño experimental debido a que el factor cenizas/cemento solo consta de un nivel (relación 0,1) y el software Statgraphics requiere mínimo de 2,0. Sin embargo, el análisis anterior llevado a cabo en las mezclas con cemento, pintura y cal servirá para evaluar la influencia de las cenizas en cada uno de los tratamientos.

En las Figuras 3.9 a 3.12 se exponen los resultados mostrados en las Tablas 3.8 y 3.9 en gráficas de columnas con el fin de realizar un análisis comparativo entre la estabilización/solidificación de las pinturas con cemento y cal así como con cemento, cal y cenizas.

En las Figuras 3.9, 3.10 y 3.11 se observa que la humedad, el pH y la conductividad son más bajas en la estabilización/solidificación de pinturas con cemento, cal y cenizas en comparación con las mezclas en la que solo se usó cemento y cal. Se evidencia la influencia de la ceniza en estas formulaciones.

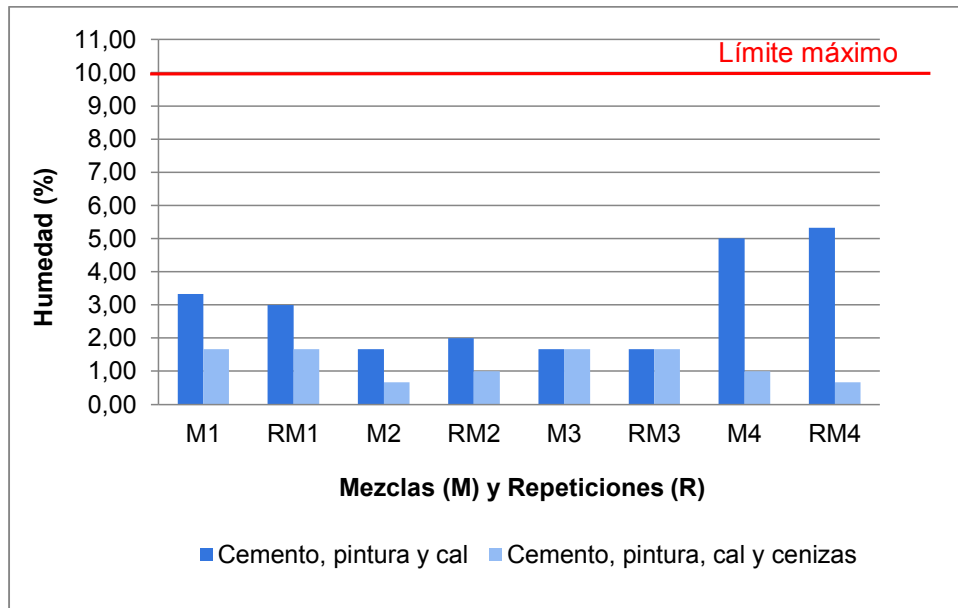


Figura 3.9. Porcentaje de humedad de las mezclas (M) y su respectiva repetición (R) de la estabilización/solidificación de pinturas con cemento, cal y cenizas respectivamente

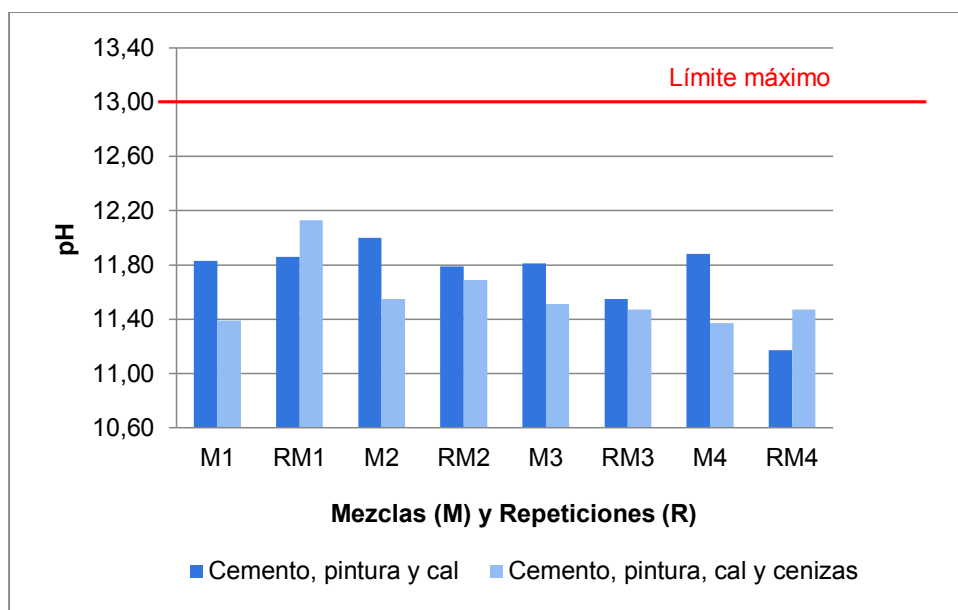


Figura 3.10. pH de las mezclas (M) y su respectiva repetición (R) de la estabilización/solidificación de pinturas con cemento, cal y cenizas respectivamente

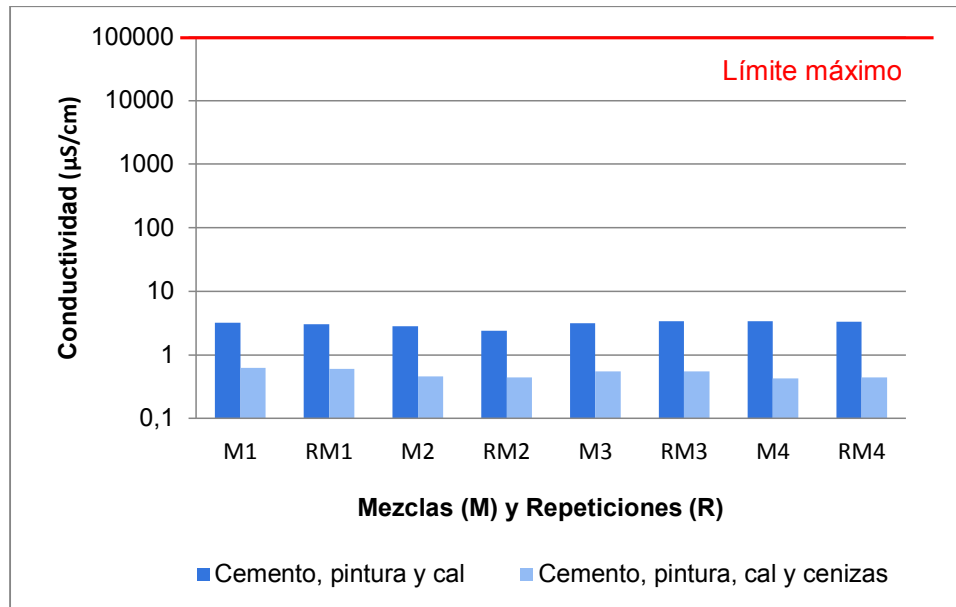


Figura 3.11. Conductividad de las mezclas (M) y su respectiva repetición (R) de la estabilización/solidificación de pinturas con cemento, cal y cenizas respectivamente

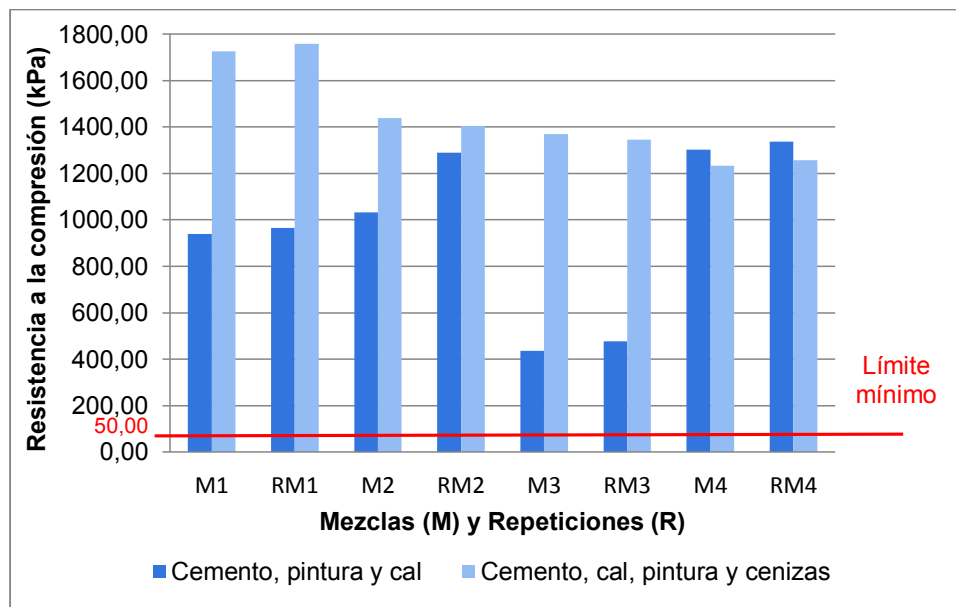


Figura 3.12. Resistencia a la compresión de las mezclas (M) y su respectiva repetición (R) de la estabilización/solidificación de pinturas con cemento, cal y cenizas respectivamente

La disminución de la humedad se justifica debido a la propiedad reaccionante de las cenizas con la fase líquida de la mezcla confiriéndole características cementantes (LaGrega et al., 2001, pp. 691). La leve acidificación de las mezclas se justifica por el aporte de las cenizas que probablemente carecen de álcalis en su

constitución (Moreno, 2001, p. 47). La disminución de la conductividad radica en la impermeabilidad que adquiere la mezcla al incluir cenizas volantes, es decir, las cenizas ayudan a la formación de compuestos insolubles que quedan atrapados en la matriz endurecida, por ende los lixiviados carecen de iones que reflejen conductividad (Santaella, 2001, p. 48; Sandoval y Jauregui, 2002, p. 4; Romero y Vargas, 2009, p. 84).

Las tendencias de la Figura 3.12 advierten que la presencia de cenizas aumentó la resistencia a la compresión en las mezclas con cemento, cal, pinturas y cenizas en comparación con las mezclas en las que solo se usó cemento, cal y pinturas.

Burgos, et al. (2011) en su estudio sobre la durabilidad de morteros adicionados con cenizas volantes de alto contenido de carbón, encontraron que una adición del 10 % de cenizas volantes como sustituto parcial del cemento en un mortero inicialmente constituido por las relaciones agua/cemento del 55 % y cemento/arena del 36 %, incrementó la resistencia a la compresión en un 35 % a los 28 días de curado (p. 69), esto confirma los resultados obtenidos en el presente proyecto.

La mezcla M1 tiene la más alta resistencia a la compresión (1 725,95 kPa), la mezcla M4 presenta la resistencia a la compresión más baja (1 233,63 kPa). Las mezclas M2 y M3 tienen una resistencia aceptable (1 439,19 y 1 369,44 respectivamente).

La mezcla M1 tiene una relación pintura/cemento de 0,45, cal/cemento de 0,20 y cenizas/cemento de 0,10. Esto quiere decir que la presencia de ceniza requiere de menos pintura y menos cal en comparación con la mezcla M2 de la propuesta con cemento y cal (pintura/cemento: 0,50, cal/cemento: 0,30) para obtener una mayor fuerza del producto estabilizado/solidificado. Esto es coherente debido a que el tamaño de partícula de las cenizas volantes confiere a la mezcla una ligera reducción en la demanda de la fase líquida de la mezcla (Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, 2001) y está comprobado que las cenizas pueden sustituir parcialmente al cemento, a los áridos, etc., de tal modo que mejoran las propiedades del producto estabilizado (Burgos, et. al., 2011, p. 69). Como conclusión se puede decir que para obtener una mejor resistencia a la compresión,

las relaciones pintura/cemento de 0,45, cal/cemento de 0,20 y cenizas/cemento de 0,10 (mezcla M1), es la mejor opción.

3.2.3 CARACTERIZACIÓN TOXICOLÓGICA DE LAS MEZCLAS ESTABILIZADAS/SOLIDIFICADAS

En la Tabla 3.10 se muestran los resultados de la caracterización toxicológica de los desechos de pinturas estabilizados/solidificados con cemento y cal, obtenidos mediante la aplicación del método descrito en la sección 2.2.4 sobre la base de la determinación de metales pesados y compuestos orgánicos volátiles mediante el ensayo TCLP descrito en la Norma EPA 1311 (EPA, 1992, pp. 7-19). Además se incluyen los límites máximos permisibles para considerar a los desechos como peligrosos para analizar si las mezclas deben ser consideradas como peligrosas.

Tabla 3.10. Caracterización toxicológica de las mezclas (M) y su respectiva repetición (R), de la estabilización/solidificación de pinturas con cemento y cal

Parámetro	Límite máximo permisible* (mg/L)	Concentración del extracto TCLP (mg/L)			
		M1	M2	M3	M4
Metales pesados					
Arsénico	5,0	0,0003	0,0004	0,0004	0,0007
Bario	100,0	1,8	2,3	1,6	2,1
Cadmio	1,0	<0,77	<0,77	<0,77	<0,77
Cromo	5,0	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50
Mercurio	0,2	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Plata	5,0	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004
Plomo	5,0	<0,90	<0,90	<0,90	<0,90
Selenio	1,0	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Compuestos orgánicos volátiles					
Benceno	0,5	<0,00013	<0,00013	<0,00013	<0,00012
Tolueno	14,4	0,00023	0,00019	0,00021	0,00030
Cloruro de Metileno	8,6	<0,00013	<0,00013	<0,00013	<0,00012
Etil Metil Cetona	200,0	<0,00013	<0,00013	<0,00013	<0,00012
Isobutanol	36,0	<0,00013	<0,00013	<0,00013	<0,00012

(*Norma Oficial Mexicana, 2005, pp. 8-9)

Tabla 3.10. Caracterización toxicológica de las mezclas (M) y su respectiva repetición (R), de la estabilización/solidificación de pinturas con cemento y cal (**continuación...**)

Parámetro	Límite máximo permisible* (mg/L)	Concentración del extracto TCLP (mg/L)			
		RM1	RM2	RM3	RM4
Metales pesados					
Arsénico	5,0	0,0003	0,0005	0,0005	<0,0002
Bario	100,0	1,4	1,6	1,6	1,3
Cadmio	1,0	<0,77	<0,77	<0,77	<0,77
Cromo	5,0	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50
Mercurio	0,2	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Plata	5,0	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004
Plomo	5,0	<0,90	<0,90	<0,90	<0,90
Selenio	1,0	0,0055	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Compuestos orgánicos volátiles					
Benceno	0,5	<0,00015	<0,00012	<0,00015	<0,00017
Tolueno	14,4	0,00024	0,00017	0,00028	0,00037
Cloruro de Metileno	8,6	<0,00015	<0,00012	<0,00015	<0,00017
Etil Metil Cetona	200,0	<0,00015	<0,00012	<0,00015	<0,00017
Isobutanol	36,0	<0,00015	<0,00012	<0,00015	<0,00017

(*Norma Oficial Mexicana, 2005, pp. 8-9)

Los valores expresados en la Tabla 3.10 indican que existe una repetitividad de resultados entre las mezclas y sus respectivas repeticiones tanto en la concentración de metales como en la de compuestos orgánicos volátiles, excepto en las mezclas M1 y M4 cuya concentración de selenio y de bario, respectivamente, presenta cierta variación, esto puede deberse a una ligera diferencia en la solubilidad de estos metales entre una muestra y otra, quedando retenidos en la matriz en unos casos y pasado a formar parte del lixiviado en otros.

Los resultados de la caracterización toxicológica indican que la mezcla de pinturas estabilizada/solidificada con cemento y cal no puede ser considerada como tóxicas porque la concentración de metales y de compuestos orgánicos volátiles está por debajo del límite permitido (Norma Oficial Mexicana, 2005, pp. 8-9). Sin embargo, las concentraciones determinadas pueden servir para analizar la acción del

cemento y la cal en las mezclas, comparándolas con los resultados de la caracterización toxicológica inicial de la mezcla de pinturas, con el objetivo de comprobar una efectiva disminución de la toxicidad como producto del proceso de estabilización/solidificación (LaGrega et al., 2001, p. 678; Martínez, 2005, p. 101).

La Figura 3.13 corresponde a un gráfico de columnas que expone las concentraciones del arsénico, tolueno e isobutanol obtenidas en la caracterización toxicológica inicial de los desechos de pintura así como en la caracterización de las mezclas con pintura, cemento y cal.

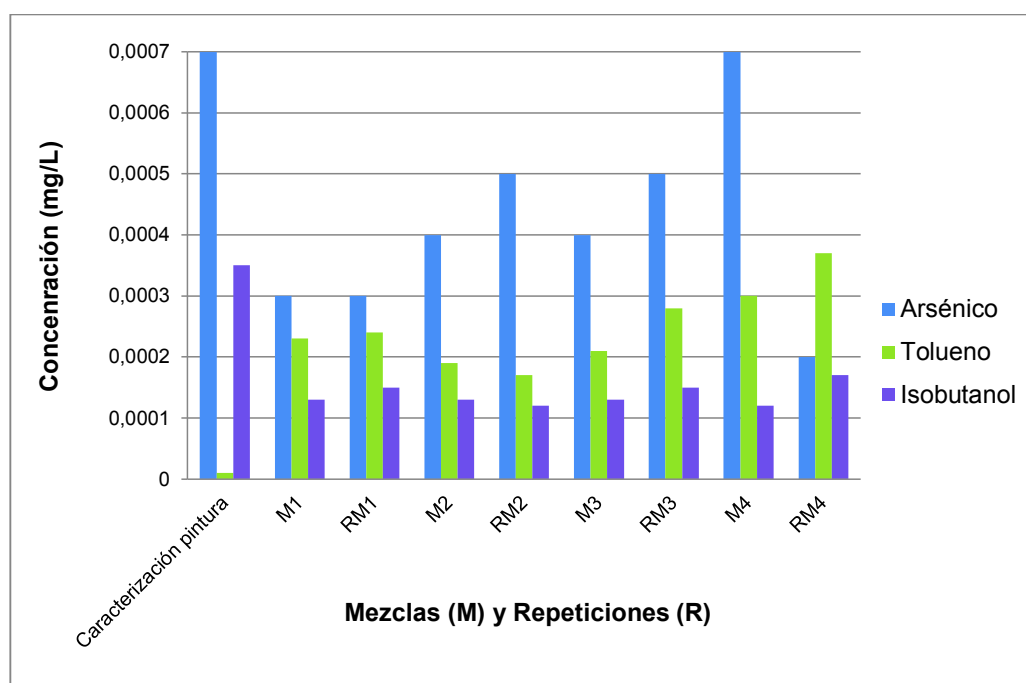


Figura 3.13. Concentración de arsénico, tolueno e isobutanol, en la caracterización de pinturas y en las mezclas (M) y su respectiva repetición (R), de la estabilización/solidificación con cemento y cal

Con respecto a los compuestos orgánicos volátiles, en la Figura 3.13 se puede observar que la concentración de tolueno obtenida en la caracterización de la mezcla de desechos de pintura fue $< 0,00001$ mg/L, este valor no se reflejó en la caracterización de las mezclas solidificadas ya que en ellas se encontró un contenido más alto del compuesto. Esto pudo deberse a la volatilización del tolueno contenido en las pinturas, lo que no sucedió en las mezclas con el cemento y la cal.

La mezcla con la menor cantidad de tolueno es la M2 con 0,00019 mg/L, las composiciones del resto de compuestos orgánicos responden al límite de detección del método y del equipo razón por la cual no se puede interpretar los resultados correspondientes incluso no se puede analizar el diseño experimental.

La concentración de isobutanol en la mezcla de pinturas fue 0,00035 mg/L, en la caracterización de las mezclas solidificadas se encontró que su concentración estaba por debajo del límite de detección del método y del equipo, esto permite suponer que este compuesto volatilizó en el proceso de fraguado del cemento o que se quedó atrapado en la matriz solidificada, aunque se conoce que el cemento y la cal no son una mezcla funcional para la disposición final de desechos que contienen compuesto orgánicos ya que interfieren en el proceso de fraguado y disminuyen las propiedades mecánicas de los sólidos obtenidos, para eliminar estas interferencias se recomienda utilizar otros componentes como arcillas modificadas o cenizas volantes que sí son reactivas con estos compuestos (LaGrega et al., 2001, p. 689). Más adelante se analizará la adición de las cenizas en las mezclas.

Los valores correspondientes a la concentración de metales pesados permiten analizar que la mezcla de desechos de pintura contenía una concentración de 0,007 mg/L de arsénico y luego de haberla estabilizado y solidificado se produjo una disminución en todas las mezclas siendo la más eficiente la mezcla M1 que redujo la concentración de este metal a 0,0003 mg/L, como se puede observar en la Figura 3.13. La reducción de la concentración en el arsénico se traduce a la insolubilidad que le confieren el cemento y la cal al formar un sólido impermeable evitando que forme parte del lixiviado (LaGrega et al., 2001, p. 678).

Según la evaluación del diseño experimental realizada en el software Statgraphics, las relaciones pintura/cemento y cal/cemento no presentan diferencia estadísticamente significativa sobre la concentración de arsénico con un grado de confianza del 95 % como se aprecia en las Figuras 3.14 y 3.15. Esto quiere decir que los dos factores no influyen en la concentración final de arsénico en las mezclas estabilizadas/solidificadas, por lo que se puede utilizar cualquier composición para tener una concentración dentro del límite permitido.

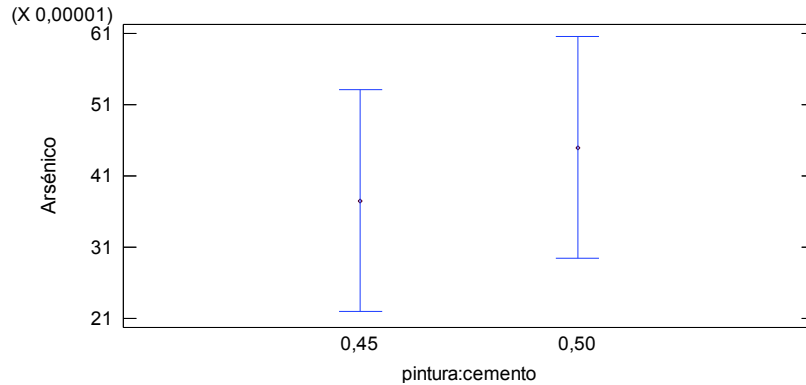


Figura 3.14. Concentración de arsénico en función de las relaciones pintura:cemento de la mezcla de pintura estabilizada/solidificada con cemento y cal

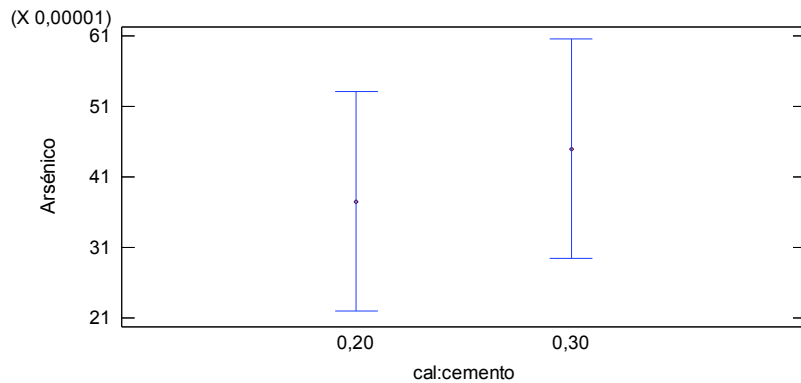


Figura 3.15. Concentración de arsénico en función de las relaciones cal:cemento de la mezcla de pintura estabilizada/solidificada con cemento y cal

Las tendencias mostradas en las Figura 3.14 y 3.15 indican las relaciones pintura/cemento y cal/cemento tienen medias muy próximas, razón por la que no se puede determinar cuál es mejor, adicionalmente, según la evaluación del diseño experimental, no hay interacción entre los dos factores, por lo que se puede concluir que independientemente de las composiciones que se usen, con la estabilización/solidificación siempre se va a reducir la concentración de arsénico respecto a la caracterización inicial del desecho.

Ruiz (2014) encontró que mediante las relaciones del 40 % y del 50 % de líquido con respecto al sólido, combinadas con la relación cal/cemento del 25 %, respectivamente, la estabilización/solidificación del extracto lixiviado de los polvos de acería surgió efecto en la disminución de la concentración de arsénico de un 0,7 mg/L a un 0,4 mg/L (p. 117), esto evidencia la independencia en las relaciones utilizadas y la efectividad del proceso de solidificación.

La Figura 3.16 corresponde a un gráfico de columnas que expone la concentración de bario obtenida en la caracterización toxicológica inicial de los desechos de pintura así como en la caracterización de las mezclas con pintura, cemento y cal.

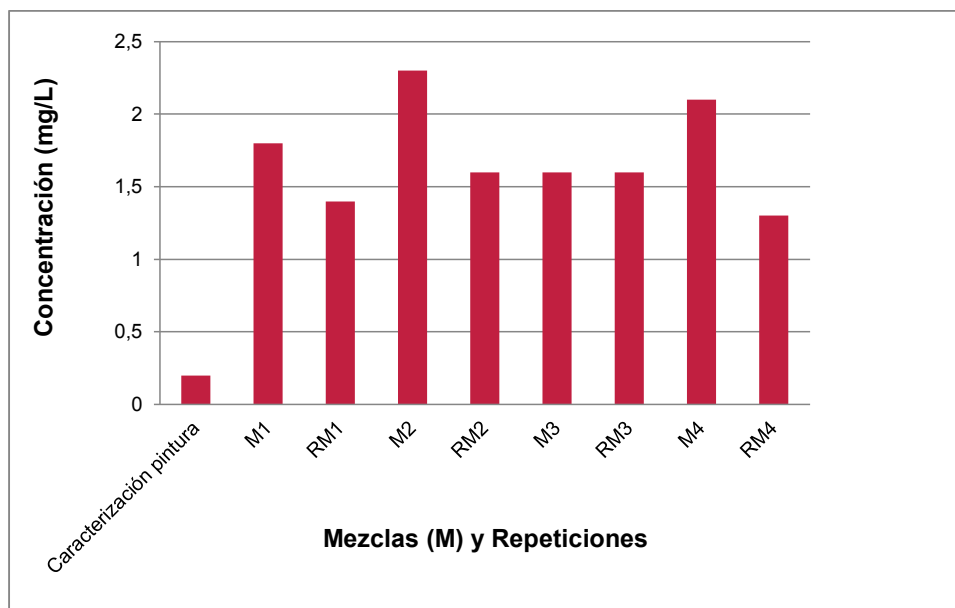


Figura 3.16. Concentración de bario en la caracterización de pinturas y en las mezclas (M) y su respectiva repetición (R), de la estabilización/solidificación con cemento y cal

En la Figura 3.16 se puede observar que la cantidad de bario contenida en los desechos de pintura ($< 0,2$ mg/L) es menor a la concentración obtenida en la caracterización de las mezclas solidificadas. Esto indica un aporte de bario por parte del cemento, a pesar de no haber hecho una caracterización, se conoce que el sulfato de bario ($BaSO_4$) es un agregado que se adiciona al cemento para proporcionarle blindaje a la radiación (Dirección General de Desarrollo Minero, 2014, p. 25). A pesar del aporte, la cantidad de este metal sigue cumpliendo con los valores permitidos. Por otro lado, al no disponer de una base de comparación, no se puede analizar el diseño experimental en cuanto al bario.

Los valores de concentración de los demás metales como son el cadmio, cromo, mercurio, plata, plomo y selenio, de las mezcla (M) y sus repeticiones (R), no permiten realizar un análisis del comportamiento del cemento y la cal dentro de la mezcla ni tampoco la evaluación del diseño experimental ya que corresponden al límite de detección del método y del equipo y no se puede saber si fueron retenidos

en la matriz solidificada, solo queda por manifestar que están por debajo de los límites máximos permisibles. Aunque estudios demuestran que el cemento y la cal conforman una mezcla funcional para la estabilización/solidificación de desechos que contiene metales pesados (LaGrega et al., 2001, p. 689). Esto lo demuestra Ruiz (2014) al obtener una disminución en la concentración de metales pesados como arsénico, cadmio, níquel, plomo y zinc luego de haber solidificado el lixiviado obtenido en el ensayo TCLP de polvos de acería previamente caracterizado mediante relaciones líquido/sólido del 40 % y cal/cemento del 25 % (117).

En la Tabla 3.11 se muestran los resultados de la caracterización toxicológica de las mezclas de la estabilización/solidificación de pinturas con cemento, cal y cenizas.

Tabla 3.11. Caracterización toxicológica de las mezclas (M) y su respectiva repetición (R), de la estabilización/solidificación de pinturas con cemento, cal y cenizas

Parámetro	Límite máximo permisible (mg/L)*	Concentración del extracto TCLP (mg/L)			
		M1	M2	M3	M4
Metales pesados					
Arsénico	5,0	0,0007	0,0006	0,0003	0,0003
Bario	100,0	3,2	2,8	5,2	3,9
Cadmio	1,0	<0,77	<0,77	<0,77	<0,77
Cromo	5,0	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50
Mercurio	0,2	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Plata	5,0	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004
Plomo	5,0	<0,90	<0,90	<0,90	<0,90
Selenio	1,0	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Compuestos orgánicos volátiles					
Benceno	0,5	<0,00013	<0,00014	<0,00013	<0,00013
Tolueno	14,4	0,00016	0,00023	0,00030	0,00028
Cloruro de Metileno	8,6	<0,00013	<0,00014	<0,00013	<0,00013
Etil Metil Cetona	200,0	<0,00013	<0,00014	<0,00013	<0,00013
Isobutanol	36,0	<0,00013	<0,00014	<0,00013	<0,00013
Cloruro de Metileno	8,6	<0,00013	<0,00014	<0,00013	<0,00013

(*Norma Oficial Mexicana, 2005, pp. 8-9)

Tabla 3.11. Caracterización toxicológica de las mezclas (M) y su respectiva repetición (R), de la estabilización/solidificación de pinturas con cemento, cal y cenizas (**continuación...**)

Parámetro	Límite máximo permisible (mg/L)*	Concentración del extracto TCLP (mg/L)			
		RM1	RM2	RM3	RM4
Metales pesados					
Arsénico	5,0	<0,0002	0,0004	0,0005	0,0003
Bario	100,0	2,8	3,9	7	1,8
Cadmio	1,0	<0,77	<0,77	<0,77	<0,77
Cromo	5,0	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50
Mercurio	0,2	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Plata	5,0	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004
Plomo	5,0	<0,90	<0,90	<0,90	<0,90
Selenio	1,0	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Compuestos orgánicos volátiles					
Benceno	0,5	<0,00013	<0,00012	<0,00014	<0,00013
Tolueno	14,4	0,00020	0,00026	0,00033	0,00027
Cloruro de Metileno	8,6	<0,00013	<0,00012	<0,00014	<0,00013
Etil Metil Cetona	200,0	<0,00013	<0,00012	<0,00014	<0,00013
Isobutanol	36,0	<0,00013	<0,00012	<0,00014	<0,00013
Cloruro de Metileno	8,6	<0,00013	<0,00012	<0,00014	<0,00013

(*Norma Oficial Mexicana, 2005, pp. 8-9)

En la Tabla 3.11 se puede observar que las concentraciones de bario varían en cada mezcla (M) y su respectiva repetición (R). También se observa una variación en el contenido de arsénico entre la mezcla M1 y su repetición RM1, como ya se explicó anteriormente, esto puede ocurrir debido a una ligera diferencia de solubilidad entre una muestra y otra.

Todas las muestras cumplen con los límites máximos permisibles tanto en metales pesados como en compuestos orgánicos volátiles después de llevarse a cabo el ensayo de extracción TCLP. Cabe indicar que las cenizas aportan tan solo una pequeña cantidad de metales pesados a la mezcla, esto se puede afirmar por los resultados obtenidos en la caracterización toxicológica de las cenizas, los mismos que se muestran en la Tabla 3.7. Entre los metales que aportan las cenizas

están el mercurio y el arsénico.

La Figura 3.17 corresponde a un gráfico de columnas que expone las concentraciones del arsénico, tolueno e isobutanol obtenidas en la caracterización toxicológica inicial de los desechos de pintura y de las cenizas volantes así como en la caracterización de las mezclas con pintura, cemento, cal y cenizas.

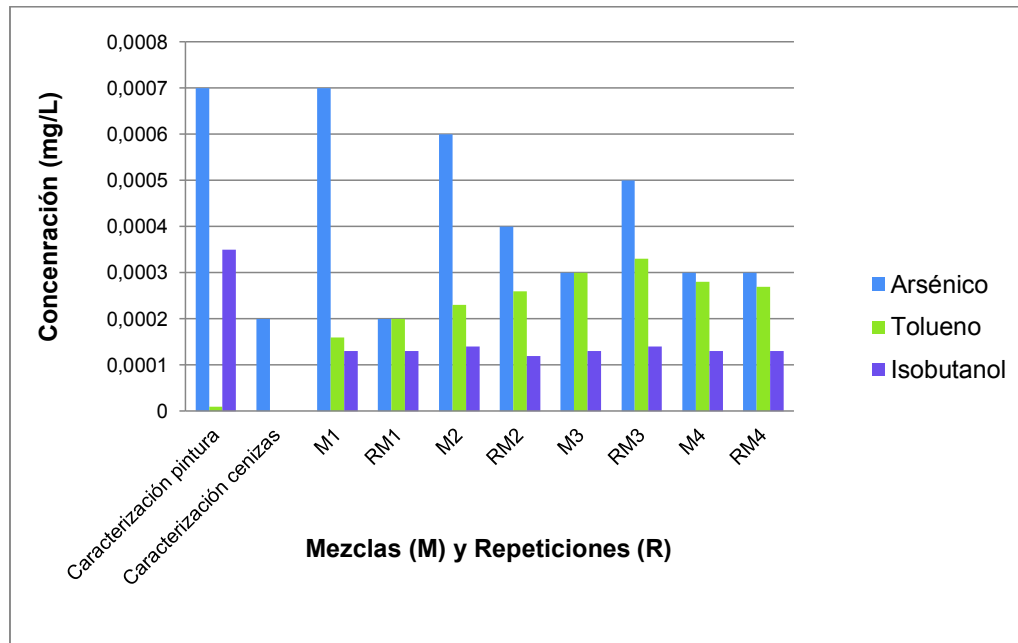


Figura 3.17. Concentración de arsénico, tolueno e isobutanol, en la caracterización de pinturas, cenizas volantes y en las mezclas (M) y su respectiva repetición (R), en la estabilización/solidificación de pinturas con cemento y cal

De manera similar a la caracterización de las mezclas con cemento, cal y pinturas, en la Figura 3.17 se puede observar que el contenido de tolueno en las mezclas solidificadas es mayor que la concentración determinada en la mezcla de pinturas, las composiciones del resto de compuestos orgánicos responden al límite de detección del método y del equipo. Adicionalmente, se puede ver que la concentración de isobutanol también está por debajo del límite de detección a diferencia de la concentración en la mezcla de pinturas. Por los datos obtenidos no se puede evidenciar el efecto de las cenizas volantes sobre los compuestos orgánicos volátiles pero se conoce que las cenizas son recomendables para la disposición final de residuos orgánicos porque el carbón no calcinado puede adsorber este tipo de compuestos (LaGrega et al., 2001, pp. 691-692).

Por los datos que se observan en la Figura 3.17, se ratifica que el contenido de arsénico en las mezclas se reduce, la mezcla M4 es la más eficiente ya que reduce la concentración de este metal de 0,0007 mg/L a 0,0003 mg/L (LaGrega et al., 2001, p. 689; Ruiz, 2014, p. 117). Con la adición de cenizas no se nota mayor influencia en la concentración de arsénico en comparación con la mezcla de cemento y cal.

La Figura 3.18 corresponde a un gráfico de columnas que expone la concentración de bario obtenida en la caracterización toxicológica inicial de los desechos de pintura y de las cenizas volantes así como en la caracterización de las mezclas con pintura, cemento, cal y cenizas.

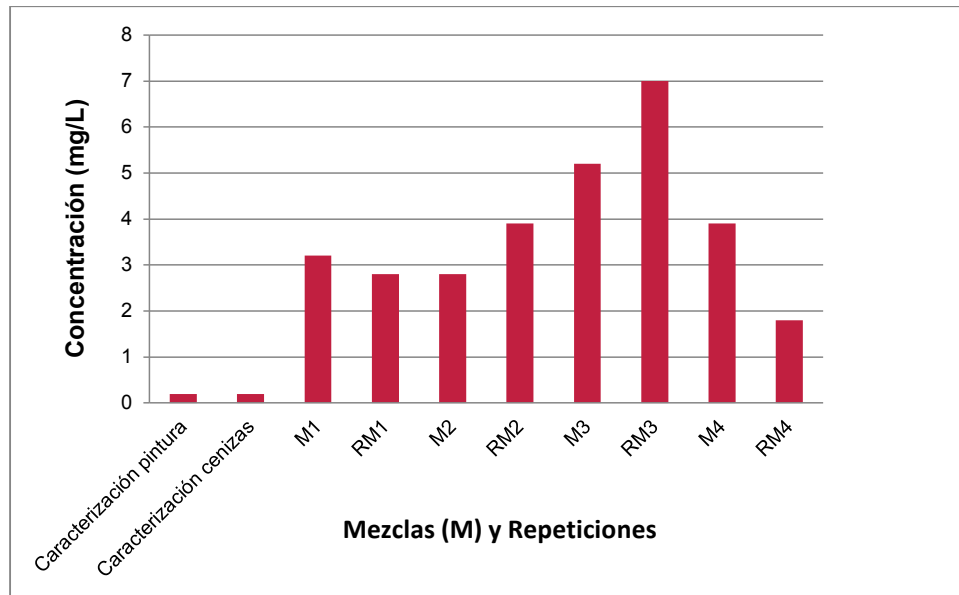


Figura 3.18. Concentración de bario, en la caracterización de pinturas, cenizas volantes y en las mezclas (M) y su respectiva repetición (R), en la estabilización/solidificación de pinturas con cemento, cal y cenizas

Mediante el gráfico de la Figura 3.18 se puede analizar el aporte de bario por parte del cemento empleado en la mezcla, esto se puede evidenciar debido a que tanto la mezcla de los desechos de pintura como las cenizas volantes contienen una pequeña cantidad de este metal según su caracterización toxicológica. Cabe considerar que el bario puede pasar como lixiviado y contaminar el medio ambiente pero su composición está por debajo del límite permitido. La mezcla M3 es la que contiene más cantidad de este metal.

De manera similar a la propuesta de estabilización/solidificación con cemento y cal, la concentración de cadmio, cromo, mercurio, plata, plomo y selenio, no pueden ser analizados ya que corresponden al límite de detección del método y del equipo y no se puede conocer si estos quedaron atrapados en la matriz solidificada compuesta por cemento, cal y cenizas, solo queda por manifestar que están por debajo de los límites máximos permisibles, pero se conoce que estos reactivos forman una mezcla funcional no solo para retener metales pesados en la matriz sino también para brindar a los sólidos una buena resistencia a la compresión (LaGrega et al., 2001, pp. 691-692, Romero y Vargas, 2009, p. 89, Burgos et al., 2001, p. 69).

3.2.4 SELECCIÓN DE LA MEJOR PROPUESTA DE ESTABILIZACIÓN Y SOLIDIFICACIÓN

La selección de las mejores mezclas se hizo sobre la base del análisis estadístico del diseño experimental para la mezcla con cemento, pintura y cal, así como también del análisis de la influencia de la inclusión de cenizas en la mezcla.

Los resultados obtenidos en la presente investigación para la estabilización/solidificación con cemento, cal y pinturas permitieron determinar que la mezcla M2 con las relaciones pintura/cemento: 0,50 y cal/cemento: 0,30 tiene el menor contenido de humedad con el 1,67 %, la menor conductividad con 2,83 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y la mejor resistencia a la compresión con 1 301,53 kPa. Además, reduce la cantidad de arsénico de 0,007 mg/L a 0,0004 mg/L, y libera la menor concentración de tolueno, 0,00019 mg/L.

Para la estabilización/solidificación con cemento, cal, pintura y cenizas, se encontró que la mezcla M1 con las relaciones pintura/cemento: 0,45, cal/cemento: 0,20 y cenizas/cemento: 0,10, no tiene el menor contenido de humedad (1,67 %), tampoco la menor conductividad (0,62 $\mu\text{S}/\text{cm}$) pero sí la mejor resistencia a la compresión con 1 725,95 kPa de entre todas las mezclas. Además, en cierta forma no reduce el arsénico pero libera la menor cantidad de Tolueno (0,00016 mg/L).

Para seleccionar cuál de los dos tratamientos es el mejor, se debe tomar en cuenta algunas observaciones que se hicieron mientras se formaron las mezclas solidificadas:

- La pintura no reacciona de la misma manera con el cemento como éste lo hace con el agua, por esta razón, el fraguado del cemento duró más tiempo y las mezclas tardaron en secarse aproximadamente 15 días, lo que normalmente una mezcla con agua tardaría 1 día en fraguar.
- La ceniza les da a las mezclas mayor funcionalidad, les confiere mayor rapidez de fraguado, disminuye la conductividad y aumenta su resistencia a la compresión.

Por lo anteriormente analizado, La mezcla M1 con las relaciones pintura/cemento: 0,45; cal/cemento: 0,20 y cenizas/cemento: 0,10, es seleccionada como la mejor propuesta de estabilización/solidificación de proyecto.

3.3 DISEÑO DE LA PLANTA DE ESTABILIZACIÓN/SOLIDIFICACIÓN DE LOS DESECHOS DE PINTURA

3.3.1 BALANCE DE MASA

Para realizar el balance de masa se consideró que la capacidad de procesamiento de la planta es de 37,5 m³/día y que la mejor propuesta de estabilización/solidificación es aquella comprendida por las relaciones (w/w) de pintura/cemento: 0,45, cal/cemento: 0,20 y cenizas/cemento: 0,10. El proceso de estabilización/solidificación de la mezcla de desechos de pintura consta de las siguientes etapas: almacenamiento, mezclado y disposición en celdas de confinamiento. El balance de masa para un día de operación de 8 horas, se expone en la Figura 3.19 en la que se muestra las corrientes de entrada y salida de cada material a la etapa respectiva. Diariamente se mezclan: 35,4 t de cemento +

7,1 t de cal + 3,5 t de cenizas + 15,9 t de pinturas obteniendo un total de 61,9 t de producto estabilizado/solidificado. Cabe indicar que la planta opera 22 días al mes. Los cálculos para el balance de masa se exponen detalladamente en la sección All.1 del Anexo II.

3.3.2 BALANCE DE ENERGÍA

El proceso de estabilización/solidificación de la mezcla de desechos de pintura es un proceso de mezclado en donde no se requiere energía calórica sino tan solo energía eléctrica. Es por esta razón que el balance de energía se basa únicamente en la energía eléctrica que requieren los motores de los equipos descritos en la Tabla 3.12 para su funcionamiento.

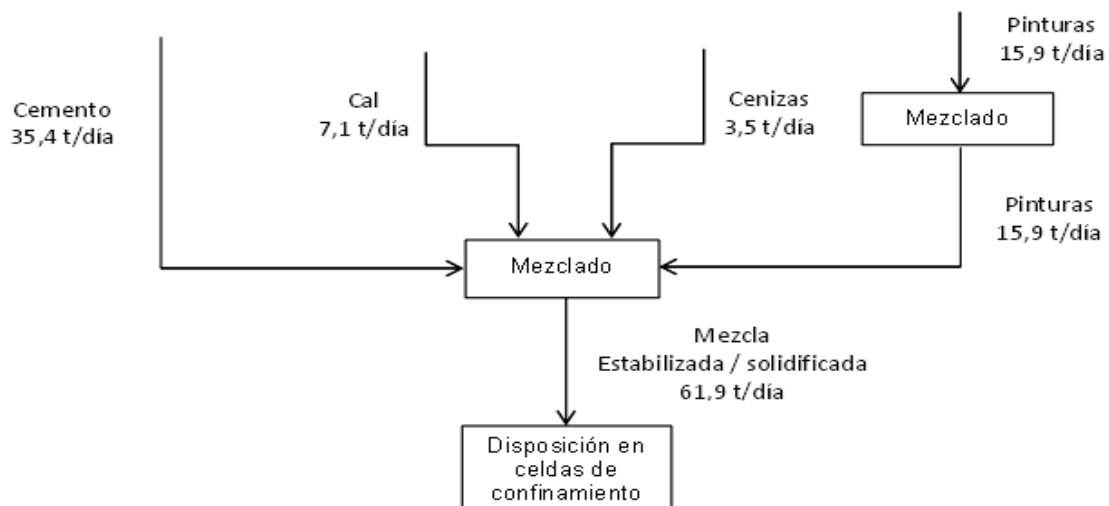


Figura 3.19 Balance de masa del proceso de estabilización/solidificación de la mezcla de desechos de pintura

Tabla 3.12. Consumo de energía eléctrica en un día de proceso de estabilización/solidificación de la mezcla de desechos de pintura

Equipo	Consumo de energía (kW.h)
Sistema de agitación del tanque de almacenamiento de los desechos de pintura	64 284,00
Sistema de agitación del tanque mezclador	2 050,45
Bomba centrífuga	21,16
Banda transportadora	88,00

El tiempo de operación de cada uno de los equipos es aquel que se definió en el dimensionamiento, el mismo que se expone en el Anexo III.

3.3.3 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO PROPUESTO PARA LA ESTABILIZACIÓN/SOLIDIFICACIÓN DE LOS DESECHOS DE PINTURA

En la Figura 3.20 se muestra el diagrama de flujo correspondiente al balance de masa del proceso de estabilización/solidificación de la mezcla de desechos de pinturas. En el gráfico se esquematizan los equipos y se exponen las características de las corrientes del proceso.

Los equipos necesarios para el proceso se presentan en la Tabla 3.13 en donde se describe la nomenclatura correspondiente al diagrama de flujo presentado en la Figura 3.20.

Tabla 3.13. Nomenclatura de los equipos del diagrama de flujo del proceso de estabilización/solidificación de los desechos de pintura

Nomenclatura	Equipo
TM-101	Tanque de almacenamiento de la mezcla de desechos de pintura
TM-102	Tanque mezclador
S-201	Silo de almacenamiento de cemento
S-202	Silo de almacenamiento de cenizas
S-203	Silo de almacenamiento de cal
BT-201	Banda transportadora
B-101	Bomba centrífuga
VM-101	Válvula manual

Sobre la base del diagrama de flujo, el proceso de estabilización/solidificación de los desechos de pintura se describe a continuación:

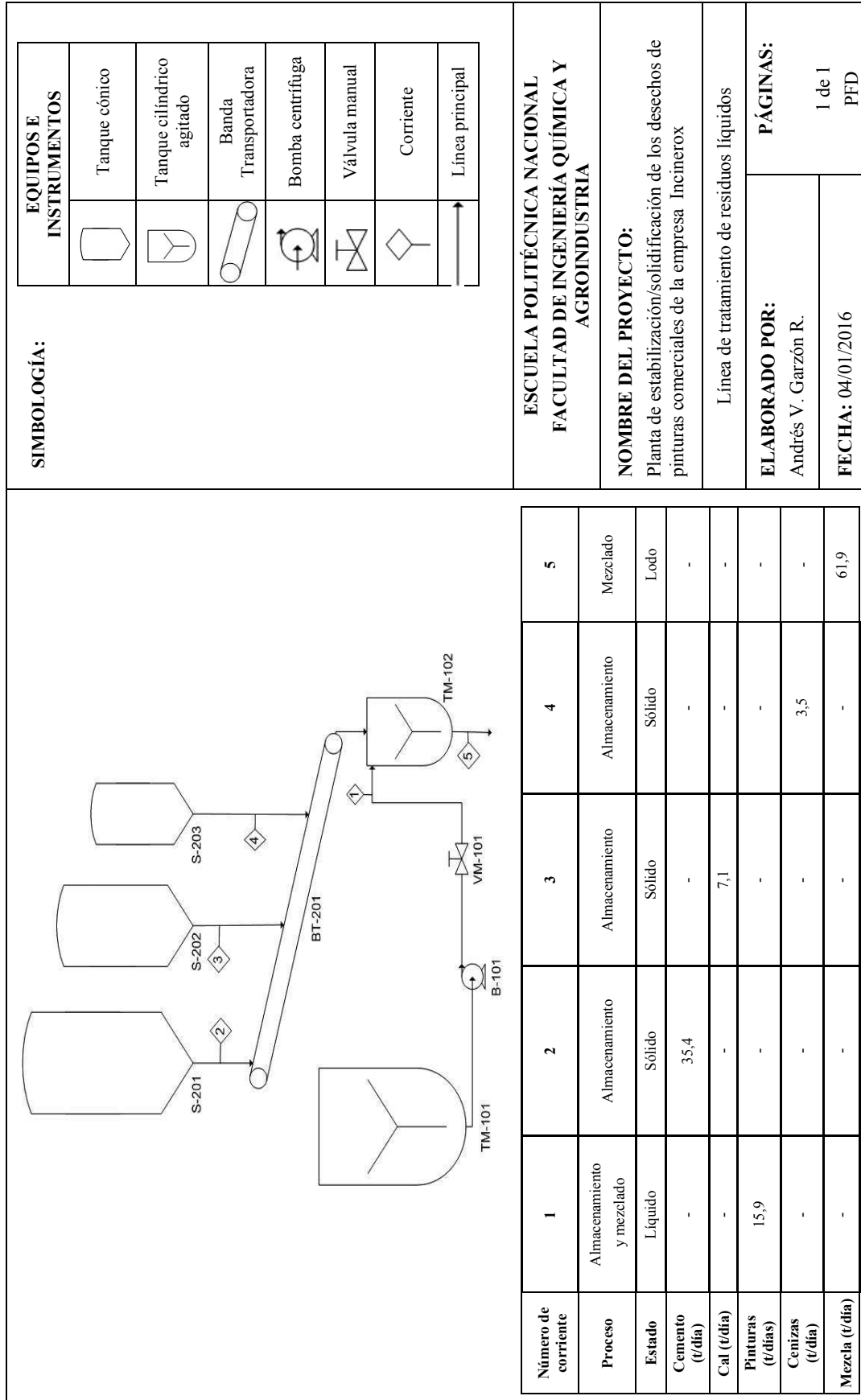


Figura 3.20. Diagrama de flujo del proceso de estabilización/solidificación de la mezcla de desechos de pinturas

Los desechos de pintura llegan semanalmente hasta Incinerox en tarros de 0,946, 3,785 y 18,930 L, además de bidones de 55 galones. Este material tendrá que ser descargado conforme vaya llegando en el tanque agitado de almacenamiento diseñado para contener estos desechos durante un mes para abastecer la producción durante este tiempo de operación.

Los desechos de pintura se homogenizarán con un agitador de hélice instalado en el tanque durante 15 minutos a 120 rpm en un día de operación y se transportarán 15,6 m³ diarios de la mezcla con la ayuda de una bomba centrífuga. Las características de la bomba serán presentadas en la sección 3.3.4 cuando se expongan las especificaciones de los equipos.

Al principio de cada mes, se receptorán a granel, el cemento y la cal en silos de almacenamiento. Estos tanques también serán diseñados para un mes de operación. Las cenizas provienen del proceso de incineración que la empresa Incinerox realiza. Cada vez que se destruya algún objeto, las cenizas serán almacenadas en el silo diseñado para un mes de operación.

En un día de operación, los operarios tendrán que descargar el cemento, la cal y las cenizas desde su silo de almacenamiento para ser transportados mediante una banda transportadora hacia el tanque mezclador. La banda tiene sensor de peso de tal manera que se cumplan con los flujos indicados en la Tabla 3.14, los mismos que responden al balance de masa indicado en la sección 3.3.1.

Tabla 3.14. Cantidad de cemento, cal y cenizas a ser transportados hacia el tanque mezclador en un día de operación

Materia prima	Cantidad (t/día)
Cemento	35,4
Cal	7,1
Cenizas	3,5

La banda transportará los tres materiales en una hora de operación diaria. Este equipo estará comprendido por una banda multicapa ideal para el transporte de este tipo de materias primas. Las características de la banda serán presentadas

más adelante en la sección 3.3.4 cuando se expongan las especificaciones de los equipos.

Una vez cargadas todas las materias primas en el tanque mezclador, estas serán homogenizadas durante 25 minutos a 300 rpm mediante el agitador de turbina instalado en el equipo. El mezclador tiene la capacidad de 37,5 m³/día de mezcla estabilizada/solidificada para cumplir con la capacidad de la planta.

Una vez cumplido el tiempo de mezcla, el producto será descargado manualmente mediante la apertura de una compuerta de descarga en bidones con capacidad de 55 galones. Estos bidones llenos con la mezcla serán transportados para ser depositados en la celda de confinamiento cuyo diseño será detallado posteriormente.

3.3.4 ESPECIFICACIONES DE LOS EQUIPOS PARA LA PLANTA DE ESTABILIZACIÓN/SOLIDIFICACIÓN DE LOS DESECHOS DE PINTURA

Una vez realizado el balance de masa, se procede a diseñar los equipos necesarios para llevar a cabo el proceso cuyas especificaciones se exponen a lo largo de esta sección. El diseño de los equipos y los cálculos correspondientes se presentan en el Anexo III.

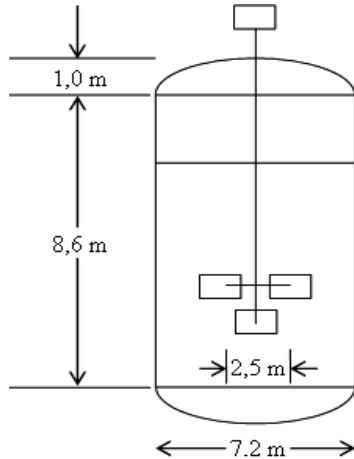
3.3.4.1 Tanque de almacenamiento de la mezcla de desechos de pinturas

En la Tabla 3.15 se presentan las especificaciones y el esquema del equipo.

Tabla 3.15. Especificaciones y esquema del tanque de almacenamiento de la mezcla de desechos de pintura

Parámetro	Unidad	Valor
Material	-	Acero Inoxidable
Volumen	m ³	343,2
Altura	m	8,6

Tabla 3.15. Especificaciones y esquema del tanque de almacenamiento de la mezcla de desechos de pintura (**continuación...**)

Diámetro	m	7,2
Espesor	mm	5,2
Altura de la tapa	m	1,0
Espesor de la tapa	mm	8,0
Tipo de agitador	-	Hélice de 3 palas
Velocidad	rpm	300
Diámetro del rodete	m	2,5
Altura del rodete desde fondo del tanque	m	3,2
Paso de la hélice	m	4,9
Potencia del motor	HP	15 700
Esquema del equipo:		
		

El sistema de agitación está comprendido por un agitador de hélice con 3 palas debido a que este tipo de agitadores son los más comunes, son los más baratos, sirven para trabajar en tanques de todo tipo de tamaño a velocidades entre 300 y 1 500 rpm, con sustancias de viscosidad hasta 1 000 cP y es el indicado para este tipo de mezcla (Palate y Villón, 2006, p. 20; Colina, 2013, p. 18).

3.3.5.2 Silos de almacenamiento

En la Tabla 3.16 se exponen las especificaciones de los silos y sus esquemas respectivos. Para cumplir con los requerimientos de la empresa Incinerox, las tapas de los tanques se diseñaron de forma cónica para una mejor descarga del material.

Tabla 3.16. Especificaciones y esquemas de los silos de almacenamiento del cemento, cal y cenizas

Parámetro	Unidad	Valor	Esquema del equipo
Silo de almacenamiento de cemento			
Material	-	Acero Inoxidable	
Volumen	m ³	280,3	
Altura	m	7,2	
Diámetro	m	7,2	
Espesor	mm	5,3	
Altura de la tapa	m	3,6	
Espesor de la tapa	mm	5,6	
Silo de almacenamiento de cal			
Material	-	Acero Inoxidable	
Volumen	m ³	87,1	
Altura	m	4,9	
Diámetro	m	4,9	
Espesor	mm	4,10	
Altura de la tapa	m	2,5	
Espesor de la tapa	mm	4,4	
Silo de almacenamiento de cenizas			
Material	-	Acero Inoxidable	
Volumen	m ³	114,6	
Altura	m	5,4	
Diámetro	m	5,4	
Espesor	mm	4,4	
Altura de la tapa	m	2,7	
Espesor de la tapa	mm	4,6	


3.3.5.3 Banda Transportadora

En la Tabla 3.17 se muestran las especificaciones y el esquema de la banda que transportará el cemento, la cal y las cenizas desde el respectivo silo de

almacenamiento hacia el tanque mezclador. En la Figura AIV.1 del Anexo IV se encuentra el catálogo respectivo.

La banda transportadora fue seleccionada considerando la disposición de los equipos en planta para determinar la distancia que tiene que recorrer la banda para transportar todo el material hacia el tanque mezclador.

Tabla 3.17. Especificaciones de la banda transportadora

Parámetro	Unidad	Valor			
Material multicapa	-	Carcasa: Base de poliéster/trama de poliamida Revestimiento: caucho			
Largo de la banda	m	30			
Ancho de la banda	mm	500			
Ángulo de inclinación	°	17			
Velocidad de la banda	m/s	1			
Capacidad de transporte	t/h	100			
Potencia	kW	4			
*Esquema del equipo:					
					
Modelo	Ancho de banda (mm)	Inclinación (°)	Velocidad de banda (m/s)	Capacidad de transporte(t/h)	Potencia(≤30m) (kilovatio)
B500	500	0-17	1.0-2.0	100-200	4-7.5

(*China Rock Crusher, 2011)

3.3.5.4 Tanque mezclador

En la Tabla 3.18 se exponen las especificaciones y el esquema del tanque mezclador.

Tabla 3.18. Especificaciones del tanque mezclador

Parámetro	Unidad	Valor
Material	-	Acero Inoxidable
Volumen	m ³	37,5
Altura	m	4,6
Diámetro	m	3,3
Espesor	mm	3,3
Altura de la tapa	m	0,5
Espesor de la tapa	mm	4,6
Tipo de agitador	-	Turbina de 6 palas
Velocidad	rpm	120
Diámetro del rodete	m	1,3
Altura del rodete desde fondo del tanque	m	1,7
Altura de las palas	m	0,4
Potencia del motor	HP	297,6
Esquema del equipo:		
<p>El diagrama muestra un tanque mezclador con un agitador central. Las dimensiones indicadas son: una altura total de 4,6 m desde el fondo del tanque hasta la parte superior de la tapa; un diámetro exterior de 3,3 m; una altura de la tapa de 0,5 m; y un diámetro del rodete de 1,3 m.</p>		

El sistema de agitación está comprendido por un agitador de turbina con 6 palas planas debido a que este tipo de agitadores sirven para trabajar a velocidades entre 30 y 400 rpm, con sustancias de viscosidad hasta 100 000 cP y es el indicado para este tipo de mezcla (Palate y Villón, 2006, p. 20; Colina, 2013, p. 18).

3.3.5.5 Bomba centrífuga

En la Tabla 3.19 se describen las características y el esquema de la bomba a emplearse en el transporte de la mezcla de desechos de pintura desde el tanque de almacenamiento hacia el tanque mezclador (Debem, 2015).

Tabla 3.19. Especificaciones de la bomba utilizada para el transporte de la mezcla de desechos de pintura desde el tanque de almacenamiento hasta el tanque mezclador

Parámetro	Unidad	Valor
Caudal de operación	m ³ /h	6
Potencia	HP	0,5
*Esquema del equipo:		

(*Debem, 2015)

Cabe mencionar que para el dimensionamiento de la bomba se consideró que las pérdidas friccionales y localizadas son despreciables.

De acuerdo a la caracterización de la mezcla de desechos de pintura, la densidad de la mezcla es de 1,022 g/cm³. La viscosidad también fue medida con la ayuda de un viscosímetro Brookfield LVT con el spindle 63 a 12 rpm dando como resultado una viscosidad de 500 cP. Bajo estas consideraciones y teniendo en cuenta que físicamente la mezcla no se presenta fluida pero tampoco es pesada como un lodo, la bomba que se expone en el catálogo de la Figura AIV.2 del Anexo II, es la apropiada para el transporte de las pinturas.

3.3.5.6 Tuberías para el transporte de la mezcla de desechos de pintura hacia el tanque mezclador

Las tuberías fueron dimensionadas y seleccionadas bajo los siguientes aspectos:

- Sólo se requieren tuberías para trasladar la mezcla de desechos de pintura desde el tanque de almacenamiento hacia el tanque mezclador.
- Las tuberías están comprendidas en una línea de succión, antes de la bomba, y en una línea de descarga, después de la bomba.
- La velocidad máxima con que se puede transportar el material en la tubería de succión es 1,83 m/s y la velocidad con la que se transporta el material por la tubería de descarga es 2,44 m/s (Perry y Green, 2008, p. 644).

En la Tabla 3.20 se muestran las características y el esquema de las tuberías por donde va a circular la mezcla de desechos de pintura desde el tanque de almacenamiento hasta el tanque mezclador y en la Figura AIV.3 del Anexo IV se encuentra el catálogo del que fueron seleccionadas (Tubacero, 2007, p. 37).

Tabla 3.20. Características de las tuberías por donde va a circular la mezcla de desechos de pintura

Parámetro	Unidad	Valor
Longitud	m	8,00
Diámetro de la línea de succión	mm	38,10
Diámetro de la línea de descarga	mm	31,75
Cédula	-	80S
Material	-	Acero inoxidable

Esquema*

El diagrama muestra una tubería cilíndrica en perspectiva. En el extremo izquierdo, se indica el diámetro exterior con la etiqueta 'Dext'. En el extremo derecho, se indica el diámetro nominal con la etiqueta 'NPS'. Las líneas de la tubería están representadas por líneas sólidas y punteadas para dar sensación de profundidad.

NPS	Diámetro Ext. (mm)	Espesor/ Masa			
		5S	10S	40S	80S
1 1/4	42.2	1.65 1.65	2.77 3.69	3.56 3.38	4.85 4.47
1 1/2	48.3	1.65 1.90	2.77 3.12	3.68 4.05	5.08 5.41

(*Tubacero, 2007, p. 37)

3.3.5.7 Válvula manual

La selección de la válvula manual se realizó mediante las siguientes consideraciones:

- Se requiere sólo una válvula manual en la tubería de descargar de la mezcla de desechos de pinturas al tanque mezclador.
- La selección de la válvula se hizo mediante el catálogo que se expone en la Figura AIV.4 del Anexo IV observando su diámetro nominal, el mismo que que debe coincidir con el diámetro de la tubería de descarga (Taval, 2015).

En la Tabla 3.21 se exponen las características y el esquema de la válvula de la línea de descarga para el transporte de la mezcla de desechos de pintura desde el tanque de almacenamiento hasta el tanque mezclador.

Tabla 3.21. Características y esquema de la válvula de descarga de la mezcla de desechos de pintura

Parámetro	Unidad	Valor
Flujo de descargar	m ³ /h	6,00
Diámetro nominal	mm	31,75
Material	-	Acero inoxidable
Tipo	-	Esférica
Operación	-	Manual

***Esquema:**

(*Taval, 2015)

3.3.5 DISTRIBUCIÓN DE LOS EQUIPOS EN LA PLANTA DE ESTABILIZACIÓN/SOLIDIFICACIÓN DE LOS DESECHOS DE PINTURA

En la Figura 3.21 se muestra la distribución de los equipos en la planta de proceso. En esta distribución no se tomó en cuenta el área administrativa ya que la empresa Incinerox tiene definida y construida esta área en un espacio de terreno específico. La descripción de los equipos que se exponen en la Figura 3.21 se presenta en la Tabla 3.22.

Tabla 3.22. Nomenclatura de los equipos y vehículos de la distribución en planta del proceso de estabilización/solidificación de los desechos de pintura

Nivel	Área	Cantidad	Equipo	Nomenclatura
1	Mezclado	1	Tanque de almacenamiento de la mezcla de desechos de pintura	TM-101
1	Mezclado	1	Tanque mezclador	TM-102
2	Almacenamiento	1	Silo de almacenamiento de cemento	S-201
2	Almacenamiento	1	Silo de almacenamiento de cenizas	S-202
2	Almacenamiento	1	Silo de almacenamiento de cal	S-203
2	Almacenamiento	1	Banda transportadora	BT-201
1	Mezclado	1	Montacargas	M-101
1	Mezclado	1	Bidón de acero inoxidable	BD-101
3	Vías de acceso	1	Volqueta	V-301
1	Mezclado	1	Pallet	P-101
1	Mezclado	1	Camión	C-101

Como se puede observar en la Figura 3.21, la planta constará de 3 niveles, esto se debe a la disposición del suelo de la empresa Incinerox en donde se instalará la planta de procesamiento. Esta disposición ayudará al almacenamiento de las materias primas, al proceso de mezcla y a la descarga de producto terminado.

A nivel del piso, es decir, en el primer nivel, estarán ubicados:

- a) El tanque mezclador.- Este equipo estará ubicado a 1,5 m de altura con respecto al piso, para facilitar la descarga de la mezcla estabilizada/solidificada comprendida por el cemento, cal, cenizas y pinturas.

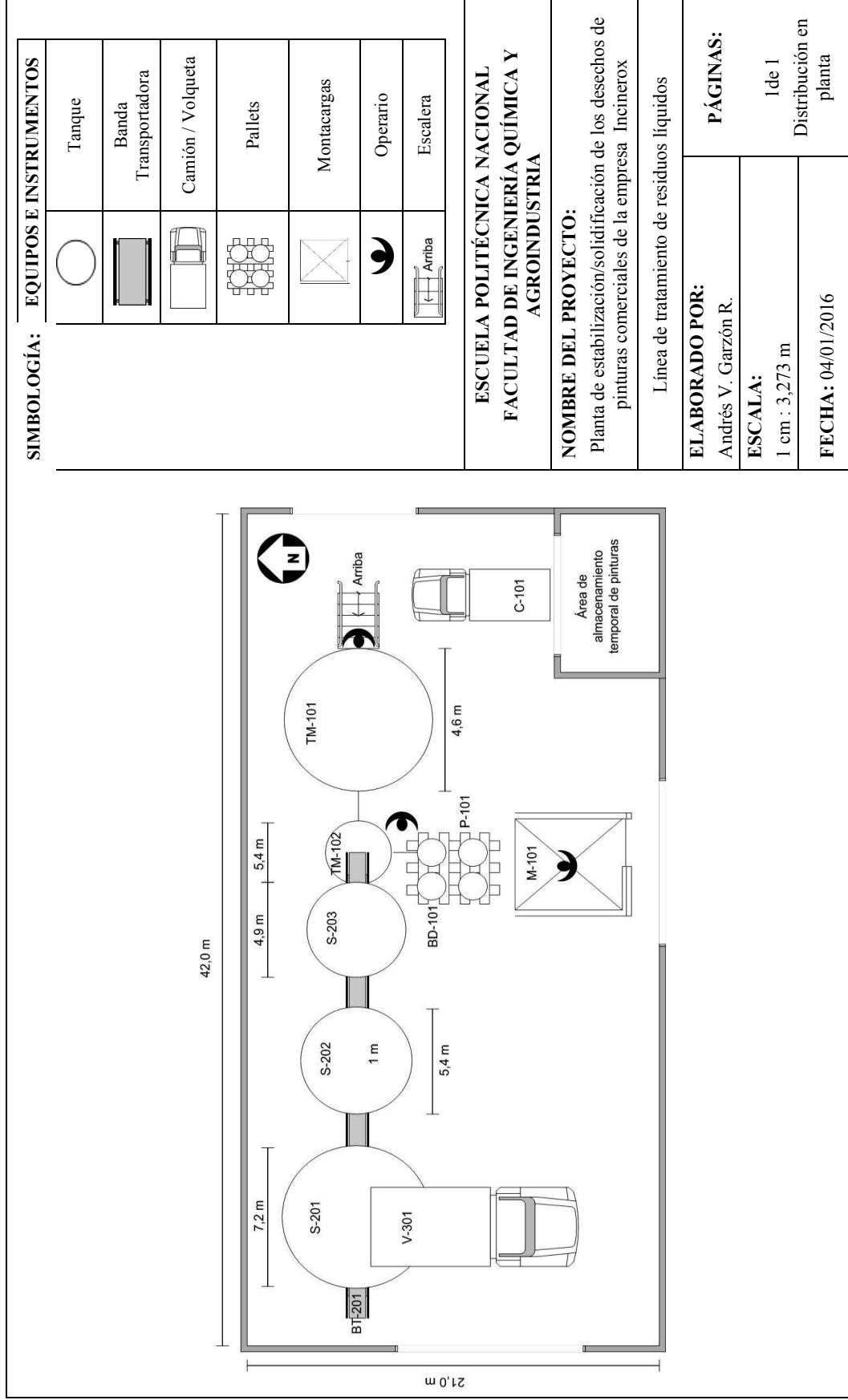


Figura 3.21. Distribución de los equipos en la planta de estabilización/solidificación de la mezcla de desechos de pinturas

- b) El tanque de almacenamiento de desechos de pintura.- Este equipo estará ubicado a nivel del piso ya que las pinturas serán bombeadas hacia el tanque mezclador.

En el segundo nivel, estarán colocados los silos de almacenamiento del cemento, cal y cenizas, todos ubicados a 1,5 m con respecto al piso (techo del primer nivel) para facilitar la descarga de cada uno de estos materiales y poder ser transportados hacia el tanque mezclador, el mismo que se encuentra en el primer nivel.

El tercer nivel corresponde a las vías de acceso de las volquetas que descargarán el material en los silos que se encuentran en el segundo piso.

3.4 DISEÑO DE LA CELDA DE CONFINAMIENTO PARA EL PRODUCTO ESTABILIZADO/SOLIDIFICADO

La celda de confinamiento, el sistema de sellado de la celda y el sistema de recolección de lixiviados fueron diseñados bajo el procedimiento descrito en el capítulo 2.4 y los cálculos se encuentran detallados en el Anexo V.

3.4.1 ESPECIFICACIONES DE LA CELDA DE CONFINAMIENTO

Los siguientes aspectos fueron considerados para el diseño de la celda de confinamiento:

- La celda constará de 15 pisos o niveles, cada piso medirá 1 m de altura (Jaramillo, 2002, p. 119).
- Los 15 pisos serán llenados en 5 años, lo que indica que 1 piso será llenado en 4 meses de operación.
- En 4 meses se habrán confinado 3 300 m³ de mezcla ocupando 15 852 bidones debido a que cada bidón contiene 0,21 m³.

- En cada piso, los bidones serán dispuestos en filas: 147 serán colocados en el sentido horizontal y 108 en el sentido vertical.
- Se conoce que un bidón tiene 88 cm de alto y 55 cm de diámetro, por lo que las dimensiones de la celda quedan definidas en 81 m de largo y 59 m de ancho.
- La altura de cada nivel está comprendida por 88 cm que es la altura de los bidones, más 12 cm que corresponden a la altura del piso del nivel subsiguiente como se indica en el esquema de la Figura 3.22
- La celda será construida de hormigón armado reforzado con barras de acero antisísmico que sirvan de soporte y puedan prevenir desastres naturales.
- Los espacios libres entre los bidones serán rellenos con hormigón armado.

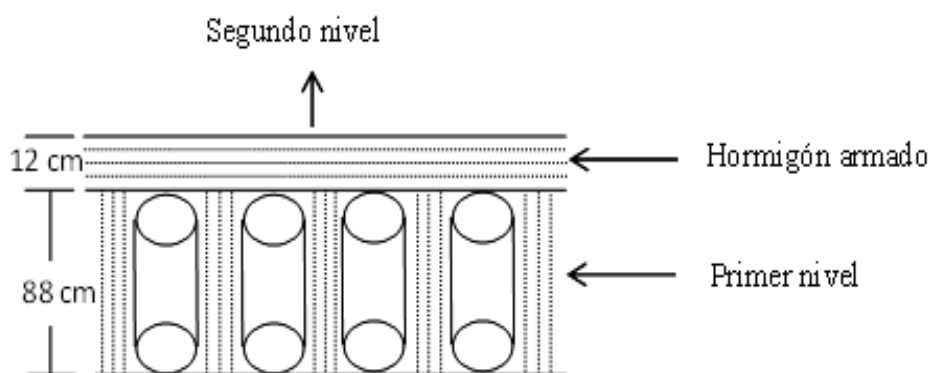


Figura 3.22. Esquema de la altura de cada nivel de la celda de disposición final de la mezcla de desechos de pintura

En la Tabla 3.23 se resumen las especificaciones de la celda de confinamiento.

Tabla 3.23. Especificaciones de la celda de confinamiento

Parámetro	Unidad	Valor
Altura	m	15
Largo	m	81
Ancho	m	59
Área	m ²	4 779
Volumen	m ³	71 685
Pisos/niveles	m	15
Tiempo de vida útil	años	5

3.4.2 SISTEMA DE SELLADO DE LA CELDA Y RECOLECCIÓN DE LIXIVIADOS

Para la disposición final de la mezcla de desechos de pintura estabilizada, se ha elegido un sistema de sellado de la celda de confinamiento comprendido por capas múltiples, el mismo que se describe a continuación y se muestra gráficamente en la Figura 3.23.

El lixiviado atravesará primero una zona de filtrado que corresponde a una geomembrana que es un polímero prácticamente impermeable. La membrana medirá 2 mm de grosor y será hecha de polietileno de alta densidad, HDPE (LaGrega et al., 2001, p. 830).

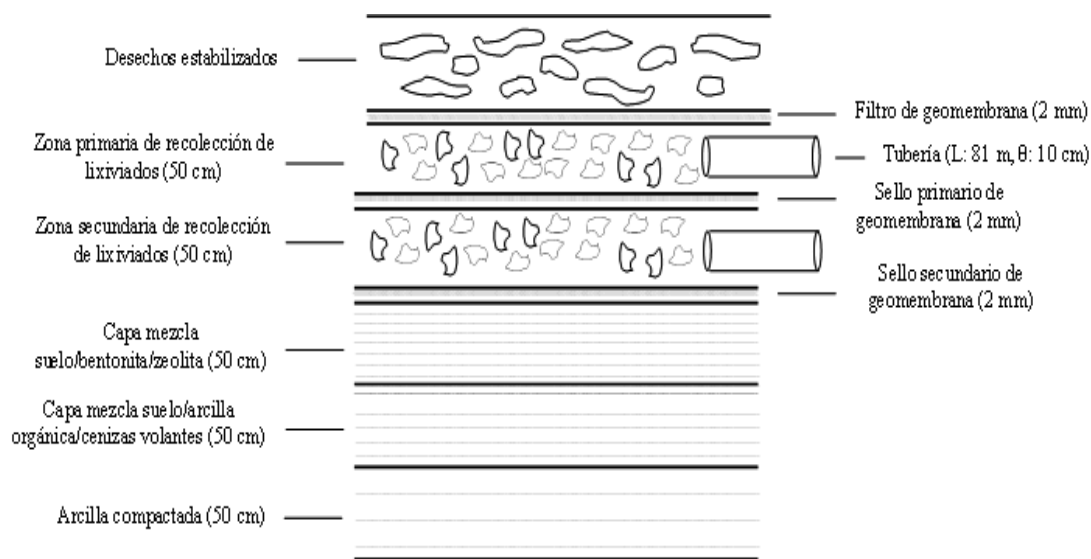


Figura 3.23. Esquema del sistema de sellado multilaminar para la celda de disposición final de la mezcla de desechos de pintura estabilizada

La geomembrana separará a la mezcla de desechos de pintura estabilizada/solidificada de una zona de drenaje libre rellena de piedras que ocuparán 50 cm de altura (Ministerio de Fomento, 2001, p. 12) en donde se colocarán tuberías primarias de recolección de lixiviados que desembocarán directamente en una piscina cuyo diseño se presentará más adelante. Las tuberías serán perforadas cada 10 cm de longitud para que los lixiviados puedan fluir a través de estos orificios de 0,5 in de diámetro (Torres, 2009, p. 215). Debido al

área de la celda, se colocarán 9 tuberías de 81 m de longitud y 10 cm de diámetro con un espaciamiento de 6 m entre ellas (Corena, 2008, p. 76).

A continuación se colocará una capa barrera primaria correspondiente a otra geomembrana de HDPE de 2 mm de grosor con el fin de retener a los lixiviados para luego ser recolectados (LaGrega et al., 2001, p. 830).

Seguidamente se describe una zona secundaria de recolección de lixiviados con 50 cm de piedras que manejarán un volumen reducido debido a la acción del sello primario (Ministerio de Fomento, 2001, p. 12). En esta zona se colocarán el mismo número de tuberías con las mismas especificaciones descritas en la zona primaria.

A continuación de esta zona se tendrá una capa barrera secundaria con otra geomembrana de HDPE de 2 mm de grosor que cumplirá las mismas funciones que la capa primaria.

Finalmente se colocará una tercera barrera necesaria para controlar aquellos contaminantes que pudieran haber pasado a través del sistema secundario de recolección de lixiviados. Esta barrera consistirá en 50 cm de un sistema compuesto por una capa de mezcla entre suelo propio del área y bentonita cálcica, bentonita sódica y zeolita ya que estos materiales retardan el transporte de contaminantes inorgánicos. Esta capa estará seguida por otra constituida por 50 cm de una mezcla de suelo, cenizas volantes con alto contenido de carbono y arcillas modificadas orgánicamente ya que estos materiales atenúan los contaminantes orgánicos y son precisos para las mezclas de desechos de pintura.

El sistema se completa por una capa final de 50 cm de arcilla compactada conformada por arcillas naturales, arcillas limosas, arcillas arenosas y limo arcilloso (Ministerio de Fomento, 2001, p. 12; LaGrega et al., 2001, pp. 819-822).

Todo el sistema de sellado ocupará un área de 4 779 m² (área de la celda) y 2 m de altura (suma de todas las capas) y tendrá una pendiente de 2 % (Corena, 2008, p. 76). Este sistema tendrá que ser construido por debajo del primer piso de la celda, es decir, debajo del nivel donde se colocarán los primeros bidones de

mezcla estabilizada. Para esto, el terreno tendrá que ser excavado profundamente incluso para colocar las columnas que brindarán el soporte estructural a la celda como se esquematiza en la Figura 3.24.

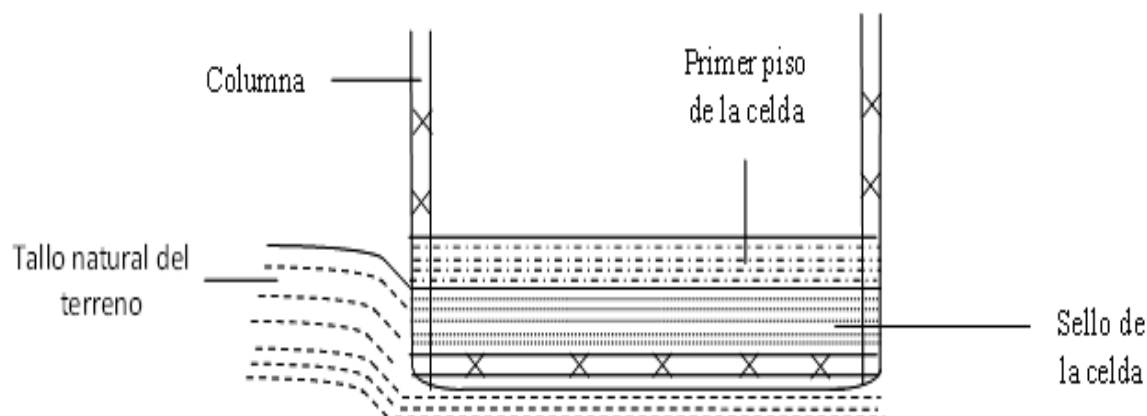


Figura 3.24. Esquema de los cimientos de la celda de disposición final de la mezcla de desechos de pintura

En la Tabla 3.24 se resumen las especificaciones de la piscina de recolección de los lixiviados generados en las zonas primaria y secundaria del sello multilaminar de la celda de confinamiento determinadas sobre la base de las consideraciones expuestas en la sección 2.4.

Tabla 3.24. Especificaciones de la piscina de recolección de lixiviados

Parámetro	Unidad	Valor
Lixiviado generado	m ³ /año	4 587,84
Altura	m	2,00
Largo	m	17,00
Ancho	m	13,50
Área	m ²	229,32
Volumen	m ³	458,78

3.4.3 SISTEMA DE COBERTURA FINAL, CLAUSURA Y CUIDADOS POST CLAUSURA

Para la cubierta final se ha elegido una capa de material margoso-limoso orgánico (calcita y arcillas) que se utilizará como soporte de la vegetación. Esta capa

tendrá la función de reducir la erosión y la infiltración de la precipitación. Será ubicada inmediatamente después de haber rellenado el último piso de la celda con hormigón armado (LaGrega et al., 2001, p. 854).

El esquema de la cubierta final se presenta en la Figura 3.25.

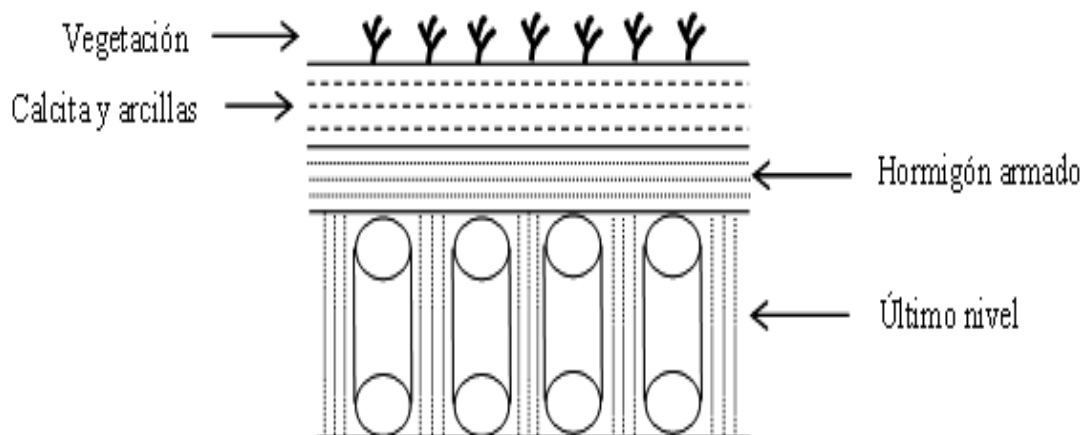


Figura 3.25. Esquema de la cubierta final de la celda de confinamiento de los desechos de pintura

Por otro lado, una vez terminada la vida útil de la celda, su correcta clausura será importante para minimizar o eliminar los escapes post-clausura de los residuos peligrosos, lixiviados, escorrentía contaminada o productos de descomposición hacia las aguas superficiales, subterráneas o al medio ambiente (LaGrega et al., 2001, p. 855).

Una vez clausurada, se recomienda mantener la integridad de la cubierta, evitar la erosión, controlar la vegetación con raíces profundas. Si la cubierta va a ser sometida al tráfico se debe analizar los efectos provocados (LaGrega et al., 2001, p. 856).

Finalmente se recomienda una supervisión del agua superficial y subterránea mediante la determinación de metales pesados y compuestos orgánicos volátiles con el propósito de verificar que no esté contaminada (LaGrega et al., 2001, pp. 857).

3.5 ANÁLISIS ECONÓMICO DEL PROCESO DE DISPOSICIÓN FINAL DE LOS DESECHOS DE PINTURAS

3.5.1 INVERSIÓN PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA PLANTA DE ESTABILIZACIÓN/SOLIDIFICACIÓN DE DESECHOS DE PINTURA Y SU CELDA DE CONFINAMIENTO

3.5.1.1 Inversión fija

En la Tabla 3.25 se indica la inversión requerida para la construcción de la planta de estabilización/solidificación, de la piscina de recolección de lixiviados y de la celda de confinamiento. Cabe indicar que Incinerox tiene bajo su propiedad una extensa área de terreno en el que ya se encuentra construida el área administrativa. Por esta razón, en este análisis no se incluirán las inversiones para la compra de terrenos ni para la construcción de sus instalaciones administrativas, sino tan solo se analizará aquella inversión que servirá para la construcción que comprende al proceso de estabilización/solidificación de la mezcla de desecho de pintura.

Tabla 3.25. Inversión en construcciones

Construcciones	Área (m ²)	Valor unitario (USD/m ²)	Inversión (USD)
Planta de estabilización/solidificación de la mezcla de desechos de pintura	840,00	50,00	42 000,00
Celda de confinamiento de desechos de pintura	4 779,00	200,00	955 800,00
Piscina de recolección de lixiviados	330,00	70,00	23 100,00
Total			1 020 900,00

El costo de construcción por m², es decir, el valor unitario manifestado en la Tabla 3.25, corresponde al precio referencial de 5 maestros de obra consultados en la ciudad de Quito para levantar la obra gris. Cabe indicar que estos valores incluyen los materiales tales como: hormigón armado, varilla antisísmica, etc., los equipos: volquetas, retroexcavadoras, etc. y la mano de obra: maestros constructores requeridos para llevar a cabo dichas construcciones.

Por lo tanto, Incinerox debe invertir 1 020 900,00 USD para la construcción que implica todo el proceso de disposición final de la mezcla de desechos de pintura.

En la Tabla 3.26, se muestra la inversión necesaria en la maquinaria y equipos que se requieren para la disposición final de los desechos de pintura. Esta inversión fue estimada al considerar el precio de cada equipo en el mercado, además de una estimación extra del 45% correspondiente a la entrega e instalación de los equipos en la planta (Peters y Timmerhaus, 2004, p. 183).

Tabla 3.26. Inversión en maquinaria y equipos

Equipo	Cantidad	Valor unitario (USD)	Inversión (USD)
Silos de almacenamiento de cemento	1	1 595,00	1 595,00
Silo de almacenamiento de cal	1	1 117,00	1 117,00
Silo de almacenamiento de cenizas	1	1211,00	1211,00
Tanque de almacenamiento de desechos de pintura	1	4 503,00	4 503,00
Tanque mezclador	1	5 004,00	5 004,00
Banda transportadora de cemento, cal y cenizas	1	5 916,00	5 916,00
Bomba centrífuga	1	435,00	435,00
Sistema de tuberías	1	119,00	119,00
Válvulas manuales	1	348,00	348,00
Total		20 248,00	

Los precios de los silos, del tanque de almacenamiento y del tanque mezclador, son los precios referenciales consultados en empresas que trabajan con acero inoxidable tales como Macons, Proacero, Hgb y Ecuacero.

Los costos de la banda transportadora, de la bomba centrífuga, de las tuberías y de la válvula fueron cotizados por China Rock Cruster (2011), Debem (2015), Tubacero (2007) y Taval (2015), respectivamente.

En la Tabla 3.27 se presenta el resumen de la inversión fija necesaria para la disposición final de la mezcla de desechos de pintura.

Tabla 3.27. Inversión fija

Inversión fija	Inversión (USD)
Construcciones	1 020 900,00
Maquinaria y equipos	20 248,00
Total	1 041 148,00

Entonces, la inversión fija a realizarse, sumando la inversión en construcciones y en equipos es de 1 041 148,00 USD, es un valor alto considerando que no se está invirtiendo en la compra de terrenos.

3.5.1.2 Capital de trabajo

La estimación económica fue realizada suponiendo que se requiere invertir en capital de trabajo durante el primer mes de operación.

a) Costos Variables

Los costos variables están comprendidos por los costos de materias primas y servicios.

En la Tabla 3.28 se presentan los costos de materias primas que se requiere invertir para la estabilización/solidificación de la mezcla de desechos de pintura. Los cálculos se fundamentaron en el balance de masa así como también en los precios de los materiales en el mercado. Cabe mencionar que solo se consideraron al cemento y la cal ya que las cenizas serán obtenidas del proceso de incineración que la empresa Incenerox realiza y las pinturas son los desechos a tratar.

Tabla 3.28. Inversión en materia prima

Construcciones	Cantidad (USD/mes)	Valor unitario (USD/t)	Inversión (USD/mes)	Inversión (USD/año)
Cemento*	779,10	150,00	116 865,00	1 402 380,00
Cal**	155,8	240,00	37 392,00	448 704,00
		Total	154 257,00	1 851 084,00

*(Holcim Ecuador S.A., 2012, p. 11)

** (Lacec Cia. Ltda., 2010, p. 1)

En la Tabla 3.29 se exponen los costos de energía, que es el servicio que se requerirá invertir en la estabilización/solidificación de los desechos de pintura. Los cálculos se fundamentaron en el balance de energía así como también en el precio del kW.h de 0,6812 USD (Empresa Eléctrica Quito, 2016, p. 1). Cabe mencionar que el proceso no requiere de energía calórica sino tan solo de energía eléctrica para el funcionamiento de los equipos.

Tabla 3.29. Costo de energía eléctrica

Equipo	Potencia del motor (kW)	Tiempo en un día de operación (h)	Consumo mensual (kW.h)	Costo mensual (USD)	Costo anual (USD)
Banda transportadora	4,00	1,00	88,00	59,95	719,35
Sistema de agitación del tanque de almacenamiento de los desechos de pintura	11 688,00	0,25	64 284,00	43 790,26	525 483,13
Sistema de agitación del tanque mezclador	221,91	0,42	2050,45	1 396,77	16 761,19
Bomba centrífuga	0,37	2,60	21,16	14,42	173,00
TOTAL				45 261,40	543 136,80

El tiempo de operación es aquel que se obtuvo en el dimensionamiento de los equipos, el mismo que se detalla en el Anexo III.

b) Costos Fijos

Los costos fijos están representados por la mano de obra, los costos generales (material de oficina) y las cargas del capital (depreciación)

Para el análisis del capital de trabajo, los costos generales y las cargas de capital no serán expuestos ya que Incinerox invierte material de trabajo en todas las demás operaciones (incineración, biocompostaje, etc.), además sólo se requiere realizar esta inversión durante el primer mes de operación.

En la Tabla 3.30 se detallan los operarios que se requieren para el proceso de disposición final de la mezcla de desechos de pintura, así como también los sueldos que percibirán cada uno de ellos. Cabe indicar que solo se incluyen los operarios que Incinerox tendría que incorporar a su equipo de trabajo para que

realicen esta operación. El capital de trabajo a invertir durante el primer mes de operación, se resume en la Tabla 3.31

Tabla 3.30. Costo de mano de obra

Cantidad	Operarios	Sueldo mensual (USD)	Sueldo anual (USD)
1	Obrero para carga de materias primas	456,01	5 472,12
1	Obrero para manejo del montacargas	456,01	5 472,12
1	Obrero descarga de producto	456,01	5 472,12
2	Obrero celda de confinamiento	912,02	5 472,12
Total		2 280,05	27 360,66

Tabla 3.31. Inversión en capital de trabajo para la puesta en marcha de la planta de disposición final de desechos de pintura

Capital de trabajo	Valor (USD)
Materia prima	154 257,00
Servicios	45 261,40
Mano de obra	2 280,05
Total	201 798,45

3.5.1.3 Inversión fija total

La inversión fija total que se debe realizar para poner en operación la planta de procesamiento y la celda de confinamiento de los desechos de pintura se resume a continuación, en la Tabla 3.32

Tabla 3.32. Inversión fija total para la puesta en marcha de la planta de disposición final de desechos de pintura

Inversión fija total	Valor (USD)
Inversión fija (construcciones, maquinaria y equipos)	1 041 148,00
Capital de trabajo (materia prima, servicios, mano de obra)	201 798,45
Total	1 242 946,45

La inversión que Incinerox debe realizar es de USD 1 242 946, 65. Cabe mencionar que, la inversión fija total será financiada por los socios de la empresa

Incinerox ya que tienen capital suficiente para invertir de tal manera que no requieren solicitar préstamos en el banco.

3.5.2 COSTOS DE PRODUCCIÓN

Los costos de producción comprenden el total de los costos variables y fijos por unidad de producción.

Para el análisis de los costos de producción, se adicionan a los costos fijos, las depreciaciones correspondientes a las construcciones y los equipos, tal como se exponen en la Tabla 3.33. Las depreciaciones se calculan considerando el método lineal y que las construcciones tienen 20 años de vida útil, mientras que a la maquinaria y a los equipos les corresponde 10 años (Blank y Tarquin, 2006, p. 196).

Tabla 3.33. Depreciaciones de las construcciones, maquinaria y equipos

Inversión fija total	Vida útil (años)	Depreciación mensual (USD)	Depreciación anual (USD)
Construcciones	20	5 495,67	65 948,00
Maquinaria y equipo	10	168,73	2 024,80
Total Depreciaciones		5 664,40	67 972,80

En la Tabla 3.34 se resume el total de los costos fijos y variables.

Tabla 3.34. Costos totales

Costos	Costo mensual (USD)	Costo anual (USD)
Materia prima	154 257,00	1 851 084,00
Servicios	45 261,40	543 136,80
Total de costos variables	199 518,40	2 394 220,80
Mano de obra	2 280,06	27 360,66
Depreciaciones	5 664,40	67 972,80
Total de costos fijos	7 944,46	95 333,53
Costos Totales (fijos y variables)	207 462,86	2 489 554,33

Al relacionar los costos totales y la capacidad de producción en la planta, se tienen los costos de producción, los mismos que se exponen en la Tabla 3.35.

Como se ha mencionado anteriormente, la capacidad de producción es de 37,5 m³/día de mezcla estabilizada/solidificada, si se trabaja 22 días al mes, la producción será de 825 m³/mes (61,9 t/mes).

Tabla 3.35. Costos de producción

Costo de producción (USD/m ³)	Costo de producción (USD/kg)	Costo de producción (USD/t)
251,47	0,15	152,34

Por lo tanto, a Incinerox le costaría \$251,47 dar la disposición final a cada m³ de mezcla estabilizada de desechos de pintura.

3.5.3 INGRESOS PERCIBIDOS POR LA PRESTACIÓN DE SERVICIOS

Aproximadamente 20 000 kg semanales de desechos de pinturas llegan hasta Incinerox. Por la disposición final de estos residuos, la empresa percibe ingresos de 1,10 USD/kg de desecho, además del dinero que reciben por concepto de transporte. Debido al traslado de los residuos hasta Incinerox, la empresa percibe ingresos de 0,03 USD/kg.

En la Tabla 3.36 se resumen los ingresos percibidos por la empresa Incinerox debido a la prestación de sus servicios.

Tabla 3.36. Ingresos por disposición final y transporte de los desechos de pintura

Ingreso	Cantidad mensual de desechos (kg)	Costo Unitario (USD/kg)	Ingreso mensual (USD)	Ingreso anual (USD)
Disposición final	80 000	1,10	88 000,00	1 056 000,00
Transporte		0,03	2 400,00	28 800,00
TOTAL			90 400,00	1 084 800,00

3.5.4 COSTO-BENEFICIO

Incinerox recibe a manera de ingresos un total anual de 1 084 800,00 USD como se indica en la Tabla 3.36. Los costos totales que la empresa tiene que gastar en un año de operación es de 2 489 554,33 USD. Esto quiere decir que la empresa no tendría utilidades o beneficios ya que gasta más de los que recibe.

3.5.5 EVALUACIÓN ECONÓMICA

En la Tabla 3.37 se presenta el flujo de caja de la operación de la empresa Incinerox bajo la premisa de que los ingresos y los egresos son constantes en el tiempo de vida útil del proyecto. Dentro de los egresos o costos totales, no se considera a la depreciación debido a que éste no es un valor que sale de la empresa, tan solo se lo reporta como gasto ya que la empresa debe disponer de dinero para reponerlo.

Por lo tanto, si los ingresos que Incinerox recibiría cada año por sus operaciones suman 1 084 800,00 USD, y los costos totales sin tomar en cuenta las depreciaciones equivalen a 2 421 581, 53 USD, entonces, la utilidad bruta anual sería -1 336 781,53 USD

Tabla 3.37. Flujo de caja

Año	Flujo de caja
0	1 242 946,45
1	-1 336 781,53
2	-1 336 781,53
3	-1 336 781,53
4	-1 336 781,53
5	-1 336 781,53

Con el flujo de caja y una tasa mínima atractiva de retorno del 30%, se calculó el VAN mediante el método descrito en el Anexo VI, con el fin de analizar si el proyecto es viable.

El VAN resultó - 4 498 771,11 USD. Según los criterios de la Ingeniería Financiera, cuando el valor del VAN resulta negativo, el proyecto no es viable (Blank y Tarquin, 2006, pp. 362-387). Además, Incinerox perdería 4 498 771,11 USD en 5 años, tiempo de vida útil del proyecto, por lo que a los socios de la empresa les resulta mejor invertir en un banco, cuya inversión les haría ganar dinero a una tasa del 5% aproximadamente (Produbanco, 2016).

3.5.8 COMPARACIÓN ENTRE LA DISPOSICIÓN FINAL QUE INCINEROX REALIZA ACTUALMENTE CON LA PROPUESTA DESARROLLADA EN EL PRESENTE PROYECTO

Los diferentes tipos de pintura (pinturas a base de agua, pinturas a base de solventes, pinturas y barnices residuales caducados) que llegan hasta Incinerox, son mezclados en un tanque mezclador con capacidad de 9,0 m³ y en otro de 3,5 m³ para someterlas al proceso de estabilización/solidificación.

Una vez obtenida la mezcla de pintura se añade al mixer el cemento, la cal y las cenizas, para su estabilización/solidificación. Luego las mezclas son depositadas en una celda de confinamiento con capacidad de 900 m³. El proceso de estabilización/solidificación que la empresa practica con las pinturas se resume en la Tabla 3.38.

Tabla 3.38. Proceso de estabilización/solidificación de pinturas de la empresa Incinerox

Mezcla	Relaciones
Pintura/cal/cemento	pintura/cemento = 12,49
	cal/cemento = 0,625
Pintura/cal/cemento/ceniza	pintura/cemento = 12,49
	cal/cemento = 0,625
	ceniza/cemento = 10,00

Cabe mencionar que Incinerox no ha evaluado el proceso de estabilización/solidificación que realiza, razón por la que se hicieron pruebas

preliminares de sus muestras solidificadas cuyos resultados se resumen en la Tabla 3.39.

Tabla 3.39. Resultados de las pruebas preliminares del proceso de estabilización/solidificación realizado por Incinerox

Mezclas	Pruebas preliminares	
	Compresión libre (KPa)	Humedad (%)
Cemento/cal/pinturas	2,45	31,19
Cemento/cal/pinturas/cenizas	10,09	25,74
Criterios de ordenamiento y elegibilidad*	>50	<10

(*Ruiz, 2003, p. 17)

Como se puede observar en la Tabla 3.39, los resultados de las pruebas preliminares manifiestan que las mezclas no cumplen con los criterios para ser depositadas en celdas de confinamiento (Ruiz, 2003, p. 17). Además, cabe mencionar, que visualmente las mezclas pueden ser descritas húmedas y fácilmente resquebrajables.

También se analizaron metales pesados, primero en la mezcla de pinturas que se utilizó para estabilizar/solidificar, y después en un extracto TCLP del sólido semi solidificado. Los resultados se muestran en la Tabla 3.40.

Tabla 3.40. Concentración de metales pesados en la mezcla de desechos de pinturas y en el extracto TCLP de la mezcla semi solidificada con cemento, cal y cenizas

Parámetro	Límite máximo permisible* (mg/L)	Concentración en la mezcla de pinturas (mg/L)	Concentración del extracto TCLP (mg/L)
Arsénico	5,0	0,0007	<0,0002
Bario	100,0	<0,2	<0,2
Cadmio	1,0	<0,02	<0,02
Cromo	5,0	0,35	0,14
Mercurio	0,2	0,0053	0,0065
Plata	5,0	<0,004	<0,004
Plomo	5,0	0,69	<0,09
Selenio	1,0	<0,0001	0,0003

*(Norma Oficial Mexicana, 2005, pp. 8-9)

Los valores mostrados en la Tabla 3.40 indican que la mezcla de desechos de pintura no es tóxica, debido a que la concentración de metales pesados está por debajo de los límites máximos permisibles. Lo que se puede rescatar de este análisis es que la mezcla con cemento, cal y cenizas funciona porque disminuye la concentración de metales, esto se puede notar claramente en el plomo y en el cromo, no siendo el caso del mercurio y el selenio, en los que se sospecha un aumento en su concentración por el aporte de las materias primas de la mezcla. Sin embargo, al no cumplir con los criterios para ser depositados en celdas de confinamiento, se corre el riesgo de que se rompa la matriz solidificante, lo que provocaría una contaminación futura por la migración de los contaminantes al medio ambiente. Por esta razón la empresa debe cambiar su formulación para seguir ejerciendo su actividad como gestor de residuos peligrosos.

Según la información proporcionada por el departamento financiero de Incinerox, el costo de producción que la empresa tiene que cubrir por dar la disposición final de la mezcla de desechos de pintura que actualmente están desarrollando es de 239,17 USD/m³ aproximadamente, lo que significa que la propuesta del presente proyecto cuesta un 5,14 % más pero se asegura cumplimiento normativo. Esto permite concluir que la mezcla de estabilización/solidificación propuesta en esta tesis correspondiente a la mezcla M1 con las relaciones pintura/cemento: 0,45, cal/cemento: 0,20 y cenizas/cemento: 0,10, es mejor que el proceso de disposición final que Incinerox está practicando actualmente desde el punto de vista técnico como se puede observar en la Tabla 3.41.

Tabla 3.41. Comparación de los resultados obtenidos en el proyecto de titulación y en las pruebas preliminares del proceso de estabilización/solidificación realizado por Incinerox

Mezclas	Propiedades físico químicas		Costo de producción (USD/m ³)
	Compresión libre (KPa)	Humedad (%)	
Cemento/cal/pinturas/cenizas (Incinerox)	10,09	25,74	239,17
Cemento/cal/pinturas/cenizas (Propuesta Tesis)	1 725,95	1,67	251,47
Criterios de ordenamiento y elegibilidad*	>50	<10	-

(*Ruiz, 2003, p. 17)

3.5.9 COMPARACIÓN ECONÓMICA Y AMBIENTAL ENTRE LA INCINERACIÓN Y ESTABILIZACIÓN/SOLIDIFICACIÓN DE LA MEZCLA DE DESECHOS DE PINTURA.

En la Tabla 3.42 se realiza la comparación entre dos métodos de disposición final, estos son la incineración y la estabilización/solidificación de desechos peligrosos. Este análisis se realiza con la finalidad de evaluar cuál de los dos métodos es más viable desde el punto de vista económico y ambiental considerando aspectos positivos y negativos de cada uno de ellos (Organización Panamericana de la Salud, 2007, pp. 89-97; Environmental Science and Technology, 2000, pp. 338-339).

Tabla 3.42. Comparación entre la incineración y la estabilización/solidificación de la mezcla de desechos de pintura

Incineración	Estabilización/solidificación/confinamiento
Existen emisiones a la atmósfera de metales pesados (cenizas), CO, NO _x , SO ₂ , dioxinas, furanos, compuestos clorados, hidrocarburos policíclicos.	No existen emisiones a la atmósfera. Podría haber una liberación de tóxicos con el rompimiento de la matriz solidificante.
Tecnología moderna permite un mayor control de las emisiones gaseosas (ejemplo: lavado de gases).	La liberación se controla con el sellado de la celda y el sistema de recolección de lixiviados.
Si no se controla, se puede contaminar el suelo y el ambiente.	Si estos controles no funcionan, se puede contaminar el suelo y las aguas subterráneas.
Se debe monitorear emisiones a la atmósfera. A las cenizas y al agua de lavado se les debe dar una disposición final (confinamiento, tratamiento).	Se debe realizar monitoreo de los suelos, de las aguas superficiales y de los lixiviados. Los lixiviados pueden regresar al proceso de estabilización/solidificación.
Tecnología moderna permite recuperación de la energía de combustión para emplearse en generación de vapor, electricidad, calefacción, etc	El proceso no requiere de empleo de energía calórica.
Existen riesgos de operación debido a que las pinturas son inflamables. Deben ser incineradas una vez que se hayan estabilizado.	No existen riesgos de operación debido a que las pinturas se estabilizan y se solidifican.
Vida útil del incinerador: hasta que se deprecie totalmente o se dañe el incinerador sin oportunidad de reparación.	Vida útil de la celda de confinamiento: 5 años

Tabla 3.43. Comparación entre la incineración y la estabilización/solidificación de la mezcla de desechos de pintura (**continuación...**)

Costo de producción: 500,00 – 1000,00 USD/t	Costo de producción: 152 USD/t
--	--------------------------------

Environmental Science and Technology (2000) en uno de sus artículos publicó algunos costos correspondientes a la remediación de suelos contaminados, entre ellos está el costo de incineración que se manifiesta en la Tabla 3.39. Este valor sirve de referencia para comparar con la tecnología de estabilización/solidificación desarrollada en este proyecto (pp. 338-339)

En la comparación que se acaba de analizar, se puede notar que, desde el punto de vista económico y ambiental, la estabilización/solidificación/confinamiento es la mejor opción debido a que este proceso no genera más contaminantes, sino que actúa directamente sobre los desechos peligrosos. Sin embargo, hay más riesgo de contaminación del suelo y de las aguas subterráneas si los sellos y el sistema de recolección de lixiviados fallaran, lo que obligaría a realizar una remediación, pero es poco probable. Además los costos de producción son menores que la incineración. Aunque se debe tomar en cuenta que el tiempo de vida de un incinerador es mayor que el tiempo de vida de la celda de confinamiento, lo que implicaría que al cabo de 5 años tendría que hacer una nueva inversión para construir otra instalación.

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

- La estabilización y solidificación mediante el uso de cemento es una buena alternativa frente a otros métodos como por ejemplo la incineración y biorremediación en los que los metales no cambian su estructura atómica ni son biodegradados. Además la tecnología del cemento es ampliamente conocida incluyendo su manejo, mezcla, fraguado y endurecimiento. El cemento es un material de costo relativamente bajo debido a que es muy usado en construcción, y el equipo y el personal están fácilmente disponibles.
- La mezcla de desechos de pintura conformada por pinturas a base de agua, pinturas a base de solventes y pinturas y barnices residuales caducados no es corrosiva, reactiva, explosiva ni tóxica pero sí es inflamable, es esta última propiedad por la que la mezcla debe ser considerada como un desecho peligroso y se debe dar una disposición final adecuada.
- La mezcla de desechos de pinturas no requiere de una estabilización especial, tan solo basta con realizar una mezcla con componentes solidificantes para anular la inflamabilidad de la mezcla.
- Los componentes solidificantes utilizados en este proyecto tales como el cemento, la cal y las cenizas, funcionan bastante bien tanto con los metales así como en los compuestos orgánicos volátiles que el método permitió analizar.
- Las cenizas no son tóxicas y aportan con una mínima cantidad de metales pesados a las mezclas.
- Todos los tratamientos de las dos propuestas de estabilización/solidificación de los desechos de pintura cumplieron con los límites máximos permisibles en la concentración de metales pesados y compuestos orgánicos volátiles

manifestados en la ordenanza 404 del Distrito metropolitano de Quito y en la norma NOM-052-SEMARNAT-2005, además de los criterios de ordenamiento y elegibilidad para poder ser depositados en celdas de confinamiento.

- En general, parte de arsénico realiza una microencapsulación con la matriz estabilizada y otra parte es liberado al romperse la matriz como ocurre en una macroencapsulación. El tolueno se libera una vez rota la matriz solidificada mientras que el isobutanol se evapora mientras ocurre el fraguado de cemento.
- La estabilización/solidificación es específica para cada tipo de desechos ya que cada desecho tiene su propia caracterización. Pero el presente estudio puede servir como referencia para aquellos desechos que tengan similares características a la mezcla de desechos de pintura tratada en este proyecto.
- Entre la propuesta de estabilización/solidificación de la mezcla de desechos de pintura con cemento y cal y la propuesta con cemento, cal y cenizas, se prefiere la segunda ya que las cenizas les brindan a las mezclas mayor funcionalidad, les confieren mayor rapidez de fraguado, disminuyen la conductividad y aumenta su resistencia a la compresión. Bajo estas consideraciones, el tratamiento 1 de la propuesta 2 de estabilización/solidificación de los desechos de pintura bajo las relaciones pintura/cemento: 0,45, cal/cemento: 0,20 y cenizas/cemento: 0,10, es seleccionado como la mejor propuesta de este proyecto.
- Para la estabilización/solidificación de los desechos de pintura se requiere de una planta de procesamiento comprendida por 3 silos de almacenamiento del cemento, cal y cenizas respectivamente; 1 tanque agitado para el almacenamiento de pinturas, 1 tanque agitado para la mezcla, 1 banda transportadora, 1 bomba centrífuga, tuberías y válvulas respectivas. Además se requiere de una celda de confinamiento con capacidad de 71 685,00 m³ compuesta de 15 pisos o niveles con un tiempo de vida útil de 5 años y un sistema de sellado conformado por capas múltiples de geomembrana, piedras, suelo y arcilla. El proceso dispone de una piscina de recolección de lixiviados

con capacidad de 458,78 m³ para recolectar los lixiviados durante un mes de operación.

- El proyecto de la planta de estabilización/solidificación de la mezcla de desechos de pintura no es viable. Genera pérdidas anuales de \$ 1 336 782 a una tasa mínima atractiva de retorno del 30%, por lo que a los socios de la empresa les resulta mejor invertir el dinero en un banco. Pero la disposición final de estos residuos fue concebido desde un punto de vista ambiental y no como un negocio, la inversión en este proyecto sería favorable ya que la empresa ahorraría dinero en la remediación de los suelos contaminados si a esos desechos se los dispondría de una manera no controlada
- El tratamiento 1 de la propuesta 2 de estabilización/solidificación de los desechos de pintura con las relaciones pintura/cemento: 0,45, cal/cemento: 0,20 y cenizas/cemento: 0,10, es mejor desde el punto de vista técnico y ambiental que el proceso de disposición final que Incinerox está practicando actualmente debido a que cumple satisfactoriamente los criterios de ordenamiento y elegibilidad de los residuos peligrosos para ser confinados en una celda.
- La estabilización/solidificación/confinamiento de los desechos de pintura es más viable desde los puntos de vista ambiental y económico en comparación con la incineración. El primer proceso no genera más contaminantes sino que actúa directamente sobre los residuos peligrosos, además, el costo de producción es de 152 USD/t, mientras que la incineración cuesta entre 500 y 1 000 USD/t.

4.2 RECOMENDACIONES

- Realizar el estudio correspondiente para determinar cuáles son los mecanismos (macro encapsulación, micro encapsulación, adsorción, absorción, precipitación, detoxificación) de estabilización y solidificación de los desechos de pintura, es decir, su manera de interactuar con el cemento, la cal y las cenizas en la estructura cristalina o amorfa de la matriz solidificada. Se recomienda el uso de microscopios electrónicos y de espectrofotómetros de infrarrojos.
- En la práctica, es decir, en una disposición final a gran escala, se recomienda clasificar a los desechos peligrosos en grandes grupos de tal forma que se puedan tratar siempre los mismos desechos en cada batch, de manera que se pueda realizar tan solo una caracterización de peligrosidad inicial, la misma que será respaldada con análisis regulares de toxicidad en los sólidos a ser confinados, para evitar la contaminación del medio ambiente. Estos análisis también pueden ser respaldados con el estudio de los lixiviados recolectados en la piscina.
- Probar mezclas con arcillas modificadas orgánicamente ya que estas son las recomendadas para interactuar con los compuestos orgánicos volátiles en la matriz solidificada.
- Realizar ensayos físicos y técnicos a las mezclas sólidas tales como el índice de cono, consolidación, conductividad hidráulica, durabilidad, etc. con el fin de determinar la resistencia de los materiales estabilizados a las tensiones ambientales y superficiales de tal forma que se pueda encontrar una formulación que permite obtener una matriz poco destructible en el transcurso del tiempo y así poder asegurar o evitar una futura contaminación del medio ambiente ocasionado por los lixiviados producto de este tipo de disposición final.

BIBLIOGRAFÍA

1. ACI. (2002). *Práctica Estándar para seleccionar el proporcionamiento de concreto de peso normal, pesado y masivo*. Recuperado de https://www.academia.edu/6871828/Standard_Practice_for_Selecting_Proportions_for_Normal_Heavyweight_and_Mass_Concrete_ACI_211.1-91_Reported_by_ACI_Committee_211_Committee_Members_Voting_on_1991_Revision_CONTENTS
2. Aguiñaga, M. (2012). *Suplemento: Registro Oficial N° 856*. Recuperado de <http://www.cip.org.ec/attachments/article/498/ACUERDO%20MINISTERIAL%20No.%20142.pdf> (Noviembre, 2013).
3. Alanís, J. y Covarrubias, M. (2009). *Carbonato de Calcio*. Recuperado de http://www.inaes.gob.mx/doctos/pdf/guia_empresaial/carbonato_de_calcio.pdf (Marzo, 2016)
4. Anfacal. (2012). *Uso de la cal para tratamiento de residuos peligrosos*. Recuperado de http://anfacal.org/media/Biblioteca_Digital/Quimica/USOS_DE_LA_CAL_PARA_TRATAMIENTO_DE_RESIDUOS_PELIGROSOS.pdf (Febrero, 2014)
5. ASME. 2015. *Boiler and Pressure Vessel Code: Section VIII, Division I, Rules for Construction of Pressure Vessels*.
6. Aulestía, D. (2014). *Estructuras de hormigón armado*. Recuperado de [http://www.normaconstruccion.ec/capitulos_nec_2015/NEC_SE_HM_\(hormigon_armado\).pdf](http://www.normaconstruccion.ec/capitulos_nec_2015/NEC_SE_HM_(hormigon_armado).pdf) (Junio, 2016)
7. Auto Body Magazine. (2016). *Preguntas frecuentes sobre las pinturas base de agua*. Recuperado de http://www.autobodymagazine.com.mx_previo/2012/09/preguntas-base-agua2/ (Marzo, 2016).

8. Bello, M. y Pino, M. (2008). *Medición de presión y caudal*. Recuperado de <http://www2.inia.cl/medios/biblioteca/boletines/NR25635.pdf> (Junio, 2016)
9. Benavidez, C. (2015). *Diseño de una planta para la fabricación de mampuestos de uso peatonal con cenizas de incineración provenientes de la empresa Gpowergroup S.A.* (Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero Químico). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
10. Blank, L., y Tarquin, A. (2006). *Ingeniería Económica*. (6ta edición). México D.F, México: McGraw-Hill
11. Brown, B. (1985). *Operaciones Básicas de la Ingeniería Química: Agitación*. Barcelona. España: Provenza.
12. Burgos, M., Angulo, D. y Mejía, R. (2011). Durabilidad de morteros adicionados con cenizas volantes de alto contenido de carbón. *La Revista Latinoamericana de Metalurgia y materiales*, 32(1), 61-70.
13. Caballero, A. y Médico, O. (2013). *Caracterización y posible uso de cenizas resultantes de la combustión del carbón, en la futura Termocentral de lecho fluidizado. Río Turbio (Argentina)*. Recuperado de <http://www.redisa.uji.es/artSim2013/CaracterizacionDeResiduosSolidos/Caracterizacion%20Cenizas%20Combustion%20Carbon.pdf>. (Enero, 2016)
14. Calle, L., (2015). *Diseño de una planta de tratamiento de lodos provenientes de la industria de galvanizado, mediante encapsulado*. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniera Química). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
15. Calvache, G., Rosero, T. y Yacelga, M. (2007). *Geometría plana y del espacio*. Quito, Ecuador.

16. Capservs Medios. (2015). *Actualización de Plan de Ordenamiento Territorial de la Parroquia Pifo*. Recuperado de http://app.sni.gob.ec/visorseguimiento/DescargaGAD/data/sigadplusdiagnostico/1768100170001_1768100170001_24-06-2015_16-51-47.pdf (Septiembre, 2015).
17. Casseres, S., Mesa, L. y Hernández, H. (2008). Estabilización/Solidificación, Una Alternativa Para la Deposición Segura De Lodos Saturados Con Metales pesados. *UIS Ingenierías*, 7(2), 169-178.
18. Chattopadhyay, S. y Condit, W. (2002). “*Advances in encapsulation Technologies for the Management of Mercury-Contaminated Hazardous Wastes*”. Recuperado de <https://clu-in.org/download/contaminantfocus/mercury/advances-in-encapsulation-600r02081.pdf> (Marzo, 2016)
19. Chen, Q., Tyrer, M., Hills, C., Yang, X. y Carey, P. (2008). Immobilisation of heavy metal in cement-based solidification/stabilization: A review. *Waste Management*, 29(1), 390-403. Doi:10.1016/j.wasamn.2008.01.019
20. China Rock Crusher. (2011). *Cinta transportadora*. Recuperado de <http://seaprodivers.com.mx/products/cinta-transportadora.html> (Octubre, 2015).
21. Colina, L. (2013). *Mezclado de Alimentos Fluidos*. Recuperado de http://sgpwe.izt.uam.mx/files/users/uami/mlci/mezclado_fluidos.pdf (Abril, 2016)
22. Corena, M. (2008). *Sistemas de Tratamiento para Lixiviados generados en rellenos sanitarios*. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Civil). Universidad de Sucre, Sincelejo, Colombia.

23. Cruz, G. (2006). Revisión Bibliográfica: *Desechos Peligrosos*. Recuperado de http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lpro/cruz_g_g/capitulo4.pdf (Marzo, 2016)
24. Debem. (2015). *Bombas centrífugas horizontales*. Recuperado de <http://www.debem.it/esp/mb-horizontal-centrifugal-pumps-list.asp> (Octubre, 2015)
25. Díaz, P. y Moyano, A. (2000). *Manual de Gestión de los Residuos especiales de la Universidad de Barcelona*. Recuperado de http://www.ub.edu/ossma/wp-content/uploads/2016/03/manual_residuos_especials_cs.pdf (Junio, 2016)
26. Dirección General de Desarrollo Minero. (2014). *Perfil de mercado de la barita*. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/5568/pm_barita_2014.pdf (Julio, 2016)
27. Duarte, R. (2005). *Determinación de la densidad: Método del Picnómetro*. Recuperado de <http://www.fisica.uson.mx/manuales/fluidos/fluidos-lab02.pdf> (Abril, 2016)
28. Echanique, P., (2005). Normas técnicas para la aplicación de la codificación del Título V, "Del medio Ambiente", Libro Segundo, del Código Municipal para el Distrito Metropolitano de Quito. Recuperado de http://www.ecuadorambiental.com/doc/normas_tecnicas.pdf (Noviembre, 2013)
29. Eco Diseño. (2006). *Recubrimientos alternativos para la reducción de emisiones de compuestos orgánicos volátiles en las industrias del mueble*. Recuperado de <http://www.xn--eco-diseo-s6a.net/script/photo/1325501629informerecubrimientosaidima.pdf> (Marzo, 2016)
30. Empresa Eléctrica Quito. (2016). *Pliego Tarifario Vigente*. Recuperado de <http://www.eeq.com.ec:8080/documents/10180/143788/Pliego+Tarifar>

io+Enero+2016/414767b2-234d-4f10-a578-2c2990465c1f (Junio, 2016)

31. Environmental Science and Technology. (2000). Cleaning up with heat treatment. *Env. Sci. Technol*, 34, 338-339.
32. EPA. (1992). *Toxicity characteristic leaching procedure*. Recuperado de <http://www.epa.gov/wastes/hazard/testmethods/sw846/pdfs/1311.pdf> (Septiembre, 2013)
33. EPA. (2004a). *Soil and waste pH*. Recuperado de <http://www.epa.gov/wastes/hazard/testmethods/sw846/pdfs/9045d.pdf> (Abril, 2014)
34. EPA. (2004b). *Corrosivity toward steel*. Recuperado de <http://www.epa.gov/wastes/hazard/testmethods/sw846/pdfs/1110a.pdf> (Abril, 2014)
35. Estrella y Lugar (2007). *Manual de pinturas*. Recuperado de <http://www.estrellaylugar.com/doc/es-manual-de-pinturas.pdf> (Marzo, 2016)
36. Flores, L. y Alcalá, J. (2010). *Manual de Procedimientos Analíticos*. Recuperado de <http://www.geologia.unam.mx/igl/deptos/edafo/lfs/MANUAL%20DEL%20LABORATORIO%20DE%20FISICA%20DE%20SUELOS1.pdf> (Abril, 2016)
37. García, C., Saval, J., Baeza, F. y Tenza, A. (2008). *Prácticas de Materiales de Construcción I.T.O.P.* Recuperado de <http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/10998/1/Pr%C3%A1ctica%20N%C2%BA%201%20Propiedades%20generales-densidad.pdf> (Abril, 2016)
38. Giudice, C. y Pereyra, A. (2009). *Tecnología de pinturas y recubrimientos: componentes, formulación, manufactura y calidad*. Recuperado de http://www.edutecne.utn.edu.ar/tecn_pinturas/A-TecPin_I_a_V.pdf (Febrero, 2015)

39. Hale, B., Evans, L. y Lambert, R. (2011). Effects of cement or lime on Cd, Co, Cu, Ni, Pb, Sb and Zn mobility in field-contaminated and aged soils. *Journal of Hazardous Materials*, 199(2), 199-127. Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389411013057> (Marzo, 2015)
40. Halim, C., Amala, R., Beydouna, D., Scotta, J. y Low, G. (2004). Implications of the structure of cementitious wastes containing Pb(II), Cd(II), As(V), and Cr(VI) on the leaching of metals. *Cement and Concrete Research*. 34(1). 1093-1102. Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884603004216> (Marzo, 2016)
41. Hirschi, T., Knauber, H., Lanz, M., Schlumpf, J., Schrabback, J., Spiring, C. y Waeber, U. 2010. *Manual del hormigón*. Madrid, España: Gráficas Couché S.L.
42. Holcim Ecuador S.A. (2012). *Datos de seguridad de matriales*. Recuperado de http://www.holcim.com.ec/fileadmin/templates/EC/doc/folletos/MSD_S_Cementos_Hidraulicos_compuestos.pdf (Febrero, 2015)
43. INEN. (1983). *Pinturas y productos afines. Definiciones*. Recuperado de <http://normaspdf.inen.gob.ec/pdf/nte/997.pdf> (Febrero, 2015)
44. INEN. (2010). *Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico*. Recuperado de <http://normaspdf.inen.gob.ec/pdf/nte/1573.pdf> (Diciembre, 2015)
45. INEN. (2013). *Productos de petróleo. Determinación del Punto de Inflamación. Método Tag en Copa Cerrada*. Recuperado de <http://normaspdf.inen.gob.ec/pdf/nte/1047-1.pdf> (Junio, 2015)
46. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. (2001). *Propiedades del concreto que contiene ceniza volante ultrafina*. Recuperado de

<http://www.imcyc.com/revista/2001/febrero2001/propiedades.htm>
(Julio, 2016)

47. Jaramillo, J. (2002). *Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales*. Recuperado de <http://www.ops.org.bo/textocompleto/isa19480.pdf> (Febrero, 2016)
48. Lavec Cía Ltda. (2010). *Hoja técnica de productos*. Recuperado de <http://www.lavec.com.ec/fotos%20lavec/cecaltextc.jpg> (Febrero, 2015)
49. LaGegra, M.D., Buckingham, P.L. y Evans, J.C. (2001). *Hazardous Waste Management* (2da edición). Illinois, Estados Unidos: Waveland Press, Inc.
50. Loayza, J. y Silva, M., (2009). *Gestión Integral de Residuos Químicos Generados en Actividades Industriales*. Recuperado de <http://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/viewFile/3452/3308> (Marzo, 2015)
51. Márquez, F., (2002). *Manejo seguro de residuos peligrosos*. Recuperado de http://www2.udec.cl/matpel/cursos/residuos_peligrosos.pdf (Febrero, 2015)
52. Martínez, J., (2005). *Guía para la Gestión Integral de Residuos Peligrosos*. Recuperado de http://www.ccbasilea-crestocolmo.org.uy/wp-content/uploads/2010/11/gestion_r01_fundamentos.pdf (Marzo, 2016)
53. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2007). *Gestión Integral de Residuos o Desechos Peligrosos*. Recuperado de http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/sustancias_qu%C3%ADmicas_y_residuos_peligrosos/gestion_integral_resp_el_bases_conceptuales.pdf (Marzo, 2016)

54. Ministerio de Ambiente. (2015). *Acuerdo Ministerial No. 061: Reforma del Libro VI del texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente*. Recuperado de http://insigma.com.ec/wp-content/uploads/2015/03/23-04-2015_Acuerdo_Ministerial_061-.pdf (Febrero 2016)
55. Ministerio de Fomento. (2001). *Real Decreto 1481/2001 de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero*. Recuperado de http://www.fomento.gob.es/mfom/lang_cas tellano/direcciones_generales/ferrocarriles/_informacion/normativa/3i mpacto/rd-1481-2001.htm (Junio, 2016)
56. Moreno, N. 2001. *Caracterización de las cenizas volantes*. Recuperado de <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6986/06CAPITULO2.pdf;jsessionid=F5FD72093F48B9FB799C44D94ACE0B.tdx1?sequence=6> (Julio, 2016)
57. Norma Oficial Mexicana. (1993a). *Características de los residuos peligrosos y el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente*. Recuperado de <http://www.bordercenter.org/pdfs/MexicanOfficialStandardNOM-052-SEMA RNAT-1993.pdf> (Abril, 2014)
58. Norma Oficial Mexicana. (1993b). *Requisitos que deben observarse en el diseño, construcción y operación de celdas de un confinamiento controlado para residuos peligrosos*. Recuperado de http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/PPD02/NOM_057_1.pdf (Junio, 2016)
59. Norma Oficial Mexicana. (2005). *Características, procedimiento de identificación, clasificación y listado de residuos peligrosos*. Recuperado de <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/PPD02/DO2282.pdf> (Febrero, 2016)

60. Norma Técnica de Residuos Peligrosos y Especiales. (2014). "Resolución 002-SA-2014 correspondiente a la Ordenanza metropolitana de Quito No 404". Quito, Ecuador.
61. Ormazabal, F. y Larrañaga, E. (2002). *Libro Blanco. Pintado Industrial*. Recuperado de http://www.istas.net/risctox/gestion/estructuras/_3163.pdf (Febrero, 2015).
62. Organización Panamericana de la Salud. (2006). *Evaluación de Riesgos en Salud por la Exposición a Residuos peligroso*. Recuperado de <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/eco/030079/030079-06.pdf> (Marzo, 2016)
63. Organización Panamericana de la Salud. (2007). *Incineración*. Recuperado de <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd61/tecnadmvo/cap5.pdf> (Noviembre, 2015)
64. Osaka. (2012). *Pintura decorativa*. Recuperado de <http://www.osaka.es/perlescente.html> (Enero, 2016).
65. Palete, D. y Villón, J. (2006). *Diseño, Construcción y Puesta en Marcha de una Reactor de Mezcla Completa Didáctico*. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Químico). Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador.
66. Pérez, D., (2011). "*Inertización de residuos industriales*". Recuperado de <http://www.migm.posgrado.uclm.es/TitulosPropios/UserFiles463%5CRecursos%5CP%C3%BAblico%5CDPG1.pdf> (Marzo, 2016)
67. Perry, R., y Green, D. W. (2008). *Manual del Ingeniero Químico* (8va ed.). New York, Estados Unidos: McGraw-Hill.
68. Peters, M., Timmerhaus, K. y West, R. (2004). *Plant design and economics for chemical engineers* (5ta ed.). New York, Estados Unidos: McGraw

Hill International Editions.

69. Produbanco. (2016). *Tasas de interés y tarifas produbanco*. Recuperado de https://www.produbanco.com/GFPNet/descargas/pizarras_mes-PRO DUBANCO-GrupoPromerica.pdf (Julio, 2016)
70. Romero, L. y Vargas, M. (2009). Informe final: desarrollo de la tecnología de inmovilización: estabilización/solidificación de desechos peligrosos en Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, 22(2), 79-90
71. Ruiz, U. (2003). *Recomendaciones técnicas generales para el diseño y construcción de celdas de confinamiento y rellenos sanitarios*. Recuperado de <http://www.semarnat.gob.mx/archivosanteriores/temas/gestionambiental/Materiales%20y%20Actividades%20Riesgosas/sitioscontaminados/GTZ/L-Recomendaciones%20t%C3%A9cnicas%20para%20dise%C3%B1o%20de%20confinamientos%20de%20RP.pdf> (Febrero, 2014)
72. Ruiz, G., Fernández, J. y Rodríguez, R. (2001). Residuos peligrosos: grave riesgo ambiental. *Avance y Perspectiva*, 20, 151.
73. Ruiz, G. (2014). *Diseño de un sistema de tratamiento de los lixiviados generados por la disposición no controlada de polvo de acería sobre suelo*. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniera Química). Escuela politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
74. Sandoval, L. y Jauregui, L. (2002). *Tratamiento de residuos de arsénico provenientes del tratamiento del agua*. Morelos, México.
75. Santaella, L. (2001). *Caracterización física, química y mineralógica de las cenizas volantes*. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/911/91101007.pdf> (Julio, 2016).

76. Secretaría de Desarrollo Social. (2013). *Sistemas de Tratamiento de Residuos Sólidos*. Recuperado de http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358012/358012_LECCION_EVALUATIVA_2.pdf (Marzo, 2016)
77. Sinnott, R. y Towler, G. (2012). *Diseño de Ingeniería Química*. (5ta edición). Barcelona, España: Reverté.
78. Taval. (2015). *Catálogos de válvulas*. Recuperado de <http://www.taval.com.ar/img/files/esfericas.pdf>. (Diciembre, 2015)
79. Torre, W. (2009). *Diseño de la base del relleno sanitario*. Recuperado de http://www.univo.edu.sv:8081/tesis/015454/015454_Cap10.pdf (Junio, 2016)
80. Tubacero. (2007). *Catálogo General*. Recuperado de http://www.tubacero.es/resources/upload/link/tubacero_catalogo_general.pdf (Junio, 2016)
81. TULMAS. (2003). *Libro VI: De la calidad ambiental*. Recuperado de <http://ecuadorforestal.org/wp-content/uploads/2010/05/Libro-VI.pdf> (Enero, 2015)
82. Wilk, C. (2008). *Applying Solidification/Stabilization for Sustainable Redevelopment of Contaminated Property*. Recuperado de http://www.watropur.com/fileadmin/media/contact/1_english.pdf (Marzo, 2016)
83. Wilo. (2010). *Principios fundamentales de la tecnología de las bombas centrifugas*. Recuperado de http://www.wilo.es/fileadmin/es/Downloads/pdf_entero.pdf (Abril, 2016)
84. Yilmaz, O., Çorça, E. y Ünlü, K. (2003). Comparison of Two Leaching Tests to Assess the Effectiveness of Cement-Based Hazardous waste Solidification/Stabilization. *Turkish Journal of Engineering and Environment Sciences*, 27(1), 201-212. Recuperado de <http://journals.t>

ubitak.gov.tr/endineering/issues/muh-03-27-3/muh-27-3-7-0209-2.pdf
(Marzo, 2016)

ANEXOS

ANEXO I

CÁLCULO DE LAS PROPIEDADES QUE COMPRENDEN LA CARACTERIZACIÓN DE LA MEZCLA DE LOS DESECHOS DE PINTURA

A continuación se exponen los procedimientos y los cálculos de las propiedades que caracterizan a un desecho como peligroso a partir de los datos obtenidos en el desarrollo experimental descrito en el capítulo 2.1 del presente proyecto.

AI.1 DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD

Primero, se pesó el picnómetro vacío, limpio y seco. El siguiente paso consistió en llenar completamente el picnómetro con agua mediante el uso de una pipeta. Al picnómetro lleno de agua se termostató por 20 minutos a 20 °C y luego se pesó. El volumen del picnómetro se calculó mediante la Ecuación 2.1. Una vez calculado el volumen, se retiró el agua del picnómetro, se secó y se colocó la muestra de pintura dentro de él con la ayuda de una pipeta hasta quedar completamente lleno. Luego se termostató por 20 minutos a 20 °C y después se pesó. La densidad de la muestra de pintura se calculó mediante la Ecuación 2.2.

En la Tabla AI.1 se presentan los datos utilizados para el cálculo de la densidad de las muestras de pintura.

Tabla AI.1. Datos para el cálculo de la densidad de la mezcla de pinturas

Propiedad	Unidad	Valor
Peso del picnómetro vacío, limpio y seco	g	10,60
Peso del picnómetro lleno con agua	g	20,59
Volumen del picnómetro	mL	10,00
Densidad del agua a 20°C	g/mL	0,9982
Peso del picnómetro lleno con la muestra 1	g	20,81

Tabla AI.1. Datos para el cálculo de la densidad de la mezcla de pinturas (**continuación...**)

Propiedad	Unidad	Valor
Peso del picnómetro lleno con la muestra 2	g	20,81
Peso del picnómetro lleno con la muestra 3	g	20,84

Con el peso del picnómetro vacío ($P_{inicial}$), con el peso del picnómetro lleno de agua (P_{agua}) y con la densidad del agua a 20 °C (ρ_{agua}) se determina el volumen del picnómetro con la Ecuación AI.4

$$V_{picnómetro} = \frac{20,59g - 10,6g}{0,9982 g/mL} = 10 mL$$

Como ejemplo de cálculo, se consideran los datos para la muestra 1 de la mezcla de pinturas y se los reemplaza en la Ecuación AI.5

$$\varphi_1 = \frac{20,81 g - 10,6 g}{10 mL} = 1,021 g/mL$$

Entonces, la densidad promedio para las 3 muestras es: 1,022 g/mL

AI.2 DETERMINACIÓN DE LA CORROSIVIDAD

AI.2.1 Determinación del pH

En la Tabla AI.2 se presentan los datos experimentales obtenidos con este procedimiento.

Tabla AI.2. Valores de pH medidos en las 3 muestras de la mezcla de pintura

Muestra	pH
Muestra 1	7,09
Muestra 2	7,19
Muestra 3	7,25
Promedio	7,18

AI.2.2 Determinación de la corrosión a la lámina de acero

La corrosividad de la mezcla de los desechos de pintura fue determinada mediante el uso de un equipo adaptado cuyo esquema se presenta en la Figura AI.1. El equipo consistió en un balón de fondo redondo con tres bocas esmeriladas de 2 000 mL de capacidad, una plancha de calentamiento, un condensador de reflujo, un agitador de hélice y un motor de 1/40 HP. Se usó una rodela circular de acero SAE 1020 de 3,75 cm de diámetro, 0,32 cm de espesor y 0,80 cm de diámetro del círculo interior.



Figura AI.1. Esquema del equipo para determinar la corrosividad de la mezcla de los desechos de pinturas

El procedimiento que se describe a continuación:

- Se determinó el área de superficie total de la rodela mediante la Ecuación 2.3.

$$A = \frac{3,14 [(3,75 \text{ cm})^2 - (0,8 \text{ cm})^2]}{2} - (0,32 \text{ cm} * 3,14 * 0,375 \text{ cm}) - (0,32 \text{ mm} * 3,14 * 0,8 \text{ cm})$$

$$A = 19,89 \text{ cm}^2$$

- Posteriormente, se realizó una limpieza mecánica de la rodela mediante el uso de un abrasivo suave (lija), después, se la colocó en agua y luego en metanol para remover el material adherido a la superficie y se la dejó secar al ambiente. Finalmente, se pesó la rodela limpia y seca y se registró su peso inicial.
- Luego, se colocaron 500 mL de la mezcla de pinturas en el balón, se introdujo la rodela y se instaló el equipo.
- Una vez instalado el equipo, se inició la agitación a una velocidad suficiente para asegurar que la mezcla sea homogénea. Conjuntamente, comenzó el calentamiento y se ajustó la temperatura hasta alcanzar 55 °C. Una vez que se alcanzó la temperatura, se hizo circular agua fría a través del condensador para asegurar el reflujo.
- El calentamiento y la agitación se mantuvieron durante 24 horas, tiempo necesario para determinar si la velocidad de corrosión es mayor o menor a 6,35 mm por año.
- Luego de transcurridas las 24 horas, se retiró la rodela del balón, se la secó, se la limpió con un abrasivo suave y se la colocó en agua y después en metanol. Se pesó la rodela limpia y seca y se registró su peso final. El peso perdido por la rodela debido al efecto de corrosión se muestra a en la Tabla AI.3.

Tabla AI.3. Peso perdido por la rodela de acero SAE 1020 después de la prueba de corrosión

Muestra	Peso de la rodela (g)		
	Peso inicial	Peso final	Peso perdido debido a la corrosión
Muestra 1	28,35	28,22	0,13
Muestra 2	28,22	28,12	0,10
Muestra 3	28,12	28,04	0,08

- La velocidad de corrosión fue determinada mediante la Ecuación 2.4.

Para el ejemplo de cálculo, se toman los datos de la muestra 1 y se los reemplaza en la Ecuación 2.4.

$$velocidad\ de\ corrosión_1 = \frac{(28350\ mg - 28220\ mg) * 11,145}{19,89\ cm^2 * 24\ h} = 3,04\ \frac{mm}{año}$$

Al considerar todos los datos de la Tabla AI.3, la velocidad de corrosión promedio para la mezcla de pinturas es: 2,41 mm/año

AI.3 DETERMINACIÓN DE LA REACTIVIDAD Y EXPLOSIVIDAD

El procedimiento para determinar la reactividad y explosividad de la mezcla de pinturas se resume (Norma Oficial Mexicana, 1993a, pp. 11-12):

- Se tomaron 10 mL de la mezcla de los desechos de pinturas y se los puso bajo condiciones normales para observar si se combina o polimeriza violentamente sin detonar.
- A la mezcla de los desechos de pinturas se la puso en contacto con agua en relaciones desechos/agua de 5:1, 5:3 y 5:5 bajo condiciones normales con el propósito de observar si la mezcla reacciona violentamente y forma gases, vapores o humos. Para el efecto, se mezclaron 10 mL de pintura con 2, 6 y 10 mL de agua respectivamente mediante el uso de una probeta y de vasos de precipitación.
- Los desechos fueron puestos en contacto con soluciones de ácido clorhídrico (HCl) 1 N y de hidróxido de sodio (NaOH) 1 N, respectivamente, en relaciones desechos/solución de 5:1, 5:3 y 5:5 bajo condiciones normales con la finalidad de observar su reactividad. Para esto se mezclaron 10 mL de pintura con 2, 6 y 10 mL de cada solución con la ayuda de una probeta y de vasos de precipitación.

Las condiciones normales, es decir, la temperatura de 25 °C se consiguió con la ayuda de una estufa y la presión fue la atmosférica de Quito.

AI.4 DETERMINACIÓN DE LA INFLAMABILIDAD

- Se utilizó un equipo manual Tag, el mismo que está compuesto por una copa cerrada, un baño maría, un termómetro y una fuente de ignición (INEN, 2013, p. 10).

- Una vez preparado el equipo, se colocó agua en el baño maría y 50 mL de la muestra de los desechos de pintura en la copa medidos previamente con una probeta.
- Posteriormente, se conectó la tapa al cuello del baño y se ubicó el termómetro para la medición de la temperatura.
- Luego, se abrió el paso del gas y se encendió la llama con la ayuda de un fósforo.
- El calor fue regulado de tal forma que la temperatura de la muestra se elevó a razón de 1 °C/min.
- Cada vez que la temperatura incrementó en 0,5 °C, se operó el mecanismo de la fuente de ignición de tal manera que la llama pudo ser introducida en el espacio de vapor generado en la copa y retirada inmediatamente después. Esta operación se realizó hasta que la fuente de ignición causó una inflamación de los vapores producidos en la copa.
- Finalmente, se anotó la temperatura de inflamación observada

En la Tabla AI.4 se exponen las temperaturas de inflamación observadas.

Tabla AI.4. Valores del punto de inflamación determinados en las 3 muestras de la mezcla de los desechos de pintura

Muestra	Punto de inflamación (°C)
Muestra 1	38
Muestra 2	31
Muestra 3	35

- Se corrigió la temperatura observada mediante la Ecuación 2.5:

$$PI_c = PI_o + 0,033 * (760 - P)$$

Donde:

PI_c : Punto de Inflamación corregido (°C)

PI_o : Punto de inflamación observado (°C)

P : Presión barométrica en Quito (540 mmHg)

Como ejemplo de cálculo se toma el punto de inflamación de la muestra 1

$$PI_c = 38 + 0,033 * (760 - 540) = 45,26^{\circ}C$$

Los puntos de inflamación corregidos se muestran en la Tabla AI.5.

Tabla AI.5. Valores de puntos de inflamación corregidos

Muestra	Punto de inflamación (°C)
Muestra 1	45,26
Muestra 2	38,26
Muestra 3	42,26

Por lo tanto, el promedio del punto de inflamación de las tres muestras es 41,93 °C ~ 42 °C.

ANEXO II

CÁLCULO DE LAS PROPIEDADES QUE COMPRENDEN LA EVALUACIÓN DEL PROCESO DE ESTABILIZACIÓN/SOLIDIFICACIÓN DE LA MEZCLA DE LOS DESECHOS DE PINTURA

A continuación se detallan los procedimientos y los cálculos de las propiedades que comprenden la evaluación del proceso de estabilización/solidificación a partir de los datos obtenidos en el desarrollo experimental descrito en la sección 2.2 de la parte experimental del presente proyecto.

AII.1 ESTABILIZACIÓN/SOLIDIFICACIÓN DE LA MEZCLA DE DESECHOS DE PINTURA

El procedimiento que se llevó a cabo para elaborar las probetas se describe a continuación:

- Se consideró una base de 1 000 g de cemento para luego calcular las masas del cemento, cal y cenizas mediante el uso de las relaciones expuestas en las Tablas 2.1 y 2.2.
- Después se determinaron las respectivas densidades reales del cemento, cal y cenizas mediante el método del picnómetro y se calcularon con la Ecuación AII.1 (Duarte, 2005, pp. 7-9).

$$\rho = \left(\frac{m_2 - m_1}{(m_2 - m_1) - (m_3 - m_4)} \right) * \rho_{H_2O} \quad [\text{AII.1}]$$

Donde:

ρ : Densidad del cemento, cal y cenizas respectivamente (g/cm^3)

m_1 : Masa del picnómetro vacío (g)

m_2 : Masa del picnómetro con la muestra (g)

m_3 : Masa del picnómetro con la muestra y lleno de agua (g)

m_4 : Masa del picnómetro lleno solo con agua (g)

ρ_{H_2O} : Densidad del agua (1 g/cm³)

- Posteriormente se calculó el volumen de cada componente multiplicando la masa por la densidad calculada anteriormente.
- El siguiente paso consistió en calcular la composición en volumen de cada componente al dividir el volumen de cada uno para el volumen total.
- Una vez determinada la composición, se obtuvieron los volúmenes reales del cemento, cal y cenizas al multiplicar la composición por el volumen de la probeta (altura: 20 cm, diámetro: 10 cm, volumen: 1 570,8 cm³).
- Con las densidades y los volúmenes reales de cada componente, se calcularon las masas reales del cemento, cal y cenizas respectivamente.
- Con las masas reales, se procedió a mezclar los componentes. Las mezclas obtenidas fueron colocadas dentro de los moldes cilíndricos de metal previamente lubricados con aceite quemado para su fácil desmolde.
- Las mezclas fueron expuestas a un tiempo de fraguado de 28 días. Durante el transcurso del tiempo se fue colocando un poco de agua sobre cada molde para ayudar al curado.
- Después de cumplidos los 28 días se procedió a desmoldar para determinar las propiedades físicas, químicas y toxicológicas de cada mezcla.

Para el ejemplo de cálculo se considerará a la muestra M1 de la propuesta de estabilización/solidificación con cemento y cal.

Con la base de 1 000 g de cemento y la relación cal/cemento: 0,20, se obtuvo la masa de este componente así:

$$1\ 000\ g\ cemento * \frac{0,20\ g\ cal}{1\ g\ cemento} = 200\ g\ cal$$

La densidad de la cal se calculó mediante la Ecuación AII.1

$$\rho_{cal} = \left(\frac{11,6 \text{ g} - 10,6 \text{ g}}{(11,6 \text{ g} - 10,6 \text{ g}) - (21,29 \text{ g} - 20,85 \text{ g})} \right) * 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 1,79 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

El volumen (supuesto) se calculó dividiendo la masa por la densidad y La composición en volumen de la cal se obtuvo dividiendo el volumen (supuesto) de la cal para el volumen total, como se expone a continuación:

$$200 \text{ g cal} * \frac{1 \text{ cm}^3 \text{ cal}}{1,79 \text{ g cal}} = 111,73 \text{ cm}^3 \text{ cal}$$

$$\frac{111,73 \text{ cm}^3 \text{ cal}}{911,76 \text{ cm}^3} * 100 = 12,25\%$$

El volumen total es aquel que se consiguió al sumar los volúmenes de cada componente dentro de la mezcla. El volumen real de la cal que intervino en esta mezcla se calculó multiplicando el volumen de la probeta por su composición, para esto se emplea la Ecuación AII.2:

$$V_{cal} = \pi * \frac{(D)^2}{4} * h * V/V \quad \text{[AII.2]}$$

Donde:

D : diámetro de la probeta (cm)

h : altura (cm)

V/V : composición de la cal en la mezcla

Reemplazando los valores se tiene:

$$V_{cal} = \pi * \frac{(10 \text{ cm})^2}{4} * 20 \text{ cm} * 0,1225 = 192,49 \text{ cm}^3$$

La masa real de la cal que se pesó para hacer la mezcla se determinó multiplicando el volumen calculado en el paso anterior por la densidad de la cal, así:

$$192,49 \text{ cm}^3 * \frac{1,79 \text{ g cal}}{1 \text{ cm}^3 \text{ cal}} = 344,57 \text{ g cal}$$

En la Tabla AII.1 se muestran los datos experimentales para la determinación de la densidad del cemento, cal y cenizas.

Tabla AII.1. Datos experimentales para la determinación de la densidad del cemento, cal y cenizas empleados para la estabilización/solidificación de los desechos de pintura

Componente	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m ₄ (g)
Cemento	10,60	11,60	21,49	20,85
Cal	10,60	11,60	21,29	20,85
Cenizas	10,60	11,60	20,82	21,30

En la Tabla AII.2 se expresan las densidades del cemento, cal y cenizas.

Tabla AII.2. Densidad del cemento, cal y cenizas empleados para la estabilización/solidificación de los desechos de pintura

Componente	Densidad (g/cm ³)
Cemento	2,78
Cal	1,79
Cenizas	0,68

En la Tablas AII.3 y AII.4 se exponen las cantidades de cada componente de las mezclas correspondientes a los 4 tratamientos de las 2 propuestas de estabilización/solidificación de los desechos de pintura

Tabla AII.3. Cantidad del cemento, cal y pinturas correspondientes a las mezclas de la estabilización/solidificación de los desechos de pintura

	Masa con respecto a la base: 1 000 g cemento (g)	Volumen con respecto a la base: 1 000 g cemento (cm ³)	V/V (%)	Volumen con respecto al volumen de la probeta (cm ³)	Masa con respecto al volumen de la probeta (g)	Relación
M1						
Cemento	1 000,00	359,71	39,45	619,72	1 722,83	
Pintura	450,00	440,31	48,29	758,58	775,27	0,45

Tabla AII.3. Cantidad del cemento, cal y pinturas correspondientes a las mezclas de la estabilización/solidificación de los desechos de pintura (**continuación...**)

	Masa con respecto a la base: 1 000 g cemento (g)	Volumen con respecto a la base: 1 000 g cemento (cm ³)	V/V (%)	Volumen con respecto al volumen de la probeta (cm ³)	Masa con respecto al volumen de la probeta (g)	Relación
Cal	200,00	111,73	12,25	192,49	344,57	0,20
Total		911,76			2 842,66	
M2						
Cemento	1 000,00	359,71	35,39	555,84	1 545,23	
Pintura	500,00	489,24	48,13	755,98	772,62	0,50
Cal	300,00	167,60	16,49	258,98	463,57	0,30
Total		1 016,55			2 781,42	
M3						
Cemento	1 000,00	359,71	37,17	583,94	1 623,36	
Pintura	450,00	440,31	45,50	714,79	730,51	0,45
Cal	300,00	167,60	17,32	272,07	487,01	0,30
Total		967,62			2 840,88	
M4						
Cemento	Cemento	Cemento	Cemento	Cemento	Cemento	Cemento
Pintura	Pintura	Pintura	Pintura	Pintura	Pintura	Pintura
Cal	Cal	Cal	Cal	Cal	Cal	Cal
Total	Total	Total	Total	Total	Total	Total

Tabla AII.4. Cantidad del cemento, cal, cenizas y pinturas correspondientes a las mezclas de la estabilización/solidificación de los desechos de pintura

	Masa con respecto a la base: 1 000 g cemento (g)	Volumen con respecto a la base: 1 000 g cemento (cm ³)	V/V (%)	Volumen con respecto al volumen de la probeta (cm ³)	Masa con respecto al volumen de la probeta (g)	Relación
M1						
Cemento	1 000,00	359,71	33,97	533,65	1483,54	
Pintura	450,00	440,31	41,59	653,22	667,59	0,45
Cal	200,00	111,73	10,55	165,76	296,71	0,20
Cenizas	100,00	147,06	13,89	218,17	148,35	0,10

Tabla AII.4. Cantidad del cemento, cal, cenizas y pinturas correspondientes a las mezclas de la estabilización/solidificación de los desechos de pintura (**continuación...**)

	Masa con respecto a la base: 1 000 g cemento (g)	Volumen con respecto a la base: 1 000 g cemento (cm ³)	V/V (%)	Volumen con respecto al volumen de la probeta (cm ³)	Masa con respecto al volumen de la probeta (g)	Relación
Total		1 058,82			2 596,20	
M2						
Cemento	1 000,00	359,71	30,91	485,59	1 349,94	
Pintura	500,00	489,24	42,04	660,44	674,97	0,50
Cal	300,00	167,60	14,40	226,25	404,98	0,30
Cenizas	100,00	147,06	12,64	198,52	134,99	0,10
Total		1 163,61			2 564,89	
M3						
Cemento	1 000,00	359,71	32,27	506,90	1 409,19	
Pintura	450,00	440,31	39,50	620,49	634,14	0,45
Cal	300,00	167,60	15,04	236,18	422,76	0,30
Cenizas	100,00	147,06	13,19	207,23	140,92	0,10
Total		1 114,68			2 607,00	
M4						
Cemento	1 000,00	359,71	32,47	510,08	1 418,02	
Pintura	500,00	489,24	44,17	693,75	709,01	0,50
Cal	200,00	111,73	10,09	158,44	283,60	0,20
Cenizas	100,00	147,06	13,28	208,53	141,80	0,10
Total		1 107,74			2 552,44	

En la Figura AII.1 se pueden ver las probetas de las dos propuestas de estabilización/solidificación a los 28 días de haber sido elaboradas.



Figura AII. 1. Probetas de los dos experimentos de estabilización/solidificación a los 28 días de curado

AII.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS CENIZAS

El ensayo TCLP realizado en las cenizas se describe a continuación (EPA, 1992, p. 7-19):

- Se pesaron 100 g de ceniza y se mezclaron con 2 000 mL de ácido acético glacial (CH_3COOH) 0,1 N para obtener una pulpa con una relación sólido: líquido de 1:20.
- La pulpa se sometió a agitación magnética durante 18 horas a 750 rpm.
- Con el propósito de obtener un pH menor a 2, se añadió ácido nítrico (HNO_3) 1N en la pulpa previamente filtrada.
- La solución se envió al Laboratorio de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Central del Ecuador para determinar por absorción atómica los siguientes elementos: arsénico, bario, cadmio, cobre, mercurio, plata, plomo y selenio

AII.3 PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LAS MEZCLAS ESTABILIZADAS/SOLIDIFICADAS

AII.3.1 Determinación de la resistencia a la compresión

- Se dejó que las mezclas cumplan una edad de ensayo de 28 días (fraguado y curado) y luego se las retiró de los moldes.
- Con la ayuda de un flexómetro se midió el diámetro de cada mezcla para determinar el área transversal mediante la Ecuación 2.6.
- Cada cilindro fue colocado sobre el bloque de carga inferior de la máquina de ensayos universal.
- Posteriormente, se alineó el eje de cada cilindro con el bloque de carga esférico (carga superior) y se ajustó el indicador de carga a cero.
- Entonces, se aplicó la carga continuamente y sin impacto a una velocidad de 0,25 MPa/s hasta que el cilindro mostró un patrón de fractura definido, se registró ese valor como la carga máxima aplicada.

- Finalmente, la resistencia a la compresión se calculó mediante el uso de la Ecuación 2.7

En la Tabla AII.5 se presentan los datos experimentales para determinar la resistencia a la compresión de cada uno de los cilindros correspondientes a las mezclas de las 2 propuestas de estabilización/solidificación.

Tabla AII.5. Datos experimentales para determinar la resistencia a la compresión de los cilindros correspondientes a los mezclas de las 2 propuestas de estabilización/solidificación

PROPUESTA	MEZCLAS	DIAMETRO (cm)	ALTURA (cm)	CARGA MÁXIMA (kgf)
Mezcla: pinturas, cemento y cal	M1	10,50	19,50	830,00
	RM1	10,10	18,40	790,00
	M2	10,50	19,50	1 150,00
	RM2	10,50	19,80	1 140,00
	M3	10,50	20,30	385,00
	RM3	10,10	18,80	390,00
	M4	10,50	19,50	1 150,00
	RM4	9,90	17,50	1 050,00
Mezcla: pinturas, cemento, cal y cenizas	M1	10,50	20,00	1 525,00
	RM1	10,50	20,50	1 553,00
	M2	10,20	19,90	1 200,00
	RM2	10,50	20,60	1 240,00
	M3	10,50	20,40	1 210,00
	RM3	10,50	19,90	1 190,00
	M4	10,50	20,40	1 090,00
	RM4	10,50	20,00	1 110,00

Se toma como ejemplo los datos experimentales de la mezcla M1 de la estabilización/solidificación de las pinturas con cemento y cal.

Para el cálculo de la resistencia a la compresión se emplean las Ecuación 2.6 y 2.7.

$$\sigma = \frac{830,00 \text{ kgf}}{\pi * \frac{(10,50 \text{ cm})^2}{4}} * \frac{9,80 \text{ N}}{1 \text{ kgf}} * \frac{(100,00 \text{ cm})^2}{1 \text{ m}^2} = 939 368 \text{ Pa} = 939,37 \text{ kPa}$$

En la Tabla AII.6 se muestran los resultados correspondientes a cada cilindro

Tabla AII.6. Resistencia a la compresión de los cilindros correspondientes a las mezclas de las 2 propuestas de estabilización/solidificación

PROPUESTA	TRATAMIENTO	ESFUERZO (kPa)
Mezcla: pinturas, cemento y cal	M1	939,37
	RM1	966,32
	M2	1 301,53
	RM2	1 290,22
	M3	435,73
	RM3	477,04
	M4	1 301,53
	RM4	1 336,77
Mezcla: pinturas, cemento, cal y cenizas	M1	1 725,95
	RM1	1 757,64
	M2	1 439,19
	RM2	1 403,39
	M3	1 369,44
	RM3	1 346,80
	M4	1 233,63
	RM4	1 256,26

AII.3.2 Determinación de la humedad

La humedad se calculó con el siguiente procedimiento (Flores y Alcalá, 2010, p. 6):

- Los cilindros fueron molidos con la ayuda de un combo hasta reducirlos a un tamaño de partícula de 1 mm aproximadamente.
- Después, se pesó el crisol tarado en una balanza analítica con capacidad de 810,00 g y 0,01 g de precisión, luego se colocó en él 1 g de muestra.
- Seguidamente, se puso el crisol con la muestra dentro de la estufa y se la secó a una temperatura entre 105 y 110 °C durante 1 hora.
- Transcurrida 1 hora de secado, se sacó de la estufa el crisol con la muestra y se dejó enfriar en el desecador durante 30 min, luego se pesó.

- Los pasos 3 y 4 se repitieron hasta obtener un peso constante.

Como ejemplo de cálculo se toman los datos de la mezcla M1 de la estabilización/solidificación de las pinturas con cemento y cal, los mismos que se muestran en la Tabla AII.7.

Tabla AII.7. Datos experimentales para determinar la humedad de los cilindros de la estabilización/solidificación de pinturas con cemento y cal

Mezcla (M)	Réplica	Peso crisol (g)	Peso muestra (g)	Peso crisol más muestra húmeda (g)	Peso del crisol más muestra seca (g)	Humedad (%)
M1	1	46,33	1,00	47,33	47,31	2,00
	2	45,18	1,00	46,18	46,14	4,00
	3	49,35	1,00	50,35	50,31	4,00
RM1	1	44,26	1,00	45,26	45,24	2,00
	2	53,56	1,00	54,56	54,53	3,00
	3	46,7	1,00	47,7	47,68	2,00
M2	1	50,47	1,00	51,47	51,46	1,00
	2	41,82	1,00	42,82	42,8	2,00
	3	50,13	1,00	51,13	51,12	1,00
RM2	1	50,47	1,00	51,47	51,44	3,00
	2	41,82	1,00	42,82	42,78	4,00
	3	50,13	1,00	51,13	51,09	4,00
M3	1	46,33	1,00	47,33	47,31	2,00
	2	45,18	1,00	46,18	46,17	1,00
	3	49,35	1,00	50,35	50,33	2,00
RM3	1	44,26	1,00	45,26	45,25	1,00
	2	53,56	1,00	54,56	54,55	1,00
	3	46,7	1,00	47,7	47,69	1,00
T4	1	48,89	1,00	49,89	49,83	6,00
	2	50,47	1,00	51,47	51,42	5,00
	3	42,75	1,00	43,75	43,71	4,00
RT4	1	46,7	1,00	47,7	47,68	2,00
	2	53,56	1,00	54,56	54,55	1,00
	3	50,12	1,00	51,12	51,11	1,00

- La humedad se calculó mediante el uso de la Ecuación 2.8.

Reemplazando los valores se tiene:

$$h = \left(\frac{47,33 - 47,31}{47,33 - 46,33} \right) * 100 = 2,00 \%$$

El promedio de las humedades para La mezcla M1 es:

$$h = \frac{2,00 \% + 4,00 \% + 4,00 \%}{3} = 3,33 \%$$

En las Tablas AII.7 y AII.8 se muestran los datos experimentales para la determinación de la humedad de las mezclas de la estabilización/solidificación de pinturas con cemento, cal y cenizas.

Tabla AII.8. Datos experimentales para determinar la humedad de los cilindros de la estabilización/solidificación de pinturas con cemento, cal y cenizas

Tratamiento	Réplica	Peso crisol (g)	Peso muestra (g)	Peso crisol más muestra húmeda (g)	Peso del crisol más muestra seca (g)	Humedad (%)
M1	1	41,82	1,00	42,82	42,81	1,00
	2	43,00	1,00	44,00	43,98	2,00
	3	45,18	1,00	46,18	46,16	2,00
RM1	1	44,26	1,00	45,26	45,25	1,00
	2	46,34	1,00	47,34	47,32	2,00
	3	50,38	1,00	51,38	51,36	2,00
M2	1	42,62	1,00	43,62	43,62	0,00
	2	50,48	1,00	51,48	51,47	1,00
	3	41,82	1,00	42,82	42,81	1,00
RM2	1	49,50	1,00	50,50	50,47	3,00
	2	50,38	1,00	51,38	51,37	1,00
	3	42,36	1,00	43,36	43,34	2,00
M3	1	50,47	1,00	51,47	51,45	2,00
	2	53,56	1,00	54,56	54,54	2,00
	3	47,26	1,00	48,26	48,25	1,00
RM3	1	42,91	1,00	43,91	43,89	2,00
	2	42,50	1,00	43,50	43,48	2,00
	3	50,00	1,00	51,00	50,99	1,00

Tabla AII.8. Datos experimentales para determinar la humedad de los cilindros de la estabilización/solidificación de pinturas con cemento, cal y cenizas (**continuación...**)

M4	1	47,26	1,00	48,26	48,25	1,00
	2	50,48	1,00	51,48	51,47	1,00
	3	41,82	1,00	42,82	42,81	1,00
RM4	1	49,50	1,00	50,50	50,49	1,00
	2	50,38	1,00	51,38	51,38	0,00
	3	42,36	1,00	43,36	43,35	1,00

AII.3.3 Determinación del pH y la conductividad

Los datos experimentales del pH y de la conductividad se muestran en las Tablas AII.9 y AII.10.

Tabla AII.9. Datos experimentales para determinar el pH y la conductividad de las mezclas de la estabilización/solidificación de pinturas con cemento y cal

Mezclas (M)	Réplica	pH	Conductividad (uS/cm)
M1	1	11,85	3,29
	2	11,91	3,35
	3	11,73	2,98
RM1	1	11,86	2,07
	2	11,81	3,08
	3	11,90	3,90
M2	1	11,97	2,84
	2	12,10	2,92
	3	11,92	2,73
RM2	1	11,80	1,73
	2	11,71	2,55
	3	11,87	2,89
M3	1	11,80	3,30
	2	11,88	3,63
	3	11,76	2,42
RM3	1	11,59	3,83
	2	11,50	3,41
	3	11,55	2,84

Tabla AII.9. Datos experimentales para determinar el pH y la conductividad de las mezclas de la estabilización/solidificación de pinturas con cemento y cal
(continuación...)

M4	1	11,86	3,77
	2	11,86	3,00
	3	11,92	3,45
RM4	1	11,20	3,62
	2	10,79	3,03
	3	11,51	3,28

Tabla AII.10. Datos experimentales para determinar el pH y la conductividad de las mezclas de la estabilización/solidificación de pinturas con cemento, cal y cenizas

Mezcla (M)	Réplica	pH	Conductividad (uS/cm)
M1	1	11,3	0,58
	2	11,34	0,69
	3	11,40	0,60
RM1	1	12,17	0,45
	2	12,09	0,6
	3	12,12	0,764
M2	1	11,57	0,53
	2	11,52	0,41
	3	11,55	0,45
RM2	1	11,68	0,46
	2	11,77	0,50
	3	11,62	0,36
M3	1	11,54	0,52
	2	11,45	0,61
	3	11,54	0,52
RM3	1	11,45	0,70
	2	11,50	0,51
	3	11,47	0,45
M4	1	11,37	0,41
	2	11,30	0,46
	3	11,45	0,40
RM4	1	11,41	0,77
	2	11,55	0,26
	3	11,45	0,29

Como ejemplo de cálculo se toman los datos de la mezcla M1 de la estabilización/solidificación de pinturas con cemento y cal. El promedio del pH y de la conductividad es:

$$pH = \frac{11,85 + 11,91 + 11,73}{3} = 11,83$$

$$Conductividad = \frac{3,29 \frac{\mu S}{cm} + 3,35 \frac{\mu S}{cm} + 2,98 \frac{\mu S}{cm}}{3} = 3,21 \frac{\mu S}{cm}$$

ANEXO III

DISEÑO DE LA PLANTA DE ESTABILIZACIÓN/SOLIDIFICACIÓN DE LOS DESECHOS DE PINTURA

Al considerar que la capacidad de procesamiento de la planta es de 37,5 m³/día y que la mejor propuesta de estabilización/solidificación es aquella comprendida por las relaciones de pintura/cemento: 0,45; cal/cemento: 0,20 y cenizas/cemento: 0,10 cuya composición en volumen es 33,97 % de cemento, 41,59 % de pintura, 10,55 % de cal y 13,89 % de cenizas expresadas en la Tabla AIII.4., las cantidades para almacenar cada uno de los componentes de la mezcla se muestran en los ejemplos de cálculo.

Por ejemplo, la cantidad de cemento que tendrá que ser almacenada durante un mes de operación (22 días laborables):

$$37,5 \frac{m^3}{día} * \frac{22 \text{ días}}{1 \text{ mes}} * 0,3397 = 280,25 \frac{m^3}{mes} * \frac{1 \text{ gal}}{0,003785 m^3} = 74 \text{ 042,93} \frac{gal}{mes}$$

Las cantidades de cada uno de los componentes se resumen en la Tabla AIII.1.

Tabla AIII.1. Cantidad de cemento, cal, cenizas y pinturas a ser almacenadas en un mes de operación

COMPONENTE	CANTIDAD (m ³ /mes)	CANTIDAD (gal/mes)
CEMENTO	280,25	74 042,93
CAL	87,04	22 995,38
PINTURA	343,12	90 651,92
CENIZAS	114,59	30 275,43

AIII.1 DIMENSIONAMIENTO DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE LOS DESECHOS DE PINTURA

La Figura AIII.1 corresponde al esquema del tanque de almacenamiento de pinturas del cual se deduce la ecuación para su dimensionamiento.

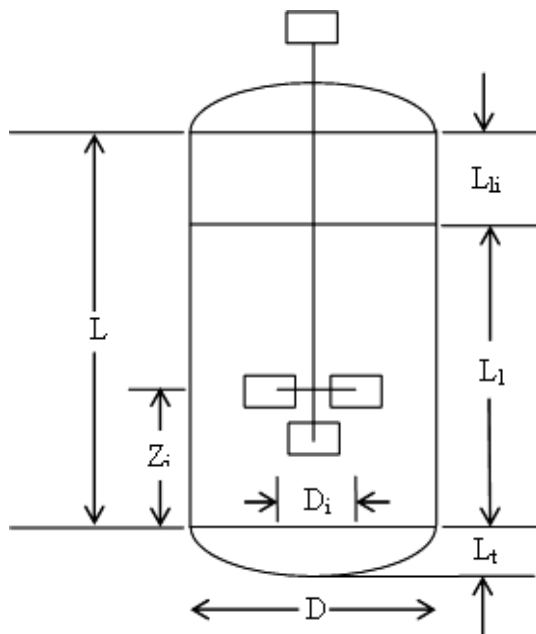


Figura AIII.1. Esquema del recipiente cilíndrico con sistema de agitación para el almacenamiento de pinturas

AIII.1.1 Determinación de las dimensiones del tanque

Se seleccionó un agitador de hélice con 3 palas debido a que este tipo de agitadores son los más comunes, son los más baratos, sirven para trabajar en tanques de todo tipo de tamaño a velocidades entre 300 y 1 500 rpm, con sustancias de viscosidad hasta 1 000 cP y es el indicado para este tipo de mezcla (Palate y Villón, 2006, p. 20; Colina, 2013, p. 18).

Para tanques agitados mediante un agitador de hélice, la relación L/D se presenta en la Ecuación AIII.1 (ASME, 2015).

$$\frac{L}{D} = 1,2 \rightarrow L = 1,2 * D \quad \text{[AIII.1]}$$

Por convección, el espacio libre L_{ji} es igual a 13/12 ft (Peters y Timmerhaus, 2004, p. 702).

Al reemplazar los valores en las Ecuaciones 2.9, 2.12 y AIII.1 se tiene:

$$90\,651,92 \text{ gal} = \left[\frac{\pi}{4} * D^2 * \left(1,2 D - \frac{13}{12} \right) \right] ft^3 * \frac{7,48 \text{ gal}}{1 ft^3} + 0,416 D^3 \text{ gal}$$

$$90\,651,92 = 7,47 D^3 - 6,36 D^2$$

$$7,47 D^3 - 6,36 D^2 - 90\,651,92 = 0 \rightarrow D = 23,27 ft * \frac{30,48 \text{ cm}}{1 ft} * \frac{1 m}{100 \text{ cm}} = 7,09 m$$

$$L = 1,2 * D = 8,51 m$$

Para una tapa bridada y cóncava estándar, la altura de la tapa se define con la Ecuación AIII.2 (ASME, 2015)

$$L_t = 0,139 D \quad \text{[AIII.2]}$$

$$L_t = 0,139 * 7,09 = 0,99 m$$

AIII.1.2 Determinación del espesor del tanque y de la tapa

Los espesores del tanque y de la tapa se calcularon con las Ecuaciones 2.13 y 2.14.

$$e_T = \frac{\left(1,1 * 0,72 \text{ atm} * \frac{14,7 \text{ psi}}{1 \text{ atm}} \right) * \left(3,55 m * \frac{39,37 \text{ in}}{1 m} \right)}{\left(1\,000 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} * \frac{2,2 \text{ lbf}}{1 \text{ kgf}} * \frac{(2,54 \text{ cm})^2}{1 \text{ in}^2} * 0,80 \right) - \left(0,6 * 1,1 * 0,72 \text{ atm} * \frac{14,7 \text{ psi}}{1 \text{ atm}} \right)} + \frac{1}{16} \text{ in}$$

$$e_T = 0,21 \text{ in} * \frac{25,4 \text{ mm}}{1 \text{ in}} = 5,23 \text{ mm}$$

$$e_t = \frac{0,885 * \left(1,1 * 0,72 \text{ atm} * \frac{14,7 \text{ psi}}{1 \text{ atm}} \right) * \left(7,09 m * \frac{39,37 \text{ in}}{1 m} \right)}{\left(1\,000 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} * \frac{2,2 \text{ lbf}}{1 \text{ kgf}} * \frac{(2,54 \text{ cm})^2}{1 \text{ in}^2} * 0,80 \right) - \left(0,1 * 1,1 * 0,72 \text{ atm} * \frac{14,7 \text{ psi}}{1 \text{ atm}} \right)} + \frac{1}{16} \text{ in}$$

$$e_t = 0,32 \text{ in} = 8,02 \text{ mm}$$

AIII.1.3 Determinación de las dimensiones del sistema de agitación

El sistema de agitación consistirá en un agitador de hélice de 3 palas planas. La relación entre la altura que ocupa la mezcla dentro del tanque y el diámetro del rodete se define en la Ecuación AIV.3 (Brown, 1985, p. 530).

$$\frac{L_l}{D_i} = 3,9 \quad \text{[AIII.3]}$$

La altura que ocupa la mezcla dentro del tanque es:

$$L_l = L + L_t \quad \text{[AIII.4]}$$

$$L_l = 8,51 \text{ m} + 0,99 \text{ m} = 9,50 \text{ m}$$

Por lo que:

$$D_i = \frac{9,5}{3,9} = 2,44 \text{ m}$$

Por lo tanto, la relación entre el diámetro interno del tanque y el diámetro de rodete es:

$$\frac{D}{D_i} = \frac{7,09 \text{ m}}{2,44 \text{ m}} = 2,91 \approx 3$$

Con lo que se cumple el rango permitido. Entonces, la altura a la que está el rodete sobre el fondo del tanque es (Brown, 1985, p. 532):

$$\frac{Z_i}{D_i} = 1,3 \quad \text{[AIII.5]}$$

$$Z_i = 1,3 * 2,44 = 3,17 \text{ m}$$

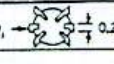
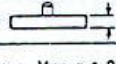







Finalmente, el paso de la hélice es igual a (Brown, 1985, p. 532):

$$L_p = 2 * D_i$$

[AIII.6]

$$L_p = 2 * 2,44 = 4,88 \text{ m}$$

En la Figura AIII.2 se observan los datos correspondientes a este tipo de hélice

Tipo de rodete	$\frac{D_r}{D_i}$	$\frac{Z_i}{D_i}$	$\frac{Z_r}{D_i}$	Hojas cort.		N.º	Ref.	Tipo de rodete	$\frac{D_r}{D_i}$	$\frac{Z_i}{D_i}$	$\frac{Z_r}{D_i}$	Hojas cort.		N.º	Ref.
				N.º	w/D _i							N.º	w/D _i		
Turbina de 6 palas planas  0,25 D _i	3	2,7-3,9	0,75-1,3	4	0,17	1	7	Dos paletas  0,25 D _i	4,35	4,3	0,29	3	0,11	8	3
Igual que en el n.º 1	3	2,7-3,9	0,75-1,3	4	0,10	2	7	Cuatro paletas. Ver n.º 8	3	3	0,5	0		16	2
Igual que en el n.º 1	3	2,7-3,9	0,75-1,3	4	0,04	4	7	Dos paletas. Ver n.º 8	3	3,2	0,33	0		20	4
Igual que en el n.º 1; a = 1, b = 40	3	2,7-3,9	0,75-1,3	0		14*	7	Dos paletas. Ver n.º 8	3	2,7-3,9	0,75-1,3	4	0,10	10	7
Turbina de 6 palas curvadas Tam. de pala como en n.º 1 	3	2,7-3,9	0,75-1,3	4	0,10	3	7	Dos paletas. Ver n.º 8 Ancho de paleta = 0,13 D _i	1,1	0,5	0,19	0		29	10
Turbina de 6 palas forma flecha Tam. de pala como en n.º 1 	3	2,7-3,9	0,75-1,3	4	0,10	5	7	Dos paletas. Ver n.º 8 Ancho de paleta = 0,17 D _i	1,1	0,4	0,10	0		29	10
Turbina radial con anillo deflector 				0		7	9	Hélice de 3 palas Paso de la hélice = 2 D _i 	3	2,7-3,9	0,75-1,3	4	0,10	15	7
Turbina cerrada, de 6 palas. Anillo deflector de 20 hojas	2,4	0,74	0,9	0		11	6	Igual que el n.º 15; a = 1,7, b = 18	3,3	2,7-3,9	0,75-1,3	0		21*	7
Semejante, mas no idéntica a la n.º 11	3	2,7-3,9	0,75-1,3	0		12	7	Igual que el n.º 15, pero con paso = 1,33 D _i	16			3	0,06	18	5
Igual que la 12, pero sin anillo deflector.	3	2,7-3,9	0,75-1,3	4	0,10	13	7	Igual que el n.º 15, pero con paso = 1,09 D _i	9,6			3	0,06	23	5
Turbina axial de 8 palas con ángulo de 45°. Ver n.º 17 	3	2,7-3,9	0,75-1,3	4	0,10	9	7	Igual que el n.º 15, pero con paso = 1,05 D _i ; a = 2,3, b = 18	2,7	2,7-3,9	0,75-1,3	0		27*	7
Turbina axial 4 palas con ángulo de 60°  0,25 D _i	3	3	0,50	0		17	2	Igual que el n.º 15, pero con paso = 1,04 D _i ; a = 0, b = 18	4,5	2,7-3,9	0,75-1,3	0		25*	7
Turbina axial de 4 palas con ángulo de 45°. Ver n.º 17.	5,2	5,2	0,87	0		19	2	Igual que el n.º 15, pero con paso = 0 D _i	3	2,7-3,9	0,75-1,3	4	0,10	24	7
Igual que la n.º 19	2,4-3,0	2,4-3,0	0,4-0,5	0		22	2	Igual que el n.º 15, pero con paso = 0 D _i ; a = 2,1, b = 18	3	2,7-3,9	0,75-1,3	0		26*	7
Disco con 16 paletas  0,1 D _i , 0,35 D _i	2,5	2,5	0,75	4	0,25	6	1	Igual que el n.º 15, pero con paso = 0 D _i	3,8	3,5	1,0	0		28	8

D_r = diámetro del rodete; D_i = diámetro del depósito; n = n.º de revoluciones por segundo; w = ancho de las hojas del cortacorrientes; Z_i = altura que está el rodete sobre el fondo del depósito; Z_r = altura del nivel del líquido en el depósito.

Figura AIII.2. Longitudes características de diferentes tipos de rodetes (Brown, 1985, p. 532)

AIII.1.4 Determinación de la potencia del motor

La potencia del motor se determinó mediante las Ecuaciones 2.10 y 2.11.

Como el N_p depende del número de Reynolds de la mezcla, Re , éste se determinó con la Ecuación AIII.7 la misma que es característica para un líquido en agitación.

$$Re = \frac{N * D_i^2 * \rho_{mezcla}}{\mu_{mezcla}}$$

[AIII.7]

Donde N es la velocidad de agitación y es igual a 300 rpm para agitadores de hélice; ρ_{mezcla} es la densidad de la mezcla y es igual a $1,022 \text{ g/cm}^3$, Mientas que μ_{mezcla} es la viscosidad de la mezcla, la misma que fue medida con la ayuda de un viscosímetro Brookfield LVT con el spindle 63 a 12 rpm y dio como resultado 500 cP.

Al reemplazar los valores en las Ecuaciones 2.10, 2.11 y AIII.7 se obtiene:

$$Re = \frac{300 \frac{\text{rev}}{\text{min}} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} * (2,44 \text{ m})^2 * 1022 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{500 \text{ cP} * \frac{1 \text{ P}}{100 \text{ cP}} * \frac{\text{g}}{\text{P} * \text{cm} * \text{s}} * \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ g}} * \frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}}} \rightarrow Re = 60\,845,79$$

Con la ayuda de las curvas que se muestran en la Figura AIII.3 para el consumo de energía de diversos agitadores, se obtiene que N_p es 0,9 (Brown, 1985, p. 532).

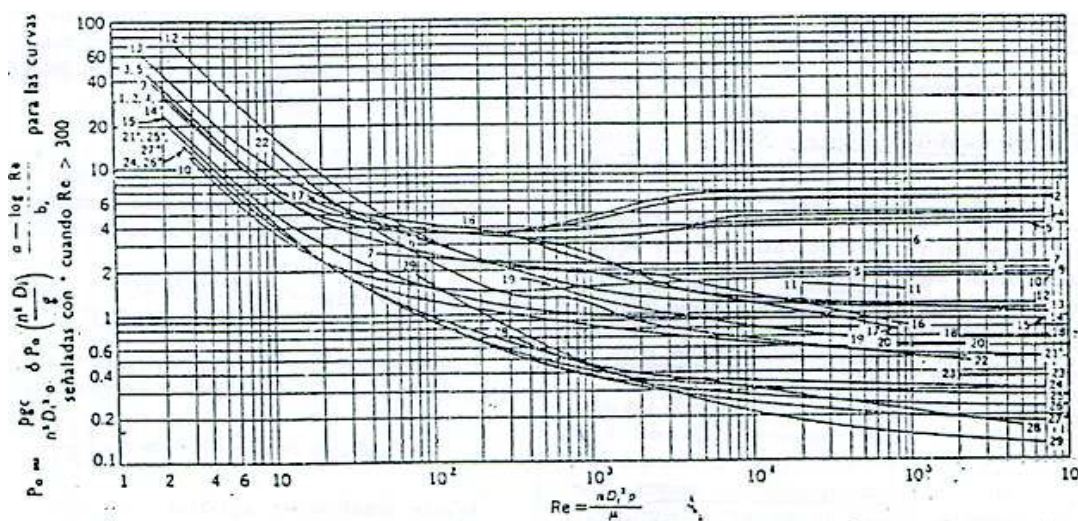


Figura AIII.3. Consumo de energía de diversos agitadores, expresado por el número de potencia, P_o o N_p , y el número de Reynolds, Re (Brown, 1985, p. 532)

Entonces, la P_{eje} es:

$$P_{eje} = \frac{0,9 * \left(300 \frac{\text{rev}}{\text{min}} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}\right)^3 * (2,44 \text{ m})^5 * 1022 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{1 \frac{\text{kg m}}{\text{s}^2} N}$$

$$P_{eje} = 9\,943\,803,87\text{ W} = 9\,934,80\text{ kW}$$

Y la P_{motor} se determinó de la siguiente manera:

$$P_{motor} = \frac{9\,934,80\text{ kW}}{0,85} = 11\,688,00\text{ kW} = 15\,673,86\text{ HP}$$

Por lo tanto, el motor que se requiere para agitar la mezcla de desechos de pintura es

$$P_{motor} = 15\,673,86\text{ HP} = 11\,688,00\text{ kW}$$

AIII.2 DIMENSIONAMIENTO DE LOS SILOS DE ALMACENAMIENTO DEL CEMENTO, CAL Y CENIZAS

La Figura AIII.4 corresponde al esquema del tanque de almacenamiento de pinturas del cual se deduce la ecuación para su dimensionamiento.

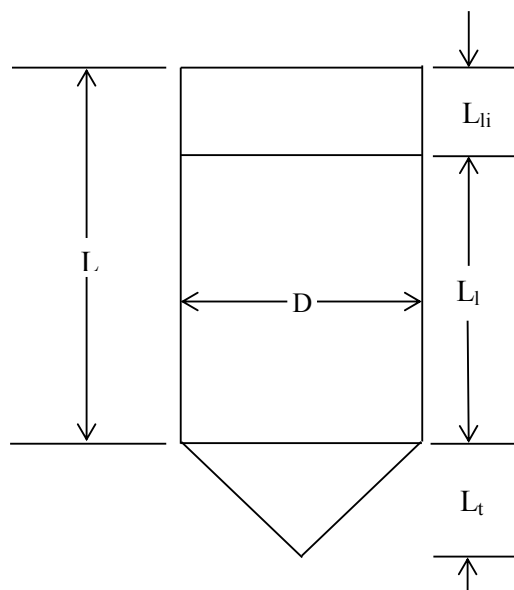


Figura AIII.4. Esquema del recipiente cilíndrico con tapa cónica para el almacenamiento del cemento, cal y cenizas

A manera de ejemplo, se describe el procedimiento para dimensionar el tanque de almacenamiento de cemento para un mes de operación mediante el uso del flujo

expresado en la Tabla AIII.1. Entonces, el volumen del tanque está dado por las Ecuaciones 2.9 y 2.15.

El término L_t que corresponde a la altura de la tapa, está definida por la tangente del ángulo comprendido entre el vértice del cono y la base y se expresa por la Ecuación AIV.8 (ASME, 2015).

$$\tan \theta = \frac{L_t}{\frac{D}{2}} \rightarrow L_t = \frac{D * \tan \theta}{2} \quad [\text{AIII.8}]$$

Donde:

D : diámetro del tanque (m)

Se consideró un ángulo de 45° para una adecuada descarga del material.

Al reemplazar los valores en las Ecuación 2.9 y 2.15 se tiene:

$$74\,042,93 \text{ gal} = \left[\frac{\pi}{4} * D^2 * \left(D - \frac{13}{12} \right) \right] ft^3 * \frac{7,48 \text{ gal}}{1 ft^3} + 0,13 D^3 \text{ gal}$$

$$74\,042,93 = 6,00 D^3 - 6,36 D^2$$

$$6,00 D^3 - 6,36 D^2 - 74\,042,93 = 0 \rightarrow D = 23,45 ft * \frac{30,48 cm}{1 ft} * \frac{1 m}{100 cm} = 7,15 m$$

$$L = D = 7,15 m$$

La altura de la tapa es:

$$L_t = \frac{7,15 m * \tan 45^\circ}{2}$$

$$L_t = 3,58 m$$

Los espesores del tanque y de la tapa se calcularon con las Ecuaciones 2.13 y 2.16.

Por lo tanto:

$$e_r = \frac{\left(1,1 * 0,72 \text{ atm} * \frac{14,7 \text{ psi}}{1 \text{ atm}}\right) * \left(3,6 \text{ m} * \frac{39,37 \text{ in}}{1 \text{ m}}\right)}{\left(1\ 000 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} * \frac{2,2 \text{ lbf}}{1 \text{ kgf}} * \frac{(2,54 \text{ cm})^2}{1 \text{ in}^2} * 0,8\right) - \left(0,6 * 1,1 * 0,72 \text{ atm} * \frac{14,7 \text{ psi}}{1 \text{ atm}}\right)} + \frac{1}{16} \text{ in}$$

$$e_r = 0,21 \text{ in} * \frac{25,4 \text{ mm}}{1 \text{ in}} = 5,28 \text{ mm}$$

$$e_t = \frac{\left(1,1 * 0,72 \text{ atm} * \frac{14,7 \text{ psi}}{1 \text{ atm}}\right) * \left(7,2 \text{ m} * \frac{39,37 \text{ in}}{1 \text{ m}}\right)}{2 * \left(1000 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} * \frac{2,2 \text{ lbf}}{1 \text{ kgf}} * \frac{(2,54 \text{ cm})^2}{1 \text{ in}^2} * 0,80 - 0,6 * 1,1 * 0,72 \text{ atm} * \frac{14,7 \text{ psi}}{1 \text{ atm}}\right) * \cos\left(\frac{45}{2}\right)} + \frac{1}{16} \text{ in}$$

$$e_t = 0,21 \text{ in} * \frac{25,4 \text{ mm}}{1 \text{ in}} = 5,28 \text{ mm}$$

En la Tabla AIII.2 se resumen las dimensiones de los tanques de almacenamiento del cemento, la cal y las cenizas.

Tabla AIII.2. Dimensiones de los tanques de almacenamiento del cemento, cal y cenizas

Equipo	Diámetro (m)	Altura (m)	Espesor tanque (mm)	Altura tapa (m)	Espesor tapa (mm)
Almacenamiento cemento	7,15	7,15	5,28	3,58	5,59
Almacenamiento cal	4,88	4,88	4,10	2,44	4,36
Almacenamiento cenizas	5,34	5,34	4,36	2,67	4,59

AIII.3 DISEÑO DE LA BANDA TRANSPORTADORA

Para el diseño de la banda transportadora se tiene que considerar que la banda tiene que transportar diariamente 35,4 t de cemento, 7,1 t de cal y 3,5 t de cenizas.

Si se trabaja 1 hora al día, entonces la capacidad de la banda quedaría definida de la siguiente manera:

$$\left(35,4 \frac{t}{día} \text{ cemento} + 7,1 \frac{t}{día} \text{ cal} + 3,5 \frac{t}{día} \text{ cenizas} \right) * \frac{1 \text{ día}}{1 \text{ h}} = 46 \text{ t/h}$$

Además, se tiene que considerar la disposición de los equipos en planta para determinar la distancia que tiene que recorrer la banda para transportar todo el material hacia el tanque mezclador, así, el largo de la banda está definida por la suma de los diámetros de los tanques de almacenamiento más la separación de 1,5 m entre ellos más la distancia de 1,5 m antes del tanque de cemento y después del tanque de cenizas por seguridad, de esta manera, el largo de la banda queda definida de la siguiente manera:

$$L_{banda} = (1,5 + D_{cemento} + 1,5 + D_{cal} + 1,5 + D_{cenizas} + 1,5) \quad [AIII.9]$$

Donde:

D: diámetro de los tanques de almacenamiento respectivo (m)

Entonces,

$$L_{banda} = (1,5 + 7,2 + 1,5 + 4,9 + 1,5 + 5,4 + 1,5) \text{ m} = 23,5 \text{ m}$$

Por lo tanto, para transportar el cemento, cal y cenizas a través de la banda transportadora hacia el tanque mezclador, se seleccionó la banda marca China Rock Crusher, con un largo de 30 m y capacidad de transporte de 100 t/h, tal como se indica en el catálogo expuesto en la Figura AIV.1 del Anexo IV.

AIII.4 DIMENSIONAMIENTO DEL TANQUE MEZCLADOR

La Figura AIII.1 también sirve para ilustrar el esquema del tanque mezclador a partir del cual se deduce la ecuación para su dimensionamiento.

AIII.4.1 Determinación de las dimensiones del tanque

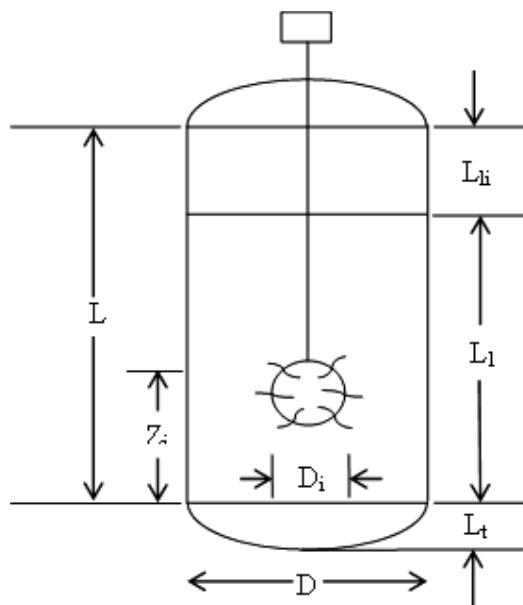


Figura AIII.5. Esquema del recipiente cilíndrico con sistema de agitación para el mezclado de cemento, cal, pinturas y cenizas

Para el dimensionamiento de tanque mezclador se tiene que considerar que se va a procesar $37,5 \text{ m}^3/\text{día}$. Entonces, el volumen del tanque está dado por las Ecuaciones 2.9 y 2.12.

Se seleccionará un agitador de turbina con 6 palas planas debido a que este tipo de agitadores sirven para trabajar en tanques de todo tipo de tamaño a velocidades entre 30 y 400 rpm, con sustancias de viscosidad hasta $100\,000 \text{ cP}$ y es el indicado para este tipo de mezcla.

Para un tanque con agitador de turbina a presión atmosférica la relación L/D se define en la Ecuación AIII. 10 (ASME, 2015)

$$\frac{L}{D} = 1,4 \quad \text{[AIII.10]}$$

El espacio libre del tanque es igual a $13/12 \text{ ft}$ (Peters y Timmerhaus, 2004, p. 702).

Al reemplazar los valores en las Ecuación 2.9 y 2.12 se obtiene:

$$9\,907,53 \text{ gal} = \left[\frac{\pi}{4} * D^2 * \left(1,4 * D - \frac{13}{12} \right) \right] ft^3 * \frac{7,48 \text{ gal}}{1 ft^3} + 0,416 D^3 \text{ gal}$$

$$9\,907,53 = 8,64 D^3 - 6,36 D^2$$

$$8,64 D^3 - 6,36 D^2 - 9\,907,53 = 0 \rightarrow D = 10,72 ft * \frac{30,48 \text{ cm}}{1 ft} * \frac{1 m}{100 \text{ cm}} = 3,27 m$$

$$L = 1,4 * D = 4,58 m$$

Por convención, para una tapa bridada y cóncava estándar, la altura de la tapa se define por la Ecuación AIII.2.

Por lo tanto:

$$L_t = 0,139 D = 0,139 * 3,27 = 0,45 m$$

AIII.4.2 Determinación del espesor del tanque y de la tapa

Los espesores del tanque y de la tapa se calcularon mediante las Ecuación 2.13 y 2.14.

Por lo tanto:

$$e_T = \frac{\left(1,1 * 0,72 \text{ atm} * \frac{14,7 \text{ psi}}{1 \text{ atm}} \right) * \left(1,64 m * \frac{39,37 \text{ in}}{1 m} \right)}{\left(1\,000 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} * \frac{2,2 \text{ lbf}}{1 \text{ kgf}} * \frac{(2,54 \text{ cm})^2}{1 \text{ in}^2} * 0,80 \right) - \left(0,60 * 1,1 * 0,72 \text{ atm} * \frac{14,7 \text{ psi}}{1 \text{ atm}} \right)} + \frac{1}{16} \text{ in}$$

$$e_T = 0,13 \text{ in} * \frac{25,4 \text{ mm}}{1 \text{ in}} = 3,28 \text{ mm}$$

$$e_t = \frac{0,885 * \left(1,1 * 0,72 \text{ atm} * \frac{14,7 \text{ psi}}{1 \text{ atm}} \right) * \left(3,27 m * \frac{39,37 \text{ in}}{1 m} \right)}{\left(1\,000 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} * \frac{2,2 \text{ lbf}}{1 \text{ kgf}} * \frac{(2,54 \text{ cm})^2}{1 \text{ in}^2} * 0,80 \right) - \left(0,1 * 1,1 * 0,72 \text{ atm} * \frac{14,7 \text{ psi}}{1 \text{ atm}} \right)} + \frac{1}{16} \text{ in}$$

$$e_t = 0,18 \text{ in} = 4,58 \text{ mm}$$

AIII.4.3 Determinación de las dimensiones del sistema de agitación

El sistema de agitación consistirá en un agitador de turbina de 6 palas planas. La relación entre la altura que ocupa la mezcla dentro del tanque y el diámetro del rodete se define con la Ecuación AIII.3.

La altura que ocupa la mezcla dentro del tanque según la Ecuación AIII.4 es:

$$L = 4,58 \text{ m} + 0,45 \text{ m} = 5,03 \text{ m}$$

Por lo que:

$$D_i = \frac{5,03}{3,90} = 1,29 \text{ m}$$

Por lo tanto, la relación entre el diámetro interno del tanque y el diámetro de rodete es:

$$\frac{D}{D_i} = \frac{3,27 \text{ m}}{1,29 \text{ m}} = 2,53 \approx 3$$

Con lo que se cumple el rango permitido (Brown, 1985, p. 532).

Entonces, la altura a la que está el rodete sobre el fondo del tanque según la Ecuación AIII.5 es:

$$Z_i = 1,3 * 1,29 = 1,68 \text{ m}$$

Finalmente, el paso de la hélice, según la Figura AIII.2 para la turbina de 6 palas planas es:

$$L_p = 0,25 * D_i$$

[AIII.11]

$$L_p = 0,25 * 1,29 = 0,32 \text{ m}$$

AIII.4.4 Determinación de la potencia del motor

La potencia del eje y la potencia del motor están dadas por las Ecuación 2.10 y 2.11.

El número de Reynolds, Re , para un líquido en agitación se calcula con la Ecuación AIII.7.

Donde N es la velocidad de agitación y es igual a 120 rpm para agitadores de turbina; ρ_{mezcla} es la densidad de la mezcla, la misma que se calculó mediante los datos de densidad de cada componente y sus respectivas proporciones en volumen manifestados en la Tabla AII.2. y en la Tabla AII.4., y fue determinada con la Ecuación AIII.12:

$$\rho_{mezcla} = \rho_{cemento} * X_{cemento} + \rho_{pintura} * X_{pintura} + \rho_{cal} * X_{cal} + \rho_{cenizas} * X_{cenizas} \quad [AIII.12]$$

$$\rho_{mezcla} = 2,78 * 0,3397 + 1,022 * 0,4159 + 1,79 * 0,1055 + 0,68 * 0,1389 = 1,65 \frac{kg}{m^3}$$

Mientras que μ_{mezcla} es la viscosidad de la mezcla, la misma que fue medida con la ayuda de un viscosímetro Brookfield LVT con el spindle 64 a 60 rpm y dio como resultado 18 000 cP.

Al reemplazar los valores en la Ecuación AIV.7 se tiene:

$$Re = \frac{120 \frac{rev}{min} * \frac{1 min}{60 s} * (1,29 m)^2 * 1 650 \frac{kg}{m^3}}{18 000 cP * \frac{1 P}{100 cP} * \frac{g}{P * cm * s} * \frac{1 Kg}{1 000 g} * \frac{100 cm}{1 m}} \rightarrow Re = 305,09$$

Con la ayuda de la curva mostrada en la Figura AIII.3 para el consumo de energía de diversos agitadores se obtiene que N_p es 4 (Brown, 1985, p. 532)

Entonces, la P_{eje} se calculó así:

$$P_{eje} = \frac{4 * \left(120 \frac{rev}{min} * \frac{1 min}{60 s}\right)^3 * (1,29 m)^5 * 1 650 \frac{kg}{m^3}}{1 \frac{kg m}{s^2} \frac{1}{N}}$$

$$P_{eje} = 188 617,71 W = 188,62 kW$$

Y la P_{motor} se determinó de la siguiente manera:

$$P_{motor} = \frac{188,62 kW}{0,85} = 221,91 kW = 297,57 HP$$

Por lo tanto, el motor que se requiere para agitar la mezcla comprendida por el cemento, cal, desechos de pintura y cenizas en el tanque mezclador es

$$P_{motor} = 297,57 HP = 221,91 kW$$

AIII.5 DISEÑO DE LA BOMBA CENTRÍFUGA

Para transportar la mezcla de desechos de pintura desde el tanque de almacenamiento hasta el mezclador, se utilizará una bomba centrífuga cuya potencia se determinó con la Ecuación 2.18.

El caudal de la mezcla de pinturas con la que se va a descargar al tanque mezclador en un día de operación, se calculó bajo la premisa de que el tiempo de descarga es de 3 h:

$$Q = 90 651,92 \frac{gal}{mes} * \frac{1 mes}{22 días} * \frac{1 día}{3 h} * \frac{0,003785 m^3}{1 gal} = 5,2 \frac{m^3}{h}$$

La bomba tiene que vencer una altura de 6,5 m para lograr bombear la mezcla de desechos de pintura hasta el tanque mezclador que será cargada por la parte

superior del mismo. La altura de bomba está comprendida por la altura del tanque y la altura de su tapa, además de la altura a la que está ubicado el equipo por encima del nivel o piso. A esta altura de bombeo, a la bomba le corresponde el 67% de rendimiento. Entonces, al reemplazar los valores en la Ecuación 2.18 se tiene:

$$P_{bomba} = \frac{6,5 \text{ m} * 1650 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 5,2 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} * \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}}{0,67}$$

$$P_{bomba} = 226,59 \text{ w} = 0,23 \text{ kW} = 0,31 \text{ HP}$$

Por lo tanto, para transportar la mezcla de desechos de pintura desde su tanque de almacenamiento hacia el mezclador, se seleccionó la bomba marca DEBEM, con una potencia de 0,5 HP (0,37 kW), un flujo de 6 m³/h, tal como se indica en el catálogo expuesto en la Figura AIV.1 del Anexo IV (Debem, 2015).

Sobre la base del caudal de operación de la bomba seleccionada, el tiempo de bombeo para el transporte de la mezcla de desechos de pintura desde su tanque de almacenamiento hasta el tanque mezclador en un día de operación se presenta en la Ecuación AIII.13 (Ruiz, 2014, p. 227).

$$t_{bombeo} = \frac{V_p}{Q} \quad \text{[AIII.13]}$$

Donde:

Q: caudal de operación (m³/h)

V_p: volumen de la mezcla de pintura (m³)

Al reemplazar los valores en la Ecuación AIII.13 se tiene

$$t_{bombeo} = \frac{15,6 \text{ m}^3}{6,0 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}} = 2,6 \text{ h} = 156 \text{ min}$$

Cabe mencionar que las pérdidas friccionales y localizadas se consideraron despreciables.

AIII.6 DISEÑO DE LAS TUBERÍAS

De acuerdo al diseño de la planta de estabilización/solidificación, solo se requieren tuberías para trasladar la mezcla de desechos de pintura desde su tanque de almacenamiento hacia el tanque mezclador.

Las tuberías están comprendidas en una línea de succión, antes de la bomba, y en una línea de descarga, después de la bomba.

Al considerar que, la velocidad máxima con que se puede transportar el material en la tubería de succión es 1,83 m/s y la velocidad con la que se transporta el material por la tubería de descarga es 2,44 m/s (Perry y Green, 2008, p. 644), el dimensionamiento de las tuberías se muestra a continuación (Bello y Pino, 2008, p. 12).

$$Caudal = 6 \frac{m^3}{h} = 0,00167 \frac{m^3}{s}$$

$$Velocidad \text{ en la línea de succión} = 6 \frac{pies}{s} = 1,83 \frac{m}{s}$$

$$\text{Área en la línea de succión} = \frac{Caudal}{Velocidad} \quad [AIII.14]$$

$$\text{Área en la línea de succión} == \frac{0,00167 \frac{m^3}{s}}{1,83 \frac{m}{s}} = 0,000913 m^2$$

$$\text{Diámetro de tubería de succión} = \sqrt{\frac{4 * A}{\pi}} \quad [AIII.15]$$

$$\text{Diámetro de tubería de succión} = \sqrt{\frac{4 * 0,000913 \text{ m}^2}{\pi}} = 0,034 \text{ m} = 1,34 \text{ pulg}$$

$$\text{Velocidad en la línea de descarga} = 8 \frac{\text{pies}}{\text{s}} = 2,44 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{Área en la línea de descarga} = \frac{0,00167 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{2,44 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0,000684 \text{ m}^2$$

$$\text{Diámetro de tubería de descarga} = \sqrt{\frac{4 * 0,000684 \text{ m}^2}{\pi}} = 0,0295 \text{ m} = 1,16 \text{ pulg}$$

Para definir la longitud de la tubería se debe tomar en cuenta que, la línea de succión comprende 1,5 m de distancia entre el tanque de almacenamiento de las pinturas y el tanque mezclador, mientras que la línea de carga a este último corresponde a la altura de bombeo. Entonces, la longitud de la tubería será de 8 m.

En conclusión, la tubería de succión tiene un diámetro de 1,34 pulg, la tubería de descarga tiene un diámetro de 1,16 pulg y la longitud de la tubería es de 8 m.

Por lo tanto, para transportar la mezcla de desechos de pintura desde el tanque de almacenamiento hacia el mezclador, se seleccionó las tuberías de acero inoxidable marca TUBACERO, con un diámetro de 1½ in para la tubería de succión y de 1¼ in para la tubería de descarga, como se indica en el catálogo expuesto en la Figura AIV.3 del Anexo IV (Tubacero, 2007, p. 37)

AIV.7 DISEÑO DE LAS VÁLVULAS

El diseño de la válvula para descargar la mezcla de desechos de pintura desde su tanque de almacenamiento hacia el mezclador se basó en su diámetro nominal, el mismo que debe coincidir con el diámetro de la tubería de descarga, 1,16 pulg determinado en el paso anterior.

El catálogo del cual se seleccionó la válvula según su diámetro nominal se muestra en la Figura AIV.4 del Anexo IV.

ANEXO IV

CATÁLOGO DE LOS EQUIPOS SELECCIONADOS

AIV.1 BANDA TRANSPORTADORA



Modelo	Ancho de banda (mm)	Inclinación (°)	Velocidad de banda (m/s)	Capacidad de transporte(t/h)	Potencia(≤30m) (kilovatio)
B500	500	0-17	1.0-2.0	100-200	4-7.5
B650	650	0-17	1.0-2.0	190-380	4-11
B800	800	0-17	1.0-2.0	300-600	5.5-18.5
B1000	1000	0-17	1.0-2.0	490-900	7.5-22
B1200	1200	0-17	1.0-2.0	730-1400	11-30

Figura AIV.1. Especificaciones de la banda transportadora
(China Rock Crusher, 2011)

AV.3. TUBERÍAS

NPS	Diámetro Ext. (mm)	Espesor/ Masa			
		5S	10S	40S	80S
1/8	10.3		1.24 0.28	1.73 0.36	2.41 0.46
1/4	13.7		1.65 0.49	2.24 0.63	3.02 0.80
3/8	17.1		1.65 0.63	2.31 0.85	3.2 1.10
1/2	21.3	1.65 0.80	2.11 1.00	2.77 1.27	3.73 1.62
3/4	26.7	1.65 1.03	2.11 1.28	2.87 1.68	3.91 2.19
1	33.4	1.65 1.29	2.77 2.08	3.38 2.50	4.55 3.23
1 1/4	42.2	1.65 1.65	2.77 2.69	3.56 3.38	4.85 4.47
1 1/2	48.3	1.65 1.90	2.77 3.12	3.68 4.05	5.08 5.41
2	60.3	1.65 2.38	2.77 3.93	3.91 5.44	5.54 7.48
2 1/2	73.0	2.11 3.68	3.05 5.26	5.16 8.62	7.01 11.41
3	88.9	2.11 4.52	3.05 6.45	6.49 11.29	7.62 15.27
3 1/2	101.6	2.11 5.17	3.05 7.40	5.74 13.57	8.08 18.63
4	114.3	2.11 5.81	3.05 8.34	6.02 16.07	8.50 22.31
5	141.3	2.77 9.45	3.40 11.58	6.55 21.78	9.52 30.95
6	168.3	2.77 11.31	3.40 13.82	7.11 28.26	10.97 42.56
8	219.1	2.77 14.78	3.76 19.94	8.18 42.53	12.70 64.63
10	273.1	3.40 22.62	4.19 27.96	9.27 60.29	12.70 81.46
12	323.9	3.96 33.00	4.57 36.22	9.52 73.82	12.70 93.44
14	355.6	3.96 34.23	4.78 41.30		
16	406.4	4.19 41.60	4.78 47.29		
18	457.0	4.19 46.83	4.78 53.26		
20	508.0	4.78 59.22	5.54 69.09		
22	559.0	4.78 65.75	5.54 76.10		
24	610.0	5.54 83.11	6.35 95.13		
30	762.0	6.35 119.09	7.92 148.22		

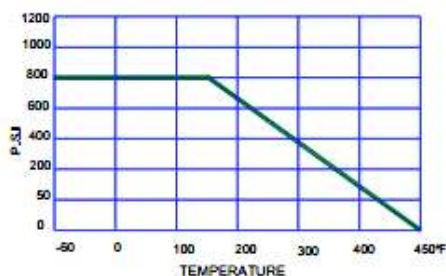
Figura AIV.3. Especificaciones de las tuberías de succión y de descarga del tanque de almacenamiento de la mezcla de desechos de pintura la mezcla
(Tubacero, 2007, p. 37)

AV.4. VÁLVULA



Válvulas Esféricas de acero inoxidable Pasaje total

CWP 1000 PSI -TIPO COMPACTO (DOS PIEZAS)
EXTREMOS ROSCADOS

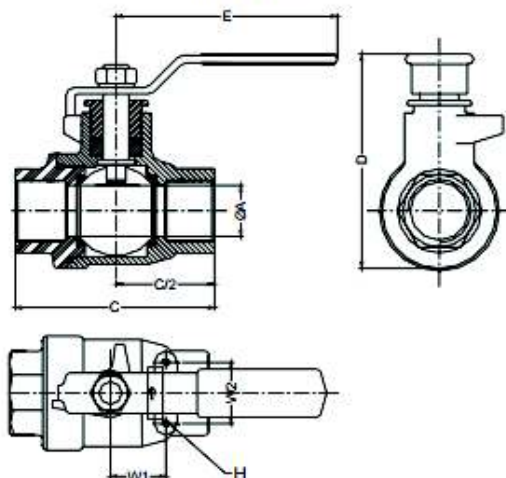


MATERIAL:

- ACERO INOXIDABLE
- S/ASTM A 351 CF8M

CONSTRUCCIÓN:

- PASO TOTAL .
- ROSCAS TÍPICAS NPT ó BSPT.
- PREPARADAS PARA AUTOMATIZAR FÁCILMENTE.
- VASTAGO INEXPULSABLE .
- ENPAQUETADURA DEL VASTAGO REGULABLE.
- CON TRABA PARA CANDADO.
- FLUJO TOTAL BIDIRECCIONAL.



		DIMENSIONES GENERALES									
TAMAÑO NOMINAL	NPS PULG	1/4	3/8	1/2	3/4	1	1 1/4	1 1/2	2	2 1/2	3
	DN mm	8	10	15	20	25	32	40	50	65	80
Ø INTERNO DEL PASAJE A		11.2	12.6	16	20	25	32	38.1	50.8	-	-
C		54	54	68	76	88	98	120	134	-	-
D		55	55	64	67	83	89	100	108	-	-
E		97.5	97.5	500	500	-	-	-	-	-	-
W1		12.7	12.7	12.7	22.4	22.4	25.4	25.4	25.4	30.0	35.0
W2		28.5	28.5	28.5	35	35	38.1	38.1	38.1	70.0	70.0
H (UNC)		10-24	10-24	10-24	10-24	10-24	1/4-20	1/4-20	1/4-20	1/4-20	1/4-20
PESO (KG)		0.23	0.23	0.40	0.60	1.22	1.55	2.32	3.60	-	-

Figura AIV.4. Especificaciones de la válvula de descarga de la mezcla de desechos de pintura
(Taval, 2015)

ANEXO V

DISEÑO DE LA CELDA DE CONFINAMIENTO

AV.1. DETERMINACIÓN DEL ÁREA, DEL VOLUMEN DE LA CELDA

Al considerar una producción de $37,5 \text{ m}^3/\text{día}$ de mezcla estabilizada y un tiempo de vida útil de 5 años, el volumen que ocupará la mezcla en la celda, V_c , se calculó con la Ecuación 2.20.

$$V_c = 37,5 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} * \frac{22 \text{ días}}{1 \text{ mes}} * \frac{12 \text{ meses}}{1 \text{ año}} * 5 \text{ años} = 49\,500 \text{ m}^3$$

Para fines de diseño, se tomará en cuenta una altura de 15 m (Norma Oficial Mexicana, 1993b, p. 6).

Para el cálculo del área se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones:

La celda constará de 15 pisos, los mismos que serán llenados en 5 años. Esto nos indica que en 1 año se llenarán 3 pisos y que 1 piso será llenado en 4 meses.

La producción de mezcla estabilizada destinada a confinarse para su posterior solidificación durante 4 meses de operación será:

$$37,5 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} * \frac{22 \text{ días}}{1 \text{ mes}} * 4 \text{ meses} = 3\,300 \text{ m}^3$$

Se conoce que en un bidón caben 55 galones ($0,208175 \text{ m}^3$), entonces, el número de bidones que se requieren para almacenar los $3\,300 \text{ m}^3$ de mezcla estabilizada es:

$$3\,300 \text{ m}^3 * \frac{1 \text{ bidón}}{0,208175 \text{ m}^3} = 15\,852,05 \text{ barriles} \approx 15\,852 \text{ barriles}$$

Los bidones serán dispuestos en filas, 147 serán colocados en el sentido horizontal

de la celda, mientras que 108 en sentido vertical.

Se conoce que un barril tiene 88 cm de alto y 55 cm de diámetro, por lo que las dimensiones de la celda se calculan:

$$0,55 \text{ m} * 147 = 80,85 \approx 81 \text{ m de largo}$$

$$0,55 \text{ m} * 108 = 59,40 \approx 59 \text{ m de ancho}$$

Entonces, el área de la celda y el volumen de la celda quedan definidos de la siguiente manera:

$$A_c = 81 \text{ m} * 59 \text{ m} = 4\,779 \text{ m}^2$$

$$V_c = 4\,779 \text{ m}^2 * 15 \text{ m} = 71\,685 \text{ m}^3$$

Cabe mencionar que, los bidones deberán ser colocados en la celda de tal forma que quede el espacio para un bidón tanto en el sentido horizontal como en el sentido vertical. Estos espacios deberán ser ocupados al final con el propósito de solucionar algún imprevisto que ocurra durante la colocación de los bidones.

AV.2. DISEÑO DEL SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE LIXIVIADOS

Para el diseño de la piscina de recolección de lixiviados se consideró que la cantidad de infiltración en el vertedero es igual a la precipitación media anual de Pifo que corresponde a un valor de 960 mm aproximadamente (Capservs Medios, 2015, p. 24).

Entonces, el flujo de lixiviados que se generarían durante la vida de la celda de confinamiento de la mezcla de desechos de pintura estabilizados/solidificados se determinó con la Ecuación 2.21. Por lo tanto, el flujo de lixiviados es:

$$\dot{Q}_{lix} = 4\,779\, m^2 * 960 \frac{mm}{año} * \frac{1\, m}{1\,000\, mm} = 4\,587,84 \frac{m^3}{año}$$

Según los requerimientos de la empresa Incinerox, se diseñó una piscina para un mes de operación, entonces, el volumen de la piscina para la recolección de los lixiviados se calculó con la Ecuación 2.22.

$$V_p = 4\,587,84 \frac{m^3}{año} * \frac{1\, año}{12\, meses} = 382,32 \frac{m^3}{mes}$$

La empresa solicitó un factor de seguridad de 1,2 en caso de que existan variaciones en el flujo de lixiviados y se dé el caso en el que el flujo real sea mayor al supuesto. Adicionalmente, pidió considerar una altura de 2 m, ya que esta es una altura manejable para piscinas de este tipo. Entonces, el volumen real de la piscina es:

$$V_{pr} = 382,32\, m^3 * 1,2 = 458,78\, m^3$$

La altura de la piscina se calculó con la Ecuación 2.23. Al reemplazar los valores en la Ecuación se obtiene:

$$A_p = \frac{458,78\, m^3}{2\, m} = 229,39\, m^2$$

Como se trata de una piscina rectangular y se conoce el área, se definieron valores al azar para las medidas del largo y del ancho de la piscina, y mediante prueba y error se determinaron sus dimensiones. Por lo tanto, al área de la piscina le corresponden 17,0 m de largo y 13,5 m de ancho.

ANEXO VI

ANÁLISIS ECONÓMICO

AVI.1. VAN (VALOR ACTUAL NETO)

El valor actual neto, es un criterio de toma de decisiones para analizar si es viable o no un proyecto en el que se va a invertir dinero para obtener ganancias.

Bajo esta consideración, el VAN del proyecto de la planta de estabilización/solidificación de la mezcla de desechos de pintura se calculó con la siguiente fórmula (Blank y Tarquin, 2006, pp. 522-640):

$$VAN = F * \left(\frac{1 - (1 + i)^{-n}}{i} \right) * F_0 \quad [AVI.1]$$

En donde, F es el flujo de caja, i es la tasa mínima atractiva de retorno impuesta por el dueño del proyecto con la que espera recuperar la inversión, n es el número de períodos y F_0 es la inversión.

Al reemplazar los valores expuestos en la Tabla 3.34 del apartado 3.5.7, se tiene:

$$VAN = -1\,336\,781,53 * \left(\frac{1 - (1 + 0,30)^{-5}}{0,30} \right) - 1\,242\,946,45 = -4\,498\,771,11$$