

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA**

**DISEÑO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE LODOS  
PROVENIENTES DE LA INDUSTRIA DE GALVANIZADO,  
MEDIANTE ENCAPSULADO.**

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

**LUCIA GABRIELA CALLE PIEDRA**

**(lucy\_calle@hotmail.com)**

**DIRECTOR: ING. JAIME RODOLFO ROJAS CACHUMBA**

**(jaime.rojas@bekaert.com)**

**CO-DIRECTORA: ING. LUCIA MARGARITA MONTENEGRO AGUAS**

**(lucia.montenegro@epn.edu.ec)**

**Quito, febrero 2015**

© Escuela Politécnica Nacional 2015  
Reservados todos los derechos de reproducción

## **DECLARACIÓN**

Yo, Lucía Gabriela Calle, 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.

---

Lucía Gabriela Calle

## **CERTIFICACIÓN**

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Lucía Gabriela Calle Piedra, bajo nuestra supervisión.

---

Ing. Jaime Rojas

**DIRECTOR DE PROYECTO**

---

Ing. Lucía Montenegro

**CODIRECTORA DE PROYECTO**

## **AUSPICIO**

La presente investigación contó con el auspicio financiero de IDEAL ALAMBREC BEKAERT.

## **AGRADECIMIENTO**

De manera especial al Ingeniero Jaime Rojas, por su gestión, apoyo técnico y financiero para el desarrollo de esta investigación.

A la Ingeniera Lucía Montenegro por su apoyo a lo largo de toda la realización de esta tesis.

A mi padre, el Ingeniero Mario Calle, por el soporte tanto técnico como emocional, logístico y económico para terminar este trabajo. A mi madre que ha hecho todo lo posible por apoyarme siempre en esta carrera. Y a mi hermano, que después de todo lo que ha visto aún decidió estudiar esta desafiante profesión.

A toda una lista de amigos que de una u otra manera me ayudaron en su momento a lo largo de todo este proceso, Luis Morales, Diego Navarrete, Alejandra Erazo, José Navas, Iván Valdiviezo, Angela Paz y Miño y Andrea Cunguán; gracias por el apoyo brindado, espero algún día devolverles el favor.

Finalmente, quiero agradecer a Doris Delgado y Francisco Arguello, por el apoyo moral, día a día; sin ustedes no hubiera terminado. A ti mi Do, gracias por el toque de color y las malas noches vividas a expensas de ayudarme.

## DEDICATORIA

Al ser que influye indirectamente en mi vida,

A mi familia: Mario, Lucía y Mario Paúl,

A mi persona favorita,

Al primer lector de mi tesis

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
<b>RESUMEN</b>	<b>XI</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>XIII</b>
<b>1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b>	
1.1 Residuos de galvanizado y sus implicaciones ambientales	1
1.1.1 Generalidades	1
1.1.2 Galvanizado por inmersión en caliente	2
1.1.3 Descripción de procesos identificados en el galvanizado por inmersión en caliente	3
1.1.3.1 Desengrase	3
1.1.3.2 Decapado	5
1.1.3.3 Fosfatado	6
1.1.3.4 Trefilado	7
1.1.3.5 Recocido de proceso	8
1.1.3.6 Fluxado	8
1.1.3.7 Galvanizado	9
1.1.3.8 Templado	10
1.1.4 Tipos de residuos sólidos generados en el proceso de galvanizado en caliente	10
1.1.4.1 Lodos y concentrados provenientes de baños de desengrase y decapado	13
1.1.4.2 Lodos y concentrados provenientes de baños de fosfatado	14
1.1.4.3 Lodos y concentrados provenientes de tratamiento de agua de los procesos de enfriamiento	15
1.1.4.4 Matas, escorias y cenizas de zinc	16
1.2 Encapsulado de residuos sólidos	17
1.2.1 Mecanismos de estabilización	18
1.2.1.1 Macroencapsulación	19
1.2.1.2 Microencapsulación	19
1.2.1.3 Adsorción de contaminantes en la matriz	20
1.2.1.4 Precipitación de contaminantes por reacción con la matriz	21
1.2.2 Eficacia de los procesos de estabilización	21
1.2.2.1 Ensayos de extracción y lixiviación	22
1.2.2.2 Ensayo de toxicidad TCLP (Toxicity characteristics leaching procedure)	23
1.2.2.3 Ensayos físicos	24
1.2.2.4 Ensayo de resistencia a la compresión libre	24
1.2.3 Tipos de encapsulantes	25
1.2.3.1 Cemento	26
1.2.3.2 Resinas orgánicas termoestables	32
1.2.4 Normativa ambiental vigente para residuos sólidos	35



1.2.4.1	Ordenanza municipal 404 para el Distrito Metropolitano de Quito	35
1.2.4.2	Norma técnica de desechos peligrosos y especiales	35
1.2.4.3	Norma técnica para el control de descargas líquidas	36
<b>2</b>	<b>PARTE EXPERIMENTAL</b>	<b>38</b>
2.1	Caracterización física y química de los lodos provenientes de los procesos de fosfatado y enfriamiento de la industria de galvanizado	38
2.1.1	Muestreo	38
2.1.2	Determinación de pH	38
2.1.3	Determinación de la temperatura	39
2.1.4	Determinación de la humedad y elaboración de curva de secado	39
2.1.5	Determinación de la densidad	41
2.1.6	Determinación de la concentración de metales pesados en los lixiviados de los lodos provenientes del proceso de fosfatado y enfriamiento	41
2.2	Evaluación del proceso de encapsulado de lodos utilizando cemento	42
2.2.1	Evaluación de la lixiviación de contaminantes a partir de residuo encapsulado	43
2.2.2	Evaluación de la resistencia a la compresión del residuo encapsulado	45
2.3	Evaluación del proceso de encapsulado de lodos utilizando resina poliéster insaturada	47
2.4	Comparación técnica y económica del proceso de encapsulado para escoger el encapsulante que permita la máxima reducción de los contaminantes y el cumplimiento de la norma técnica de la Ordenanza 404.	49
2.5	Dimensionamiento de los equipos que conforman el proceso de encapsulado.	51
2.5.1	Secador	53
2.5.2	Tanque de mezcla	53
2.5.3	Equipo de vibrocompactación	54
<b>3</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>56</b>
3.1	Caracterización física y química de los lodos provenientes de los procesos de fosfatado y enfriamiento de la industria de galvanizado	56
3.1.1	Determinación de pH	56
3.1.2	Determinación de la temperatura	57
3.1.3	Determinación de la humedad	58
3.1.4	Elaboración de la curva de velocidad de secado	60
3.1.5	Determinación de la densidad	65

3.1.6	Determinación de la concentración de metales pesados en los lixiviados de los lodos provenientes del proceso de fosfatado y enfrió	66
3.2	Evaluación del proceso de encapsulado de lodos utilizando cemento	68
3.2.1	Concentración en lixiviados de zinc, plomo y níquel	68
3.2.2	Resistencia a la compresión	82
3.3	Evaluación del proceso de encapsulado de lodos utilizando resina poliéster insaturada	87
3.4	Comparación técnica y económica del proceso de encapsulado para escoger el encapsulante que permita la máxima reducción de los contaminantes y el cumplimiento de la norma técnica de la Ordenanza 404.	95
3.4.1	Porcentaje de reducción de los metales pesados (zinc, plomo, níquel)	95
3.4.2	Cumplimiento de la norma técnica de la Ordenanza 404 para la concentración de zinc, plomo y níquel en el lixiviado de las muestras encapsuladas	97
3.4.3	Resistencia a la compresión	100
3.4.4	Tiempo de secado	101
3.4.5	Precio del encapsulante	102
3.5	Dimensionamiento de los equipos que conforman el proceso de encapsulado.	104
3.5.1	Selección de las operaciones unitarias	105
3.5.2	Balance de masa	106
3.5.3	Diagramas de proceso	106
3.5.4	Descripción detallada del proceso	109
3.5.5	Flujo de producto	110
3.5.6	Selección de la capacidad de los equipos involucrados en el proceso	112
	3.5.6.1 Secador	112
	3.5.6.2 Tanque de mezcla	115
	3.5.6.3 Equipo de vibrocompactación	116
3.5.4	Distribución de equipos en planta	118
<b>4</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>122</b>
4.1	Conclusiones	122
4.2	Recomendaciones	124
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>125</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>135</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

		PÁGINA
<b>Tabla 1.1</b>	Sustancias identificadas en los residuos sólidos por operación unitaria en el galvanizado por inmersión en caliente	12
<b>Tabla 1.2</b>	Clasificación de métodos de regeneración de baños de decapado en función del ácido presente en el mismo	14
<b>Tabla 1.3</b>	Aplicación de materiales para la estabilización de residuos con metales pesados	25
<b>Tabla 1.4</b>	Composición química del cemento Portland en porcentaje en peso	26
<b>Tabla 1.5</b>	Límites máximos permisibles en el extracto PECT (Prueba de Lixiviación) para constituyentes inorgánicos (metales pesados)	36
<b>Tabla 1.6</b>	Límites máximos permisibles de descargas líquidas a cauce de agua para constituyentes inorgánicos (metales pesados)	37
<b>Tabla 2.1</b>	Composición de especímenes encapsulados con cemento	44
<b>Tabla 2.2</b>	Valores mínimos de resistencia a la compresión en adoquines por aplicación	46
<b>Tabla 2.3</b>	Composición especímenes encapsulados con resina poliéster insaturada	47
<b>Tabla 2.4</b>	Precio de los materiales utilizados en el proceso de encapsulado	51
<b>Tabla 3.1</b>	Resultados de pH reportados para los lodos de fosfato y enfrió	56
<b>Tabla 3.2</b>	Temperatura de los lodos de fosfato y enfrió después de ser extraídos del filtro	57
<b>Tabla 3.3</b>	Resultados de contenido de humedad en los lodos de fosfato y enfrió	58
<b>Tabla 3.4</b>	Densidad de lodos de fosfato y enfrió	65
<b>Tabla 3.5</b>	Resultados de concentración de metales en lixiviado de lodos de fosfatado y enfrió y comparación con la norma técnica de la Ordenanza 404	66
<b>Tabla 3.6</b>	Concentraciones de zinc en función de la composición lodo:mortero (L:M) y lodo hormigón (L:H)	69

<b>Tabla 3.7</b>	Concentraciones de plomo en función de la composición lodo: mortero (L:M) y lodo:hormigón (L:H)	70
<b>Tabla 3.8</b>	Concentraciones de níquel en función de la composición lodo: mortero (L:M) y lodo:hormigón (L:H)	70
<b>Tabla 3.9</b>	Resultados de resistencia a la compresión obtenidos por réplica para diferentes composiciones lodo: mortero (L:M) y lodo: hormigón (L:H).	83
<b>Tabla 3.10</b>	Valores mínimos de resistencia a la compresión en adoquines por aplicación y comparación con el valor máximo obtenido	87
<b>Tabla 3.11</b>	Concentración de metales pesados en función de la relación en peso lodo:resina	88
<b>Tabla 3.12</b>	Tiempo de secado requerido para diferentes encapsulantes	101
<b>Tabla 3.13</b>	Precio estimado por 100 kg de muestra encapsulada	102
<b>Tabla 3.14</b>	Diagrama de recorrido de producto en la planta de tratamiento de residuos sólidos producto de galvanizado	111
<b>Tabla 3.15</b>	Capacidad y dimensiones del secador seleccionado por catálogo	113
<b>Tabla 3.16</b>	Capacidad y dimensiones del tanque de mezclado seleccionado por catálogo	116
<b>Tabla 3.17</b>	Capacidad necesaria del equipo de vibrocompactación	116
<b>Tabla 3.18</b>	Capacidad y dimensiones del vibrocompactador seleccionado por catálogo	118

## ÍNDICE DE FIGURAS

		PÁGINA
<b>Figura 1.1</b>	Microestructura típica de una capa de zinc obtenida mediante galvanizado de acero	1
<b>Figura 1.2</b>	Esquema de galvanizado discontinuo de piezas con doble inmersión	2
<b>Figura 1.3</b>	Esquema de galvanizado continuo de alambre con cilindro giratorio inmerso en el baño de zinc	3
<b>Figura 1.4</b>	Diagrama de bloques del proceso de galvanizado en caliente	4
<b>Figura 1.5</b>	Mecanismos de estabilización de contaminantes en una matriz de encapsulante	19
<b>Figura 1.6</b>	Microencapsulación de Cd en matriz de cemento en (a) baja y (b) alta magnificación. Imágenes tomadas mediante microscopio electrónico de barrido	20
<b>Figura 1.7</b>	Reacciones del cemento Portland	27
<b>Figura 1.8</b>	Precipitados de metales formados en función de pH en encapsulado con cemento	29
<b>Figura 1.9</b>	Porcentaje de iones metálicos en el lixiviado como una función del pH. El cálculo del porcentaje de iones metálicos lixiviados está basado en el total de metal contenido en el residuo.	30
<b>Figura 1.10</b>	Resistencia a la compresión para muestra encapsulada con 20% desecho sólido contaminado 80 % cemento	31
<b>Figura 1.11</b>	Micrográfica obtenida mediante microscopio electrónico de transmisión de arcilla pura (a) y arcilla estabilizada con polímero al 10% de concentración. (b)	33
<b>Figura 2.1</b>	Muestras encapsuladas con cemento y hormigón a 30%, 40% y 50% de relación en peso lodo:encapsulante	44
<b>Figura 2.2</b>	Bloques encapsulados con cemento y hormigón en proceso de curado	46
<b>Figura 2.3</b>	Muestras encapsuladas con resina al 30%, 40% y 50% de relación lodo:encapsulante	48
<b>Figura 2.4</b>	Secuencia de operaciones unitarias contempladas en el diseño de la planta de tratamiento de residuos sólido provenientes de galvanizado	51
<b>Figura 3.1</b>	Curvas de contenido de humedad en función del tiempo por réplica	

	para el lodo de fosfato	61
<b>Figura 3.2</b>	Curvas de contenido de humedad en función del tiempo por réplica para el lodo de enfrió	62
<b>Figura 3.3</b>	Curva de velocidad de secado para lodo de fosfato	63
<b>Figura 3.4</b>	Curva de velocidad de secado para lodo de enfrió	64
<b>Figura 3.5</b>	Concentración de zinc presente en los lixiviados (mg/L) en función de la composición lodo:mortero (L:M)	71
<b>Figura 3.6</b>	Concentración de plomo presente en los lixiviados (mg/L) en función de la composición lodo:mortero(L:M)	71
<b>Figura 3.7</b>	Concentración de níquel presente en los lixiviados (mg/L) en función de la composición lodo:mortero (L:M)	72
<b>Figura 3.8</b>	Concentración de zinc presente en los lixiviados (mg/L) en función de la composición lodo:hormigón (L:H)	72
<b>Figura 3.9</b>	Concentración de plomo presente en los lixiviados (mg/L) en función de la composición lodo:hormigón (L:H)	72
<b>Figura 3.10</b>	Concentración de níquel presente en los lixiviados (mg/L) en función de la composición lodo:hormigón (L:H)	73
<b>Figura 3.11</b>	pH medio del lixiviado en función de la composición lodo:encapsulante	75
<b>Figura 3.12</b>	Concentración de zinc en lixiviados en función de la relación en peso lodo:mortero y lodo:hormigón	76
<b>Figura 3.13</b>	Concentración de plomo en lixiviados en función de la relación en peso lodo:mortero y lodo:hormigón	77
<b>Figura 3.14</b>	Concentración de níquel en lixiviados en función de la relación en peso lodo:mortero y lodo:hormigón	78
<b>Figura 3.15</b>	Capacidad de retención de zinc en matriz en función de la composición lodo:encapsulante	80
<b>Figura 3.16</b>	Capacidad de retención de plomo en matriz en función de la composición lodo:encapsulante	80
<b>Figura 3.17</b>	Capacidad de retención de níquel en matriz en función de la composición lodo:encapsulante	81
<b>Figura 3.18</b>	Resistencia a la compresión (MPa) en bloques de diferente	

	composición lodo:mortero	83
<b>Figura 3.19</b>	Resistencia a la compresión (MPa) en bloques de diferente composición lodo:hormigón	84
<b>Figura 3.20</b>	Observación de grietas en los bloques	85
<b>Figura 3.21</b>	Resistencia a la compresión según norma NTE INEN 1485 en función de la relación en peso lodo:encapsulante y comparación con norma NTE INEN 1488	86
<b>Figura 3.22</b>	Concentración de zinc presente en los lixiviados (mg/L) en función de la composición lodo:resina	89
<b>Figura 3.23</b>	Concentración de plomo en los lixiviados (mg/L) en función de la composición lodo:resina	89
<b>Figura 3.24</b>	Concentración de níquel presente en los lixiviados (mg/L) en función de la composición lodo:resina	89
<b>Figura 3.25</b>	Concentración de zinc en lixiviados en función de relación en peso lodo:resina y comparación con Norma Técnica de la Ordenanza 404.	91
<b>Figura 3.26</b>	Concentración de plomo en lixiviados en función de relación en peso lodo:resina y comparación con Norma Técnica de la Ordenanza 404.	92
<b>Figura 3.27</b>	Concentración de níquel en lixiviados en función de relación en peso lodo:resina y comparación con Norma Técnica de la Ordenanza 404.	92
<b>Figura 3.28</b>	Porcentaje de retención de metales en matriz de resina en función de la relación en peso lodo:resina	94
<b>Figura 3.29</b>	Porcentaje de retención de zinc en matriz en función de la relación en peso lodo:encapsulante	95
<b>Figura 3.30</b>	Porcentaje de retención de plomo en matriz en función de la relación en peso lodo:encapsulante	96
<b>Figura 3.31</b>	Porcentaje de retención de níquel en matriz en función de la relación en peso lodo:encapsulante	96
<b>Figura 3.32</b>	Concentración de metales en lixiviados (mg/L) en función de composición lodo:encapsulante	98
<b>Figura 3.33</b>	Observación de aglomeración de sólidos en la parte inferior del material encapsulado con resina	100
<b>Figura 3.34</b>	Diagrama BFD de línea de producción de bloques encapsulados	107

<b>Figura 3.35</b>	Diagrama PFD de línea de producción de bloques encapsulados	108
<b>Figura 3.36</b>	Diagrama esquemático del secador batch WATROPUR 50	114
<b>Figura 3.37</b>	Diagrama esquemático de la concretera marca Bagant	117
<b>Figura 3.38</b>	Diagrama esquemático del vibrocompactador MANSERCO	119
<b>Figura 3.39</b>	Lay out de línea de producción de bloques encapsulados	120
<b>Figura 3.40</b>	Cortes transversales de la línea de producción de bloques encapsulados	121



## ÍNDICE DE ANEXOS

	<b>PÁGINA</b>
<b>ANEXO I</b> Resumen de Test estándar para la determinación nivel laboratorio de agua (humedad) contenida en sólidos y rocas mediante diferencia de masa.	136
<b>ANEXO II</b> Secuencia de cálculo para la elaboración de la curva de secado	138
<b>ANEXO III</b> Resumen de Test estándar para la determinación de la gravedad específica de sólidos por picnómetro de agua	144
<b>ANEXO IV</b> Resumen de Método 1311 Características de toxicidad, Procedimiento de lixiviación	148
<b>ANEXO V</b> INEN 1485. Adoquines. Determinación de la Resistencia a la Compresión.	152
<b>ANEXO VI</b> INEN 1488. Adoquines. Requisitos	155

## RESUMEN

La presente investigación tiene como principal objetivo diseñar una planta de tratamiento de lodos provenientes de la industria de galvanizado, mediante encapsulado. Para el efecto, en primera instancia, se caracterizó física y químicamente a los residuos contaminados. Se determinó que el lodo proveniente del proceso de enfriamiento incumple en la concentración de plomo y zinc (con valores de 294,0 mg/L y 5,5 mg/L, respectivamente) según la especificación establecida en la Norma Técnica de Residuos Peligrosos de la Ordenanza 404 mientras que el lodo proveniente del proceso de fosfatado contiene valores de níquel (20,8 mg/L) y zinc (2 500,0 mg/L) que superan la Norma Técnica de Descargas Líquidas a cauce de agua.

Se comparó la eficacia de estabilización entre dos materiales previamente determinados, cemento y resina poliéster insaturada, a diferentes composiciones residuo:encapsulante, para escoger el tratamiento que presente mayor factibilidad técnica y económica. Se evaluó la capacidad de retención de los metales pesados en la matriz, el cumplimiento de los niveles máximos permisibles establecidos en la Ordenanza 404 y la resistencia a la compresión de la muestra encapsulada.

El análisis del diseño experimental permitió demostrar que la composición lodo:encapsulante influye de manera estadísticamente significativa en la concentración de metales en los lixiviados de la muestra encapsulada y que la cantidad de lodo añadido a la muestra debilita al bloque solidificado reduciendo su resistencia a la compresión después de 25 días de curado.

Así también, se demostró que el cemento tiene mayor capacidad de retención para una misma proporción lodo:encapsulante al compararlo con la resina como consecuencia de los diferentes mecanismos de estabilización que utilizan para fijar los contaminantes. La concentración de zinc en lixiviados de las muestras encapsuladas con resina (57,7 mg/L) superaron en mínimo 40 veces los valores obtenidos cuando se utilizó cemento (1,5 mg/L), sea en forma de mortero u hormigón. Para el plomo, la tendencia se mantuvo, aunque la diferencia fue

menor, las concentraciones en lixiviados (9,8 mg/L) superaron por 10 veces aproximadamente los datos que se reportaron para cemento (0,9 mg/L). El níquel no presentó diferencias significativas entre las muestras estabilizadas con cemento y aquellas con resina (0,15 mg/L aproximadamente para los dos encapsulantes).

Como resultado final se obtuvo que el cemento en su variante como mortero, al 50% de composición residuo:encapsulante es el tratamiento que presenta mayor factibilidad técnica y económica. Posee una capacidad de retención en la matriz aceptable de los metales correspondiente a 99,94% para zinc, 96,68% para el plomo y 99,28% para el níquel, lo cual implica una concentración en lixiviados <1,5 mg/L, <0,9 mg/L y <0,15 mg/L para zinc, plomo y níquel respectivamente. La resistencia a la compresión reportada para este tratamiento es equivalente a 3,65 MPa y el costo estimado por 100 kg de muestra encapsulada asciende a 15,96 USD que es menor en 12 veces a la inversión necesaria si se utiliza resina poliéster insaturada.

Finalmente, se diseñó la planta con el tratamiento descrito para una capacidad de 2 500 kg/mes de residuos contaminados, considerando las operaciones unitarias de secado, mezcla, vibroprensado y curado. El diseño involucró la realización de los diagramas BFD, PFD, recorrido de producto y Lay Out así como el dimensionamiento y selección de una balanza, un secador, una mezcladora y un vibroprensador. La planta contempla la implementación de un secador de 0,13 m<sup>3</sup> con 7 placas de secado cuya superficie promedio es 0,4 m<sup>2</sup>, una mezcladora cuya capacidad nominal es 0,20 m<sup>3</sup> y un vibroprensador manual con 4 moldes de 10 x 20 x 40 cm que permite la elaboración de 240 bloques día.

## INTRODUCCIÓN

Todo proceso industrial lleva asociado a su actividad productiva la generación de material residual, el cual, de no encontrar una aplicación posterior, termina siendo incorporado al medio ambiente o confinado en lugares destinados para tal efecto. La gestión de residuos sólidos y en particular la de desechos peligrosos es un tema de preocupación moderno que se ha ido desarrollando a medida que la sociedad ha cambiado su estructura y sus esquemas de producción y de consumo (Casal, Dominguez y Delvasto, 2011, p. 47, Martínez, 2005, p. 11).

La entrada en vigencia de la Ordenanza 213 en el año 2007, actualizada como 404 en el 2013, obliga a las empresas localizadas en el Distrito Metropolitano de Quito a mantener un control de las actividades que realicen e impliquen impactos o riesgos ambientales con potencial de afectar la salud pública y la calidad ambiental en el área urbana. Las normativas ambientales derivadas de esta Ordenanza son muy estrictas en lo que respecta a límites máximos permisibles de metales pesados para desechos sólidos industriales. El incumplimiento de estas normas conlleva a la suspensión y/o revocatoria de los permisos ambientales en las empresas (Concejo del Distrito Metropolitano de Quito, 2014a, pp. 41-42).

La determinación del riesgo de contaminación que puede generar un residuo al ambiente se mide con el test TCLP, método 1311 de la EPA (Agencia de Protección Ambiental en los Estados Unidos) cuyo objetivo es simular las condiciones normales a las que está expuesto un residuo en un relleno sanitario y estimar si la concentración de contaminantes que se liberarán del mismo son mayores a los límites máximos permisibles establecidos en cada localidad (Rihm, Arellano y Sancha, 2002, p. 4).

La producción de residuos industriales en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) asciende a 258 t/día equivalentes al 12,5% del total de residuos generados en la ciudad. Aunque este valor es significativamente menor a los residuos domiciliarios en cuanto al peso en producción global (1 370 t/día equivalentes al 66,4%), tienen

gran importancia por las implicaciones asociadas a la salud y el medio ambiente (PNUMA, Distrito Metropolitano de Quito y FLACSO, 2011, pp. 98-99).

En el año 2006 se cuantificó la producción de residuos peligrosos en el DMQ determinándose que ascendía a 7 265 t/año, de los cuales apenas el 12% recibe un tratamiento o se deposita en lugares autorizados. Los principales generadores son el sector florícola con 3 000 t/año, el metal mecánico y de galvanoplastia con 2 003 t/año y el textil con 1 557 t/año (PNUMA, Distrito Metropolitano de Quito y FLACSO, 2011, p. 99).

En lo que concierne a tratamiento de los residuos, no se registran datos a partir del año 2008 donde se reporta la gestión de 45 000 t de residuos peligrosos por parte de la Secretaría de Ambiente. Dentro de esta categoría, los residuos que han sido gestionados mayoritariamente son los aceites usados, los desechos hospitalarios y los residuos industriales peligrosos (PNUMA, Distrito Metropolitano de Quito y FLACSO, 2011, p. 102).

La industria de galvanizado de alambre por inmersión en caliente genera residuos sólidos tóxicos constituidos por los lodos resultantes de los baños de proceso, desengrase, decapado, fosfatado y enjuague, así como los lodos que se obtienen del tratamiento de estas aguas residuales. La composición de los mismos es variada con contenido de níquel, cobre, cromo, zinc y otros metales pesados. Como consecuencia, son clasificados como residuos peligrosos y no pueden disponerse directamente en un relleno sanitario (Fundes, 2003, pp. 16-17).

Generalmente estos materiales se acumulan alrededor de la fuente de generación como alternativa a su gestión; sin embargo, esta solución no es factible a largo plazo por los altos costes de almacenamiento, transporte y posterior tratamiento que se generan. Con este antecedente, la estabilización o encapsulado de residuos sólidos se presenta como opción para disminuir el grado contaminante de los desechos y reducir su impacto ambiental con el objetivo de ser clasificados como no peligrosos y gestionados con esas características.

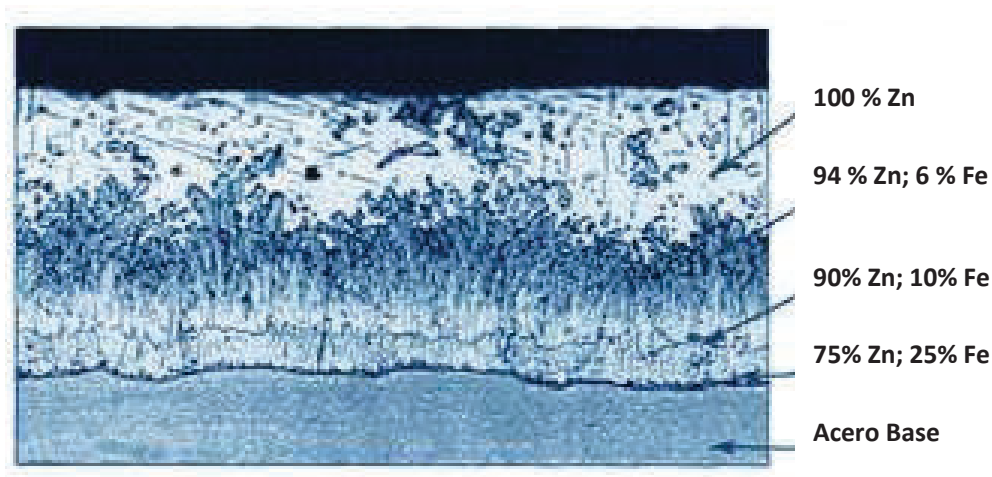
Considerando que los sistemas de encapsulado y el tipo de encapsulante utilizado son una función directa del ambiente en el que fueron producidos los desechos y los contaminantes presentes en los mismos; (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo territorial, 2007, p.107) el presente estudio tiene como primer objetivo comparar la eficacia de estabilización entre dos materiales previamente determinados, cemento y resina poliéster insaturada, a diferentes composiciones residuo: encapsulante, para escoger aquel que presente mayor factibilidad técnica y económica.

# 1 REVISION BIBLIOGRÁFICA

## 1.1. RESIDUOS DE GALVANIZADO Y SUS IMPLICACIONES AMBIENTALES

### 1.1.1 GENERALIDADES

El proceso de galvanizado es el recubrimiento de acero o hierro con una capa de zinc para protegerlo de la corrosión atmosférica. El zinc (Zn), metal menos noble que el hierro (Fe), actúa de ánodo; es decir, se oxida en lugar del acero (cátodo) formando una capa de óxido de zinc. Esta capa es impermeable, queda adherida fuertemente al acero y lo aísla del exterior evitando su deterioro. En la Figura 1.1 se observa la microestructura típica de una capa de zinc obtenida mediante galvanizado de acero (González, 2012, p. 38).



**Figura 1.1** Micro estructura típica de una capa de zinc obtenida mediante galvanizado de acero

(Galvanizers Association, 2012, p. 1)

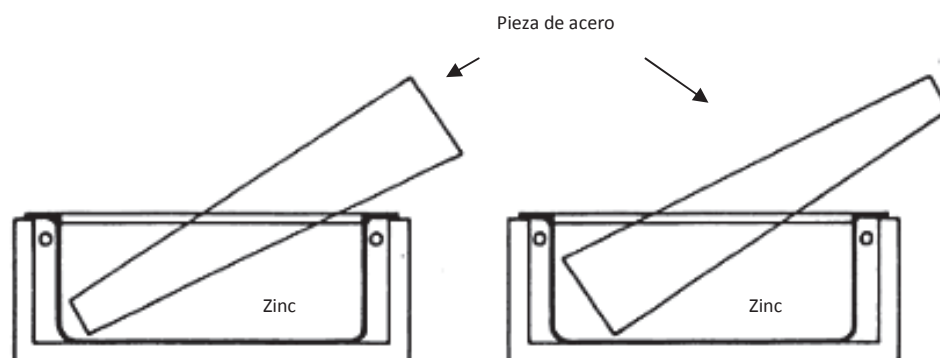
En la industria, se encuentran varios tipos de galvanizado cuya diferencia radica en la técnica utilizada para depositar la capa de zinc en el acero. Los métodos más empleados son la electrodeposición y la inmersión en caliente. Este proyecto se enfoca en la técnica de galvanizado por inmersión en caliente (Zaki, 2006, p. 405).

### 1.1.2 GALVANIZADO POR INMERSIÓN EN CALIENTE

En un proceso de galvanizado por inmersión en caliente, una pieza de acero es sumergida en un baño de zinc fundido a 450 °C aproximadamente, por un periodo de tiempo que puede oscilar entre los diez segundos y dos minutos, según el espesor de la capa de zinc que se requiera. Durante este tiempo, existe una reacción metalúrgica entre el acero y el zinc que forma una capa de aleaciones y compuestos intermetálicos que se adhieren a la superficie de acero. La capa de Fe-Zn sirve de protección galvánica frente a la corrosión del metal base (Batchelor, 2011, pp. 256-257).

Antes de la inmersión, la superficie del hierro o acero debe ser pretratada hasta obtener una superficie brillante, libre de óxidos y grasas, de tal manera que se garantice el proceso de galvanizado. Si la reacción ha sido adecuadamente controlada, la capa de zinc formada tendrá la misma composición que el baño de zinc fundido (American Galvanizers Association, 2013, p. 1).

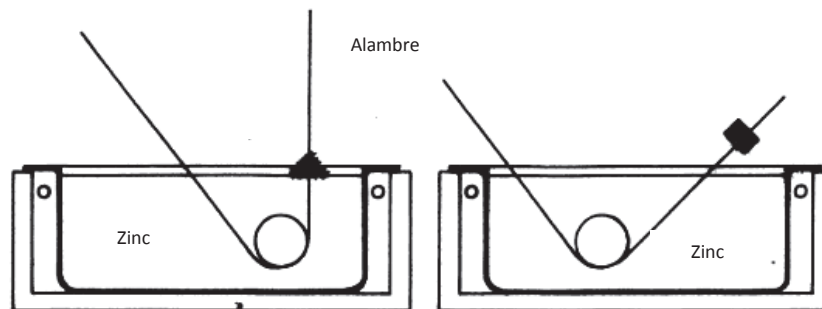
IHOBE (2011) distingue dos tipos de técnicas dentro del galvanizado por inmersión en caliente: continuas y discontinuas (batch). Las técnicas discontinuas involucran principalmente el galvanizado de piezas y de tubos, ya que cada elemento se sumerge en el baño de zinc de forma individual con múltiples inmersiones (según se requiera) como lo muestra la Figura 1.2 (p. 16).



**Figura 1. 2** Esquema de galvanizado discontinuo de piezas con doble inmersión  
(Vasquez y Damborenea, 2001, p. 287)



Por otro lado, las técnicas continuas engloban el galvanizado de alambre y el de láminas (chapas). Estos elementos se sumergen en el baño de zinc de manera continua con la ayuda de un cilindro giratorio adaptado en el mismo. Este dispositivo gira a una velocidad constante, establecida en función del tiempo de residencia necesario para obtener un espesor de la capa de zinc definido. La Figura 1.3 esquematiza el galvanizado en continuo de alambre (Junta de Andalucía, 2013, p. 4). El presente estudio se enfoca en la técnica continúa de galvanizado por inmersión en caliente de alambre.



**Figura 1. 3** Esquema de galvanizado continuo de alambre con cilindro giratorio inmerso en el baño de zinc.  
(Vasquez y Damborenea, 2001, p. 287)

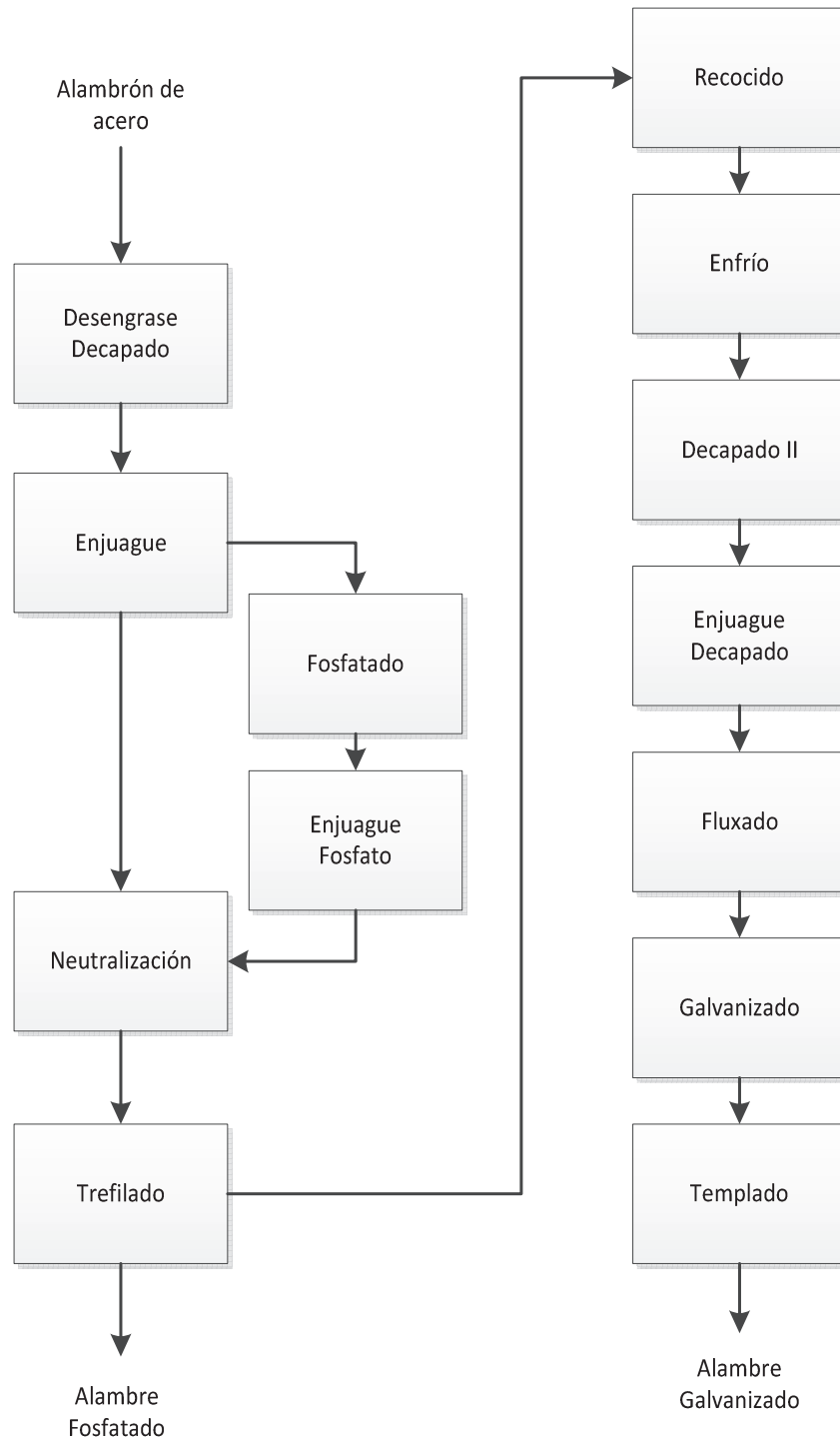
### 1.1.3 DESCRIPCIÓN DE PROCESOS IDENTIFICADOS EN EL GALVANIZADO POR INMERSIÓN EN CALIENTE DE ALAMBRE.

El diagrama de bloques representado en la Figura 1.4 especifica la secuencia de operaciones unitarias de manera general en un proceso de galvanizado por inmersión en caliente de alambre. En los siguientes literales, se explica brevemente cada uno de los procesos y su relación con el proyecto de titulación.

#### 1.1.3.1 Desengrase

El objetivo del desengrase es remover sustancias contaminantes adheridas al alambre con el fin de prepararlo para su posterior tratamiento. Esto incluye la

remoción de grasas naturales y sintéticas, aceites, ceras, óxidos, polvo, sales, algas, hongos, bacterias, etc. (Maaß y Peißker, 2001, p. 75).



**Figura 1.4** Diagrama de bloques del proceso de galvanizado en caliente

Los baños de desengrase son generalmente soluciones alcalinas (pH 11 a 14) que constan de sales inorgánicas y compuestos orgánicos que actúan como agentes tensoactivos para saponificar, emulsionar y dispersar los aceites y grasas adheridos al alambre. La efectividad del baño depende de la concentración de los agentes desengrasantes, la temperatura y el tiempo del proceso. Una vez concluido, se debe realizar un enjuague para remover la solución y evitar una posible contaminación en procesos posteriores (CONAMA, 2005, p. 1; Maaß y Peißker, 2001, p. 75).

### **1.1.3.2 Decapado**

El objetivo del decapado es eliminar el óxido de la superficie del alambre mediante disoluciones ácidas; sin embargo, el tratamiento debe ser controlado para que no se llegue a atacar la superficie del metal base. Se utiliza fundamentalmente dos tipos de ácidos de decapado: clorhídrico (HCl) o sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), según se trate acero de alto o bajo carbono, respectivamente. En algunos casos, se añade una mezcla de ácido nítrico y fluorhídrico (HNO<sub>3</sub>/HF) cuando se requiere mayor agresividad en el proceso (Crookes, 2007, p.5; Regel, 2010, p. 57).

El baño de decapado está conformado por un 14-16% en peso de ácido clorhídrico o sulfúrico que se mantiene entre 50 y 60 °C. Conforme se realiza el proceso, la actividad del baño va disminuyendo ya que aumenta su concentración en hierro. Una vez que el baño alcanza el límite de solubilidad de cloruro o sulfuro ferroso en el propio ácido, se considera al baño agotado siendo necesaria su renovación (Regel, 2010, pp. 57-58).

Los factores más importantes que influyen en el proceso son: la concentración de ácido, la temperatura del baño y la duración del tratamiento. Al igual que en el caso anterior, los residuos de ácido deben ser enjuagados del alambón utilizando agua (IHOBE, 2001, pp. 20-21).

Una vez que el alambre ha sido decapado, es necesario recubrirlo con una capa que neutraliza ácidos residuales. Además, protege al alambre limpio del óxido y sirve como lubricante para el proceso de trefilado. Para el efecto, se utiliza principalmente bórax y/o cal (Beunens, 2012, p. 46).

### 1.1.3.3 Fosfatado

El fosfatado es un tratamiento químico de superficie que se utiliza para proteger a los metales ferrosos de la corrosión atmosférica. Este proceso se caracteriza por la formación de una capa pasivadora-protectora que consta de una mezcla de óxido y fosfato de hierro. Como resultado, provee al metal base de una capa dura, eléctricamente no conductora, de buena adherencia y más absorbente que el metal base (Silveira, Cassel, Ferreira y Schermann, 2013, p. 1).

El tratamiento consiste en sumergir al alambre (metal) previamente tratado en un baño de fosfato. Este baño es una solución acuosa diluida cuyos principales componentes son: ácido fosfórico libre ( $H_3PO_4$ ), un fosfato metálico primario  $Me(H_2PO_4)$  y un acelerador. Todos los constituyentes están en el orden de gramos por litro (Narayaran, 2005, p. 132).

El metal comúnmente es zinc aunque también puede ser manganeso, níquel o calcio; mientras que, el acelerador es generalmente un compuesto inorgánico que consiste en una sal de los metales mencionados, además de sodio o aluminio (Sinha y Feser, 2002, p. 158).

El baño debe mantenerse a una temperatura que oscila entre los 40 y 100 °C; el pH de la solución es estable y oscila entre 1,8 y 3,2. A estas condiciones, el metal sumergido es atacado por los ácidos presentes (Sinha y Feser, 2002, p. 158).

El ácido ortofosfórico contiene 3 hidrógenos reemplazables dando como resultado tres series de sales. Para un metal divalente (Me) como el hierro y el zinc, las sales correspondientes son:  $Me(H_2PO_4)$ ,  $MeHPO_4$ ,  $Me_3(PO_4)$  para la sal primaria,

secundaria y terciaria respectivamente. La formación de un revestimiento cristalino de fosfato depende de la solubilidad de los fosfatos de Fe y Zn. En general, los fosfatos primarios de estos metales son solubles en agua, los fosfatos secundarios son inestables o insolubles y los terciarios son insolubles (Freeman, 1986, pp. 10-11).

El mecanismo de formación de la capa de fosfato es complejo y muchos autores no concuerdan en una teoría común; sin embargo, Narayanan (2005) afirma que todos los procesos que se basan en soluciones de metales pesados dependen del equilibrio que existe entre la sal de fosfato primaria soluble y la respectiva sal de fosfato terciaria insoluble. (p.142) La solución de fosfato del metal primario se disocia por efecto de la temperatura o un incremento de pH en las sales terciarias. Estas sales terciarias insolubles se depositan en la interfase metal-solución creando la capa protectora; sin embargo, parte de este fosfato insoluble se precipita como un lodo (Freeman, 1986, p. 11).

El fosfatado es un tratamiento superficial alternativo al galvanizado orientado a diferente aplicación del alambre. Sin embargo, requiere los mismos procesos de limpieza que la línea de galvanizado para el caso particular de este estudio.

#### **1.1.3.4 Trefilado**

El trefilado es considerado como un proceso de conformado en frío; es decir, consiste en el moldeo de una pieza metálica a una temperatura inferior a la temperatura de recristalización del metal respectivo. Bajo estas condiciones, el metal se comporta como un material elástico cuyo moldeo requiere mayores esfuerzos y energía que un proceso de conformado en caliente. El objetivo del trefilado es reducir el diámetro de un alambre mediante una herramienta que estira el mismo y lo fuerza a pasar por un orificio cónico de diámetro cada vez menor, este esfuerzo consigue aumentar la resistencia mecánica de la pieza (Luque, 2011, pp. 278-279; Vásquez y Damborenea, 2001, pp. 122-123).

### **1.1.3.5 Recocido de proceso**

Todo material que haya sido trabajado en frío por mecanismos de deformación elástica altera las propiedades mecánicas del metal. El recocido es un tratamiento térmico cuyo objetivo es eliminar tensiones en el material, mejorar su microestructura o destruir el efecto de un proceso anteriormente aplicado. El recocido se realiza como un tratamiento posterior a cualquier proceso mecánico de moldeo, trabajo en frío o endurecimiento (Molera, 2009, p. 56).

Para el efecto, uno de los métodos consiste en sumergir el metal en una piscina de plomo fundido que se encuentra entre 475 y 500 °C de temperatura seguido de un enfriamiento rápido con agua. A este tipo de operación se le conoce como recocido de proceso y es aquel que se utiliza para la fabricación de alambres y láminas de acero (Molera, 2009, p. 56).

### **1.1.3.6 Fluxado**

El flux es un reactivo que generalmente está compuesto de 60% de cloruro de zinc ( $ZnCl_2$ ), 40% de cloruro de amonio ( $NH_4Cl$ ) y aditivos varios; el proceso de fluxado consiste en sumergir el alambre en un baño cuya concentración oscila entre los 400 g/L de sales de flux que se mantiene entre 55 y 75 °C de temperatura (IHOBE, 2001, p. 22).

El fluxado es necesario para disolver y absorber cualquier resto de impurezas (óxidos leves) que se hayan vuelto a formar sobre la superficie del acero luego de su paso por los tratamientos mencionados en los puntos 1.1.3.4 y 1.1.3.5. La película de flux que se deposita protege la superficie de una nueva oxidación y asegura un recubrimiento uniforme de zinc en el galvanizado (Infante, 2013, p. 1).

La presencia de contaminantes en el baño de flux influye directamente en la calidad del galvanizado, las pérdidas de zinc y la generación de subproductos tales como cenizas y humos. El hierro en forma de sales solubles, arrastrado

desde el decapado a su lavado posterior es el contaminante más crítico. Su efecto forma escoria en la masa fundida de zinc creando espesores irregulares. Por este motivo, el hierro soluble debe mantenerse por debajo de un 0,5% y el pH de la solución no debe ser mayor a 5 (Infante, 2013, p. 1).

### **1.1.3.7 Galvanizado**

Una serie adecuada de pretratamientos superficiales permiten que el zinc fundido reaccione químicamente con la superficie de acero del alambre sumergido, produciendo capas de Fe-Zn de composición y espesor invariable en la interfase. Si la reacción es controlada adecuadamente, la parte externa de la superficie del alambre tendrá la misma composición que la del baño de zinc (Woods y Cole, 1996, p. 78).

Como se mencionó en la sección 1.1.2, la temperatura normal de galvanizado oscila entre 445-465 °C, siendo la velocidad de reacción muy rápida al comienzo, el espesor principal del recubrimiento se forma durante este periodo inicial. Posteriormente la reacción disminuye su velocidad y el espesor no aumenta en gran medida. El tiempo de inmersión varía según el espesor que se requiere; sin embargo, como norma general no excede los dos minutos (IHOBE, 2001, p. 24).

La velocidad de inmersión definida como la cantidad de alambre sumergido en función del tiempo, debe ser lo más rápida posible con objeto de obtener espesores uniformes; en procesos continuos, esta velocidad coincide con la de extracción del alambre. En el caso particular de este estudio, el alambre de acero es pasado a través de un baño de zinc fundido a velocidades equivalentes a 200 m/min. El acero recubierto es entonces enfriado, y el zinc se solidifica en la superficie del alambre (Woods y Cole, 1996 p. 80; IHOBE, 2001, p. 24; LATIZA, 2007, pp. 1-2).

El tiempo de inmersión del alambre en la piscina de zinc fundido es una función directa de la longitud de la piscina y de la velocidad del alambre. A las

velocidades de procesamiento usadas en las líneas de galvanizado continuo, el alambre sólo está en el baño de zinc entre 2 y 4 segundos. El tamaño del tanque depende del tipo, espesor y número de alambres a galvanizar, siendo su geometría tal que se reduzca al máximo la exposición del zinc a la atmósfera (Woods y Cole, 1996 p. 80; IHOBE, 2001, p. 24; LATIZA, 2007, pp. 1-2).

La temperatura de las paredes del baño no debe superar los 480-490 °C ya que se produciría un ataque del zinc líquido a las paredes de hierro del baño. Además, aunque la pureza del baño no es crítica, se debe tener cuidado con la presencia de zinc refundido. Si el contenido de hierro en el baño es muy alto, se tienen eficiencias menores en el proceso de recubrimiento, formándose matas de zinc que afectarán las paredes del baño (Woods y Cole, 1996 p. 80; IHOBE, 2001, p. 25).

#### **1.1.3.8 Templado**

Una vez realizado el proceso de galvanizado, la pieza puede dejarse enfriar a temperatura ambiente o por medio de un baño de agua. Este proceso es importante por dos razones principales: evitar que se manche la superficie con residuos de fluxado y evitar que las capas de aleación continúen creciendo sobre la superficie reactiva de acero una vez que este ha sido retirado del baño (IHOBE, 2001, p. 25).

#### **1.1.4 TIPOS DE RESIDUOS SÓLIDOS GENERADOS EN EL PROCESO DE GALVANIZADO EN CALIENTE**

Las plantas de galvanizado por inmersión en caliente producen una gran diversidad de material residual. Previo a su enumeración y posterior descripción, se desarrolla los siguientes términos utilizados como base para identificar los residuos.



- **Residuo**

Un residuo está definido como todo producto o material desechado en forma sólida, semisólida, líquida o gaseosa que resulta del consumo o uso de un bien en actividades domésticas o industriales. El generador de este residuo lo descarta, rechaza o entrega porque sus propiedades no permiten reusarlo en la actividad que lo generó o porque la legislación vigente así lo estipula. Algunos de estos residuos pueden ser aptos para ser reciclados (Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá y Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2010, p. 87; EPA, 2003, p.4).

- **Residuo peligroso**

Existen dos tipos principales de residuos sólidos, peligrosos y no peligrosos. Se define a un residuo peligroso como un desecho sólido o semisólido que debido a su cantidad, concentración o características físicas, químicas y/o infecciosas representa una amenaza potencial a la salud humana y al medio ambiente cuando no ha sido propiamente tratado, almacenado y/o transportado. Adicionalmente, puede causar o contribuir al desarrollo de una enfermedad irreversible y por ende al incremento en la mortalidad (EPA, 2005, p. 3).

La normativa nacional y local tiene regulaciones específicas en cuanto a la clasificación de un residuo como peligroso y la alternativa para su disposición final. En el caso del Distrito Metropolitano de Quito, la Ordenanza 404 (aprobada por la resolución administrativa N° 024-2013 de la Secretaría de Ambiente) es el documento oficial al cual se debe regir la industria local y por lo tanto, la referencia para el presente trabajo (Concejo de Distrito Metropolitano de Quito, 2014a, p. 1).

A continuación, se presentan los residuos que fueron identificados para las operaciones unitarias que se llevan a cabo en la industria de galvanizado por

inmersión en caliente. La Tabla 1.1 muestra las principales sustancias contenidas en los residuos de cada proceso identificado como contaminante, su respectiva clasificación según la Ordenanza 404 y la alternativa para su disposición final según la misma referencia.

**Tabla 1. 1** Sustancias identificadas en los residuos sólidos por operación unitaria en el galvanizado por inmersión en caliente

<b>PROCESO</b>	<b>RESIDUO</b>	<b>SUSTANCIAS CONTENIDAS</b>	<b>CLASIFICACIÓN SEGÚN ORDENANZA 404</b>	<b>DISPOSICIÓN FINAL SEGÚN ORDENANZA 404</b>
Desengrase	Baños de desengrase ácidos o alcalinos	Ácidos o álcalis Agentes tensoactivos Aceites/grasa, libres y emulsionadas	Peligroso	Tratamiento previa disposición por gestores autorizados
Decapado	Baños de decapado agotado	Cloruros y/o sulfuros de hierro y zinc Ácido clorhídrico y/o sulfúrico libre Inhibidores de decapado	Peligroso	Neutralización y tratamiento previa disposición por gestores autorizados
Fosfatado	Lodos de Fosfato	Fosfato de hierro, plomo y zinc	Función del contenido de metales pesados	Tratamiento requerido previa disposición si contenido de metales excede norma.
Enfrío	Torta de Filtro	Hidróxido de hierro y plomo	Función del contenido de metales pesados	Tratamiento requerido previa disposición si contenido de metales excede norma.
Galvanizado	Matas escorias y polvos de zinc	Zinc, hierro, óxido de zinc y aluminio	Peligroso	Reciclado por proveedores de zinc primario

\*(IHOBE, 2001, p. 5; Concejo de Distrito Metropolitano de Quito, 2014b, p. 7)

En caso de que se generen residuos adicionales que no se encuentren identificados en la Tabla 1.1, la Secretaria de Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito podrá clasificarlos como peligrosos y dependerá del generador demostrar que sus residuos no presentan ninguna característica de peligrosidad, para lo cual deberá efectuar la caracterización físico química de sus residuos o

desechos, en los términos establecidos por la Norma Técnica de Desechos Peligrosos o Especiales de la Ordenanza 404 (Concejo de Distrito Metropolitano de Quito, 2014a, p. 6).

#### **1.1.4.1 Lodos y concentrados provenientes de baños de desengrase y decapado**

El proceso de decapado y desengrase exige que los baños sean regenerados periódicamente para no perder su eficacia. La vida de estos baños, así como la cantidad de aguas residuales procedentes de los procesos, varían de empresa a empresa en función del rendimiento de los mismos y el grado de suciedad del alambre. La composición de los baños agotados depende de su característica alcalina o ácida y deben ser retirados para ser tratados por gestores autorizados (Frías y Pérez, 2001, p. 427; IHOBE, 2001, pp. 27-28).

La composición de los baños de desengrase agotados ácidos es: fosfórico diluido, emulsionantes, tensoactivos, agentes anticorrosivos, aceites y grasas. Análogamente, los baños de desengrase alcalinos tienen los mismos compuestos salvo que poseen hidróxido de sodio en lugar de ácido. Por otro lado, la composición de los baños de decapado es: ácido residual libre, cloruros de hierro y de zinc, componentes de la aleación de los aceros e inhibidores de decapado (IHOBE, 2001, pp. 27-28).

Los efluentes procedentes de los baños de desengrase y decapado son catalogados como residuo peligroso según la Norma Técnica de Desechos Peligrosos y Especiales de la Ordenanza 404 al tratarse de un residuo que contiene ácidos, grasas y un elevado contenido de metales pesados (Concejo del Distrito Metropolitano de Quito, 2014b, pp. 3-7).

No obstante, la regeneración de estos baños es un proceso ampliamente estudiado, existen métodos que permiten recuperar tanto el ácido como los metales contenidos en el mismo. En la Tabla 1.2 se enumeran las diferentes alternativas que se conocen actualmente para regeneración de baños de

decapado en función del ácido presente en el mismo. Estos procedimientos son realizados por gestores específicos destinados para el efecto (Regel, 2010, p.58).

**Tabla 1. 2** Clasificación de métodos de regeneración de baños de decapado en función del ácido presente en el mismo

Métodos de regeneración	Metales	Intercambio de iones		
		Tecnología de emulsión pertracción	Cristalización	
		Extracción con solventes		
	Ácido	Diálisis de difusión, Electrodiálisis, Diálisis de membrana		
		Diálisis de membrana	Evaporación	
		Precipitación, Atomización por spray en caliente		
		HCl	HNO <sub>3</sub> /HF	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>

\*(Regel, 2010, p.58)

En el Ecuador existen diversos gestores autorizados para el manejo de sustancias químicas y/o desechos peligrosos. Para el caso particular de los lodos y concentrados provenientes de baños de desengrase y decapado, la Compañía Rimesa Recicladora Internacional de Metales S.A. gestiona la recolección, transporte y almacenamiento de ácidos en desuso y materiales metálicos y no metálicos contaminados con residuos peligrosos (Ministerio del Ambiente, 2012, p. 2).

#### 1.1.4.2 Lodos y concentrados provenientes de baño de fosfatado

En el proceso de fosfatado, como se explicó en la sección 1.1.2.3, se forman sales terciarias insolubles que se depositan en la interfase metal solución creando la capa protectora; sin embargo, una parte de este fosfato insoluble precipita formando un lodo semilíquido el cual debe ser removido del baño periódicamente para que el mismo no pierda su eficacia (Freeman, 1986, p.11).

Ucaroglu y Talinli (2012) afirman que estos lodos superan los límites de toxicidad ya que poseen como principales constituyentes fosfato de metales pesados

(hierro, zinc, níquel) y trazas de elementos menores como sodio, potasio, azufre, plomo, cromo y cobre; por lo que no sería posible su depósito en un vertedero de inertes. En su estudio, estos autores analizaron la toxicidad de un lodo proveniente del proceso de fosfatado y determinaron que la concentración total de contaminantes en el residuo es equivalente a 2 281,18 mg/kg de níquel y 135,32 mg/kg de zinc (p. 134). Sin embargo, las cantidades totales producidas de estos lodos suelen ser pequeñas (1:10) comparadas con la cantidad de lodos generados por el tratamiento de agua residual en una planta de galvanizado (Freeman, 1986, p.11). Por ejemplo, para la planta anfitriona del presente proyecto ubicada en el Distrito Metropolitano de Quito, se estima que la cantidad de lodos generados por el tratamiento de aguas asciende a 30 000 kg/mes mientras que el lodo proveniente del proceso de fosfatado oscila entre 1800 y 2000 kg/mes.

Los lodos producto de fosfato son el principal objeto de estudio en el presente proyecto.

#### **1.1.4.3 Lodos y concentrados provenientes de tratamiento de agua de los procesos de enfriamiento**

En el proceso de enfriamiento existe una transferencia de hierro y plomo desde el alambre inmerso hacia el agua circundante debido a la naturaleza del acero y al arrastre de plomo característico del proceso (explicado con detalle en la sección 1.1.3.5). Esta agua residual es sometida a un tratamiento que, para el caso particular de este estudio, involucra las siguientes operaciones unitarias: neutralización y sedimentación.

El proceso es continuo e independiente, el agua contaminada se transporta a un clarificador, antes del cual se añade floculante en línea para asegurar la separación de los residuos sólidos suspendidos en el agua. Así también se añade cal al agua que reposa en el clarificador para neutralizarla. Los lodos producto de la sedimentación de sólidos en el agua se extraen por la parte inferior del

clarificador y son filtrados en un filtro prensa en cuyas tortas permanecen los metales presentes en el agua como hidróxidos de hierro y plomo (IHOBE, 2001, p. 28).

El plomo es considerado como metal pesado cuyos niveles pueden superar los límites de toxicidad establecidos en la Norma Técnica de Desechos Peligrosos y Especiales de la Ordenanza 404. En consecuencia, no pueden ser desechados directamente (Concejo del Distrito Metropolitano de Quito, 2014b, p. 7).

Los lodos producto del proceso de enfriamiento también son objeto de estudio en el presente proyecto.

#### **1.1.4.4 Matas, escorias y cenizas de zinc**

Las matas, escorias y cenizas de zinc se generan durante la etapa de formación del recubrimiento. Las matas son compuestos intermetálicos de zinc y hierro de alta densidad, por lo que se sedimentan en el fondo de la piscina de zinc. Las escorias, por su parte, se forman en la interfase entre la superficie del baño y la atmósfera de la cuba, debido a las reacciones que ocurren entre el oxígeno, los componentes del baño y los aditivos fundentes. Finalmente, los polvos se generan en los procesos de secado, escurrido y regulación de espesores de zinc (Delvasto, Casal, González, Durán, Domínguez y Moncada, 2012, pp. 33-34).

La cantidad generada de esta clase de residuos depende de cómo se lleve a cabo el proceso de galvanizado en cada planta; sin embargo, Delvasto et al (2012) estima que una producción de 11 500 t de productos de acero galvanizado implican un consumo de 750 t de zinc anuales, de las cuales, solo el 54% se deposita como recubrimiento. El 46% restante se reparte entre las matas, las escorias y los polvos (p. 34).

En conclusión, estos residuos sólidos del proceso de galvanizado poseen una fracción metálica aprovechable que generalmente es reciclada por los

proveedores de zinc primario. En la planta de galvanizado en estudio, las cenizas de zinc son almacenadas y entregadas a gestores autorizados para su posterior aprovechamiento.

## **1.2 ENCAPSULADO DE RESIDUOS SÓLIDOS**

El encapsulado es un proceso en el cual un residuo es incorporado dentro de un material que lo aísla del ambiente, con una fijación química parcial del residuo al material utilizado. El grado de fijación química es función de la naturaleza de los materiales. Esta técnica, clasificada como un mecanismo de estabilización-solidificación, tiene como objetivo principal minimizar la velocidad de migración de los contaminantes a las capas freáticas del suelo y reducir la toxicidad de mismo (Czurda, 2006, p. 218; Borges, Milestone, Costa, Cyril, Panzera, y Christophoro, 2011, p. 670).

Los términos estabilización y solidificación se utilizan indistintamente; sin embargo, describen efectos diferentes que los encapsulantes crean para inmovilizar los constituyentes peligrosos. La solidificación se refiere a un cambio en las propiedades físicas del material contaminado. Estas modificaciones incluyen un incremento en la resistencia a la compresión y una reducción en la permeabilidad. La estabilización se refiere a un cambio químico de los contaminantes en el material; lo cual incluye la conversión de los constituyentes a una forma menos soluble, móvil y/o tóxica (Wilk, 2008. p. 3, Bayar y Talinli, 2012, pp. 157-158).

Los mecanismos de solidificación estabilización, S/S por sus siglas en inglés, han sido ampliamente utilizados para la gestión y disposición final de medios contaminados desde 1970; particularmente para aquellos que contienen sustancias clasificadas como peligrosas por la EPA (Environmental Protection Agency de los Estados Unidos). La combinación del desecho con el aditivo o reactivo, denominado encapsulante, forma una masa solidificada que permite inmovilizar los constituyentes peligrosos (Wilk, 2008, pp. 1,3).

Los efectos positivos que tienen los mecanismos de S/S en un residuo peligroso son:

- Reducción de la velocidad de migración de los contaminantes
  - Mejora en el manejo y las características físicas del residuo al incrementar su resistencia y proporcionarle una forma definida
  - Disminución de la superficie a través de la cual pueda tener lugar la transferencia de contaminantes
  - Limitación en la solubilidad de cualquier contaminante en el residuo
  - Aumento de la resistencia mecánica disminuyendo su permeabilidad y
  - Reducción en el costo de disposición final (Wilk, 2008. p.3; La Grega, Buckingham, Evans, 1996, p. 744, Bayar y Talinli, 2012, p. 157).
- 
- **Lixiviación de contaminantes en los residuos sólidos**

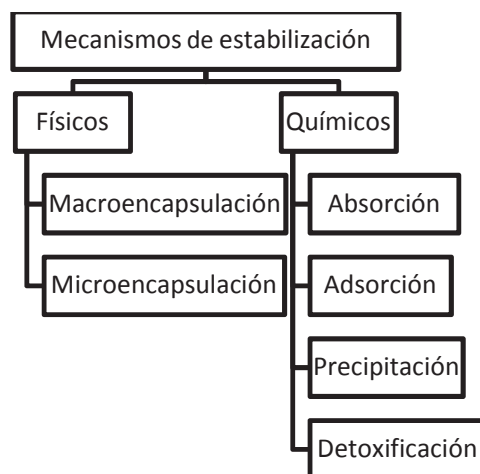
Uno de los impactos ambientales más significativos en los residuos sólidos es su potencial de transferencia de contaminantes a un medio líquido; este fenómeno se conoce como lixiviación. La EPA (2002) define al proceso de lixiviación (desde el punto de vista ambiental) como la disolución de metales, sólidos y/o químicos en agua potable o subterránea. (p. 1) En los rellenos sanitarios o destinos de confinamiento, los materiales estabilizados generalmente están en contacto directo con el suelo, expuestos a agua lluvia o aguas superficiales, estos fluidos se denominan lixiviantes. Al circular el lixiviente por los residuos confinados, los contaminantes se transfieren al mismo desde la masa estabilizada, entonces se conocen como lixiviados (Gomes y Pinto, 2006, pp. 409-410).

### **1.2.1 MECANISMOS DE ESTABILIZACIÓN**

Los contaminantes pueden ser retenidos por principios físicos o químicos en la matriz encapsulante; en función de esto, existen seis mecanismos de



estabilización que se enumeran en la Figura 1.5. Para el caso particular de este estudio, se hará énfasis en la descripción de los mecanismos que se utilizarán en función de los encapsulantes seleccionados.



**Figura 1.5** Mecanismos de estabilización de contaminantes en una matriz de encapsulante

### 1.2.1.1 Macroencapsulación

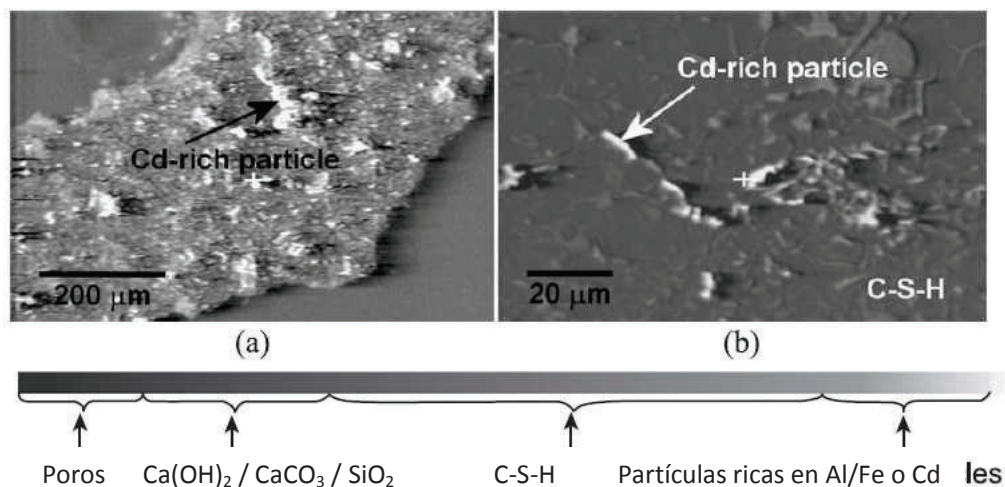
La macroencapsulación es el mecanismo por el cual los contaminantes presentes en el residuo tóxico quedan atrapados físicamente en una matriz de mayor tamaño; es decir, quedan retenidos en un bloque solidificado. En caso de degradación del mismo por motivos ambientales: humectación, desecación, congelación, penetración de fluidos de percolación o tensiones físicas, los contaminantes estabilizados pueden aparecer en el medio ambiente. Esto es consecuencia de una unión física a la matriz (Chattopadhyay y Condit, 2002, pp. 2-3).

### 1.2.1.2 Microencapsulación

La microencapsulación consiste en atrapar los constituyentes del residuo peligroso a nivel microscópico en la estructura cristalina de la matriz solidificada; es decir, el contaminante se retiene por mecanismos físicos en los poros del

encapsulante. Luego de un tiempo de curado establecido en función del tipo de residuo y encapsulante, se forma una matriz sólida donde los contaminantes quedan atrapados reduciendo la lixiviabilidad de la muestra estabilizada. En la Figura 1.6 se evidencia la microencapsulación de cadmio (Cd) en una matriz de cemento observado mediante un microscopio electrónico de barrido; cómo se evidencia, este proceso involucra formar una mezcla homogénea constituida por el residuo con el encapsulante antes de que ocurra la solidificación (Chattopadhyay y Condit, 2002, pp. 2- 3; Halim, Amala, Beydouna, Scotta y Low 2004, p. 1097).

Como resultado, incluso si el material estabilizado se degrada, la mayor parte del contaminante queda atrapado Sin embargo, tampoco involucra una fijación química, si se disminuye el tamaño de partícula del material estabilizado a tamaños muy pequeños, se aumenta la velocidad de migración de los contaminantes (Chattopadhyay y Condit, 2002, pp. 2- 3).



**Figura 1. 6** Microencapsulación de Cd en matriz de cemento en (a) baja y (b) alta magnificación. Imágenes tomadas mediante microscopio electrónico de barrido (Halim, Amala, Beydouna, Scotta y Low, 2004, p. 1097)

### 1.2.1.3 Adsorción de contaminantes en la matriz

La adsorción es el proceso por el cual los contaminantes quedan ligados electroquímicamente a la matriz del encapsulante; la naturaleza de la unión se

debe a las fuerzas de Van der Waals y a los puentes de hidrógeno creados entre el agente contaminante y el reactivo encapsulante.

Bajo este mecanismo, los constituyentes tóxicos tienen menor probabilidad de quedar libres en el medio ambiente ya que se necesita una fuerza físico química adicional para desorber el material de la matriz; al contrario de la macro y la micro encapsulación, donde la simple rotura de una partícula incrementa considerablemente la velocidad de migración de los contaminantes (La Grega, Buckingham, Evans, 1996, pp. 751-752).

#### **1.2.1.4 Precipitación de contaminantes por reacción con la matriz**

La precipitación se entiende como la transformación de los contaminantes en compuestos más estables dentro del residuo, que son el producto de alguna reacción química entre los mismos contaminantes y algún componente del material encapsulante. Los precipitados en general son hidróxidos, sulfuros, silicatos, carbonatos y fosfatos, quedando así contenidos en la matriz estabilizada como parte de la estructura del material. Este proceso se aplica de manera general para la estabilización de residuos inorgánicos como los lodos metales pesados (Hale, Evans y Lambert, 2011, p. 124).

### **1.2.2 EFICACIA DE LOS PROCESOS DE ESTABILIZACIÓN**

Para la evaluación de la eficacia de la estabilización se necesita valorar las propiedades físicas, técnicas y químicas del material estabilizado; sin embargo, este proceso resulta difícil por dos razones:

- Las propiedades medidas son fuertemente dependientes de la técnica de medición; ensayo para una misma propiedad dan distintos valores.
- Todo ensayo intenta simular las tensiones ambientales a largo plazo a las que se verán sometidos los materiales estabilizados; estas condiciones son

muy difíciles de predecir y dependen del lugar geográfico donde se confinarán los residuos sólidos (La Grega, Buckingham y Evans, 1996, p. 767; EPA, 1996, pp. 771-772).

La elección de los ensayos apropiados y la interpretación de los resultados dependen de los objetivos del programa de estabilización; de manera general, los residuos tratados se someten a dos tipos de ensayos, físicos y químicos. Los primeros sirven para determinar las propiedades físicas del residuo entre las que constan: el tamaño de partícula, su distribución, porosidad, permeabilidad y humedad. Además, pretenden predecir la reacción del material a las fuerzas ejercidas sobre el mismo en un depósito de confinamiento y evaluar su durabilidad en ciclos de variación de humedad. Los ensayos químicos tienen como principal objetivo determinar la estabilidad química del residuo estabilizado cuando se lo pone en contacto con soluciones acuosas en los rellenos sanitarios. Este proceso demuestra la inmovilización de los contaminantes y se conoce como ensayos de extracción y lixiviación (Lieu y Lipták, 2000, p. 50).

#### **1.2.2.1 Ensayos de extracción y lixiviación**

En la mayoría de los casos, la principal razón para elegir la estabilización y solidificación como técnica de gestión de residuos peligrosos es la reducción de la velocidad a la que puedan migrar los contaminantes al medio. Por lo tanto, la determinación de la composición química del lixiviado de un material encapsulado tiene gran relevancia medio ambiental. A nivel laboratorio, existen algunos ensayos de extracción lixiviación entre los que se puede enumerar (La Grega, Buckingham y Evans, 1996, pp. 772-773).

- Ensayo con filtro
- Ensayo de liberación de líquidos
- Ensayo de toxicidad procedimiento de extracción (EPTox)
- Características de toxicidad, procedimiento de lixiviación (TCLP)
- Procedimiento de lixiviación uniforme modificado (ANS 16.1)

- Ensayo de concentración máxima posible
- Ensayo de lixiviación de equilibrio
- Ensayo de lixiviación dinámica
- Ensayo secuencial (Extracción química secuencial)
- Procedimiento de extracción múltiple

En un ensayo de lixiviación hay que considerar que existe un sin número de variables que afectan a la concentración del contaminante en el lixiviado. Van der Sloot, de Groot y Wijkstra (1989) afirman que los principales factores que afectan la lixivabilidad de un residuo son la alcalinidad del material estabilizado, la relación superficie volumen del residuo, la porosidad y la longitud del camino para la difusión. (pp. 147) Adicionalmente, La Grega, Buckingham y Evans (1996) añaden variables propias del ensayo entre las que se pueden mencionar: relación lixivante-residuo, tipo de lixivante, pH lixivante, tiempo de contacto, tiempo de agitación, recipiente de extracción y temperatura (p. 774).

#### **1.2.2.2 Ensayo de toxicidad TCLP (*Toxicity characteristics leaching procedure*)**

El TCLP, método 1311, fue publicado en el registro oficial de la EPA de Estados Unidos el 14 de enero de 1986 como parte del esfuerzo que realizaba esta organización para expandir la definición de toxicidad en desechos sólidos. Este ensayo normalizado se adoptó en sustitución del ensayo de toxicidad EPTox para determinar la movilidad de 53 analitos orgánicos e inorgánicos presentes en residuos sólidos, líquidos y multifásicos. Mediante este ensayo, se puede determinar la eficacia de la estabilización y conocer si un residuo cumple con los estándares de tratamiento tecnológico para ser destinado a un terreno de confinamiento (Burton, Show, Williams, Taylor y Marsden, 1998, p. 14; EPA, 1992, p. 1).

El TCLP ha recibido críticas en relación con su utilización para determinar la eficacia de la estabilización por dos razones principalmente. Primero, el ensayo involucra una trituración de la masa solidificada que reduce los efectos

beneficiosos de la macro y la micro encapsulación. Segundo, el lixiviante utilizado en el ensayo (solución de ácido acético) posee un pH muy bajo (2,88) que no es representativo de las condiciones de campo reales (Wilk, 2008, p. 5; EPA, 1992, p. 5).

A pesar de esto, el TCLP resulta útil para comparar la eficacia de un tratamiento con otro y es el ensayo estándar que se utilizará en el presente proyecto como requerimiento de la legislación vigente en el Distrito Metropolitano de Quito (Concejo del Distrito Metropolitano de Quito, 2014b, p.7).

### **1.2.2.3 Ensayos Físicos**

Para evaluar la integridad física y propiedades técnicas (resistencia, compresión y permeabilidad) de los materiales estabilizados se han adaptado ensayos de la ingeniería civil.

### **1.2.2.4 Ensayo de resistencia a la compresión libre**

Este tipo de ensayos tiene aplicación directa para evaluar la resistencia a la compresión de materiales cohesivos. Todo material estabilizado debe presentar una resistencia adecuada que les permita soportar las cargas de los materiales que se colocan sobre ellos. Además, los resultados de estos ensayos son especialmente importantes para la estabilización de residuos inorgánicos ya que es una medida del grado de fijación de los compuestos en la matriz hidratante. En general, para cualquier material de estabilización, cuanto más fuerte sea el residuo peligroso estabilizado, más eficaz resulta el proceso. Un valor de resistencia a la compresión libre aceptable para materiales estabilizados es 3 MPa (La Grega, Buckingham y Evans, 1996, p. 788-789).

Para el caso particular de este estudio se trabajará con la norma INEN 1485: *Adoquines. Determinación de la resistencia a la compresión*, la cual establece el

método de ensayo estándar en el Ecuador para determinar la resistencia a la compresión en adoquines (INEN 1485, 1987a, p.1).

### 1.2.3 TIPOS DE ENCAPSULANTES

El tipo de encapsulante utilizado es una función directa del ambiente en el que fueron producidos los desechos y los contaminantes presentes en los mismos. La aplicación de uno de estos materiales o su combinación, depende de distintos factores, como la concentración de contaminantes, la cantidad de reactivo y el efecto sinérgico de varios contaminantes. La única restricción de la técnica es su aplicación a residuos sólidos y lodos inorgánicos con menos del 20% de materia orgánica (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo territorial, 2007, p. 107).

En la Tabla 1.3 se especifica los encapsulantes más utilizados y la eficacia de su aplicación para la estabilización de residuos sólidos que contienen metales pesados.

**Tabla 1.3** Aplicación de materiales para la estabilización de residuos con metales pesados

<b>Componente del residuo</b>	<b>Cemento</b>	<b>Puzolanas</b>	<b>Termoplástico</b>	<b>Polímero Orgánico Termoestable</b>
Metales pesados como: plomo, cromo, cadmio, arsénico y mercurio.	Compatible. Puede aumentar el tiempo de fraguado.	Compatible. Eficacia demostrada sobre determinados elementos (plomo, cadmio, cromo)	Compatible. Eficacia demostrada sobre determinados elementos (plomo, cadmio, cromo)	Compatible. Eficacia demostrada con arsénico

\* (La Grega, Buckingham y Evans, 1996, p. 755)

En el presente proyecto se trabajará con dos tipos de encapsulantes principalmente: cemento y resina orgánica termoestable debido a su disponibilidad en el mercado ecuatoriano y su posibilidad de valorización del residuo como materiales de construcción.

### 1.2.3.1 Cemento

El cemento es un material genérico utilizado principalmente en la construcción y el principal agente de estabilización empleado en la industria gracias a su disponibilidad y bajo costo. Las propiedades del cemento como encapsulante (su consistencia dura, baja permeabilidad y relativa durabilidad) lo convierten en un estabilizante reconocido y ampliamente utilizado en el mundo en los últimos 50 años; de todos los tipos disponibles en el mercado, se prefiere el cemento Portland cuya composición típica se detalla en la Tabla 1.4 (Wilk, 2008, p.3; Chen, Tyrer, Hills, Yang, Carey, 2008, p. 391).

**Tabla 1. 4** Composición química del cemento Portland en porcentaje en peso

COMPUESTO	COMPOSICIÓN QUÍMICA (%w)
Óxido de calcio (CaO)	61-67
Óxido de silicio (SiO <sub>2</sub> )	17-24
Óxido de aluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3-8
Óxido ferrico (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1-6
Óxido de Magnesio (MgO)	0,1-4
Óxido de sodio o potasio (Na <sub>2</sub> ó K <sub>2</sub> O)	0,5-1,5
Óxido de azufre (SO <sub>3</sub> )	1-3

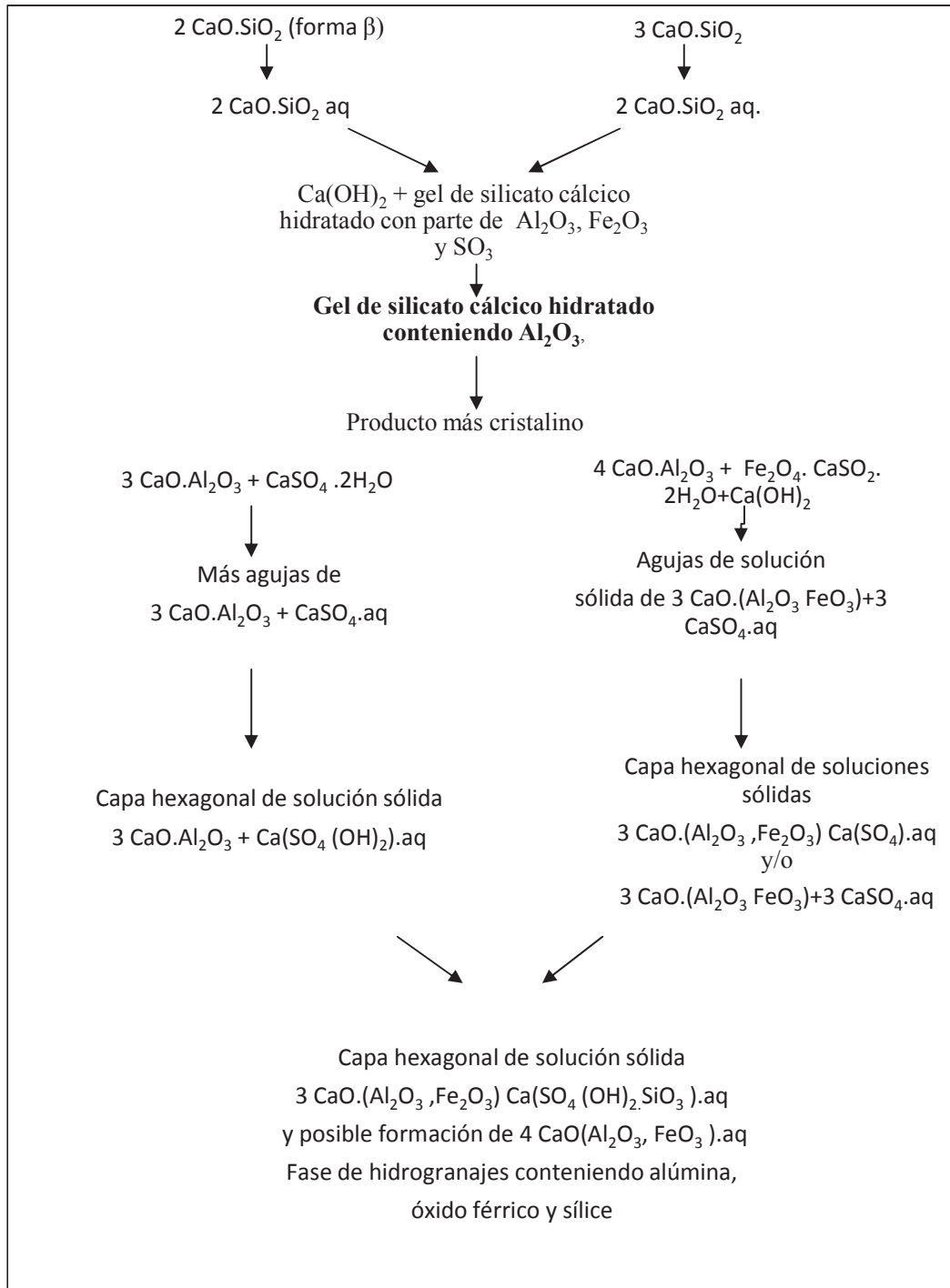
\*(Yilmaz, Çorça y Ünlü, 2003, p.201)

El cemento Portland se obtiene por la cocción en horno a alta temperatura de una mezcla de caliza y arcilla. La escoria producto del horno, denominada clínquer, se muele para obtener la mezcla de óxidos descrita previamente en la Tabla 1.4. Cuando se agrega agua al cemento, la mezcla se vuelve alcalina y se libera calor; este proceso de hidratación genera una estructura cristalina de aluminosilicato-cálcico dando lugar, como resultado final, una masa dura de aspecto rocoso (Yilmaz, Çorça y Ünlü, 2003, pp. 201-202).

Chen et al. afirman que el proceso global de hidratación del cemento incluye una combinación de procesos en solución, fenómenos interfaciales y reacciones en estado sólido. (p. 391) El mecanismo real del proceso ha sido discutido por varios autores sin llegar a un consenso; sin embargo, de una manera simple, el proceso



de hidratación del cemento se puede expresar mediante las reacciones que se esquematizan en la Figura 1.7



**Figura 1. 7** Reacciones del cemento Portland  
(La Grega, Buckingham y Evans, 1996, p. 757)

Entre las etapas del proceso de hidratación del cemento, se tiene un compuesto intermedio de gel silicato cálcico (C-S-H), el cual tiene implicaciones importantes en los mecanismos de fijación de metales pesados y es el responsable principal de la consistencia del material. Su pH está alrededor de 12,5 (Chen, Tyrer, Hills, Yang, Carey, 2008, p. 393, Wilk, 2008, p.5).

Este compuesto de gel silicato cálcico es una mezcla de partículas de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y silicatos pobremente cristalizados y con diferentes morfologías, su naturaleza microporosa incrementa el área superficial y controla los procesos de adsorción. Esta estructura no se encuentra en equilibrio, es termodinámicamente inestable a temperatura ambiente y comprende varias fases de composición diferentes (Chen, Tyrer, Hills, Yang, Carey, 2008, p. 394-395).

- **Estabilización con cemento**

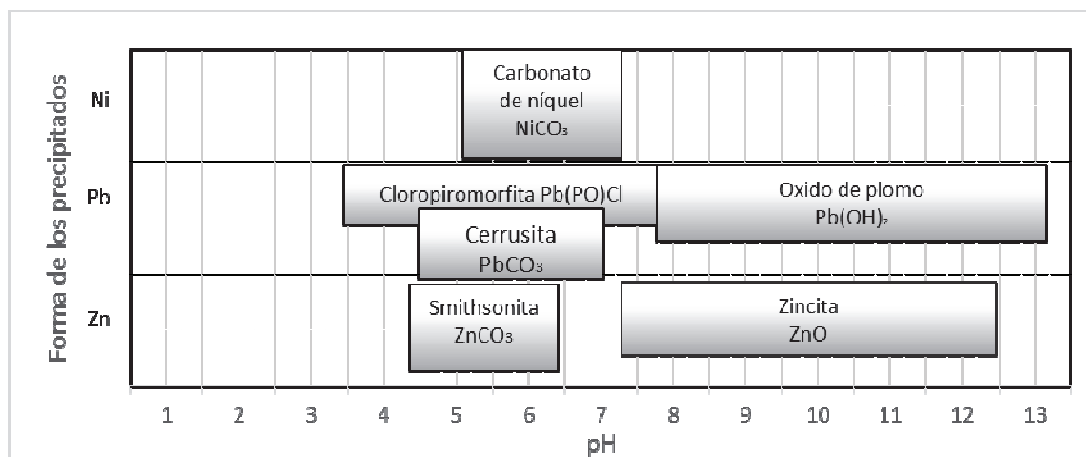
El cemento es muy versátil como agente de estabilización ya que permite unir químicamente líquidos libres, reduce la permeabilidad del material solidificado, permite encapsular partículas de constituyentes peligrosos reduciendo su solubilidad y facilita la reducción de la toxicidad (Wilk, 2008, p. 3-4).

Estos efectos son consecuencia de cambios físicos en el material contaminado y cambios químicos en los constituyentes peligrosos. Por esta razón, la estabilización con cemento se adapta mejor a residuos inorgánicos, especialmente aquellos que contienen metales pesados. El pH básico del cemento permite retener a los metales como hidróxidos insolubles o carbonatos de estructura endurecida modificándolos químicamente (Wilk, 2008, pp. 3-4, Hale, Evans y Lambert, 2011, p. 125).

Los iones  $\text{Ca}^{++}$  que se encuentran en el gel silicato cálcico son los responsables directos de la adsorción de los metales pesados en los procesos de estabilización y solidificación con cemento. Se han formulado varias teorías que explicarían el

mecanismo de adsorción de los metales en el gel, siendo la más aceptada la teoría de la triple capa electrostática; según la cual, los iones  $\text{Ca}^{++}$  que intervienen en la hidratación inicial formarían una bicapa con la superficie del compuesto cargado negativamente. Como consecuencia, los cationes de metales pesados se orientarían a esta bicapa formando una tricapa. Así también, en la estructura cristalina presente como minoría en el gel silicato cálcico, los cationes  $\text{Ca}^{++}$  pueden ser reemplazados por metales pesados. Entre los contaminantes que se unen a la matriz por fijación química formando compuestos insolubles con el cobre, zinc, níquel, cadmio y plomo (Chen, Tyrer, Hills, Yang, Carey, 2008, p. 394-395).

Hale, Evans y Lambert (2011) realizaron una identificación de la forma final de estos precipitados en función del metal presente y el pH cuando se somete un desecho con metales pesados a un tratamiento de encapsulación con cemento. Los resultados se evidencian en la Figura 1.8 (p. 124).

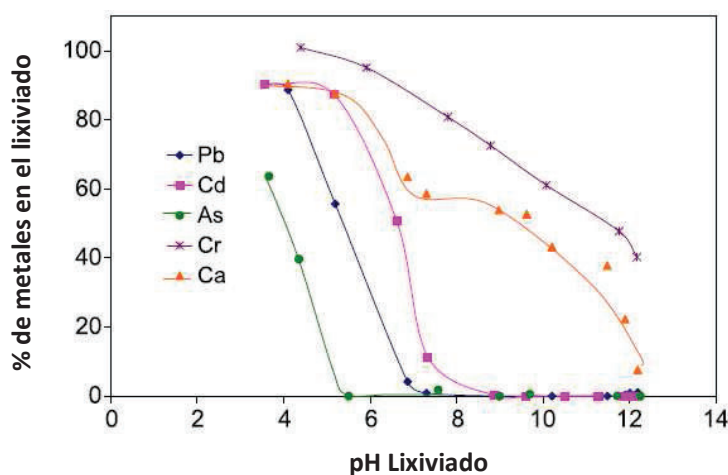


**Figura 1. 8** Precipitados de metales formados en función de pH en encapsulado con cemento  
(Hale, Evans y Lambert, 2011, p. 124)

Estudios realizados acerca de encapsulado de cemento han demostrado que el pH inicial y final de la solución lixiviante es un factor trascendental en el grado de liberación de los metales de la matriz. A valores altos de pH (mayores a 4,5), muchos metales pesados alcanzan su mínima solubilidad y precipitan en sus

respectivos hidróxidos, carbonatos, fosfatos, etc (Yilmaz, Çorça y Ünlü, 2003, pp. 205-206).

Halim, Amala, Beydouna, Scotta y Low, (2004) realizaron un estudio de la concentración en el lixiviado de diversos metales y demuestran que a valores altos de pH (> 8), la concentración de los mismos pueden llegar a reducirse hasta un 98%; cómo se evidencia en la Figura 1.9 (Hale, Evans y Lambert, 2011, p.125; Halim, Amala, Beydouna, Scotta y Low, 2004, p. 1100).



**Figura 1. 9** Porcentaje de iones metálicos en el lixiviado como una función del pH. El cálculo del porcentaje de iones metálicos lixiviados está basado en el total de metal contenido en el residuo.

(Halim, Amala, Beydouna, Scotta y Low, 2004, p. 1100)

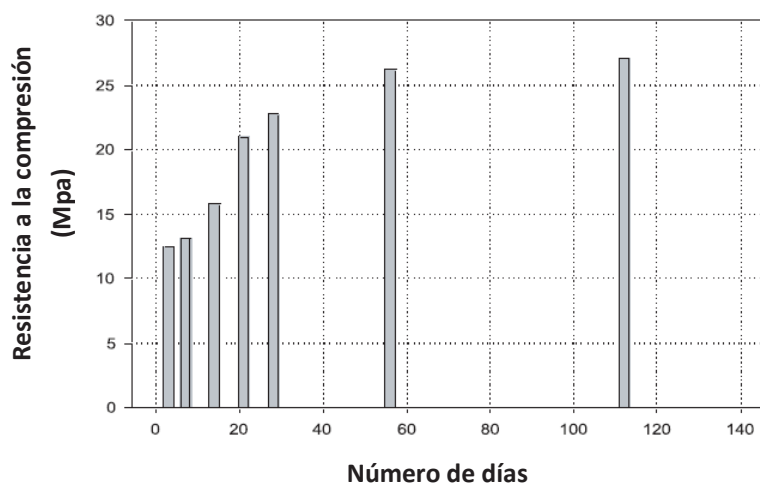
Así también, la proporción residuo/cemento es una variable a considerar en la eficacia de la estabilización. Malviya y Chaudhary (2006) afirman que el porcentaje de reducción es una función directa de la proporción residuo/cemento; a mayor proporción, se incrementa la concentración de los metales en el lixiviado (p. 80).

Esta variable, está directamente relacionada con el pH final del lixiviante ya que, mientras mayor cantidad de cemento se tiene en el residuo estabilizado, el pH del lixiviante final resultará más alcalino (Yilmaz, Çorça y Ünlü, 2003, pp. 206).

La gran versatilidad de la estabilización con cemento es una de sus ventajas principales; sin embargo, Félix, Fraaiji y Hendriks (2001) afirman que es necesaria una deshidratación del desecho antes de someterlo a un tratamiento de estabilización con cemento, si es que el residuo contiene más de 50% de su peso en agua (p. 121).

Una vez concluido el proceso, la resistencia a la compresión del material encapsulado generalmente oscila entre los 5 y 30 MPa, valores inferiores a las resistencias del concreto que pueden presentar una resistencia de hasta 50 MPa. Esto se explica al considerar que el material encapsulado puede ser sensible a la humedad y a la fluctuación de temperatura en menor o mayor medida en función del tipo de desecho. Como resultado se producen resquebrajamiento en el material final. (Félix, Fraaiji y Hendriks, 2001, p. 119).

La Figura 1.10 muestra la variación en la resistencia a la compresión que se reportó en el estudio de Gupta y Surwade (2007) para una muestra estabilizada de composición 20 % desecho sólido contaminado y 80 % cemento (p.775). Como se observa, la resistencia a la compresión aumenta en función del tiempo para llegar a un máximo de 27 MPa a los 112 días de curado.



**Figura 1. 10** Resistencia a la compresión para muestra encapsulada 20 % desecho sólido contaminado 80 % cemento (Gupta y Surwade, 2007, p. 775)

Malviya y Chaudhary (2006) llevaron a cabo estudios de estabilización con cemento y encontraron que mientras mayor sea el contenido de residuo en el cemento; es decir mientras mayor sea la proporción residuo/cemento; se necesita mayor cantidad de agua para mantener la consistencia de la mezcla. Paralelamente mientras se incrementa la relación agua/sólidos se reduce la resistencia de la muestra estabilizada (p.79).

Los residuos estabilizados con cemento están sujetos a diversos mecanismos de degradación (erosión, humedad, temperaturas bajas, etc.) que afectarían de igual manera a una estructura de concreto tradicional. Una consistencia dura le otorga resistencia contra la erosión al material solidificado, mientras que la proporción adecuada de agua/cemento le brinda resistencia contra el resquebrajamiento. Estas propiedades dificultan la lixiviación de contaminantes al medio (Félix, Fraaiji y Hendriks, 2001, p. 119-120).

#### **1.2.3.2 Resinas orgánicas termoestables**

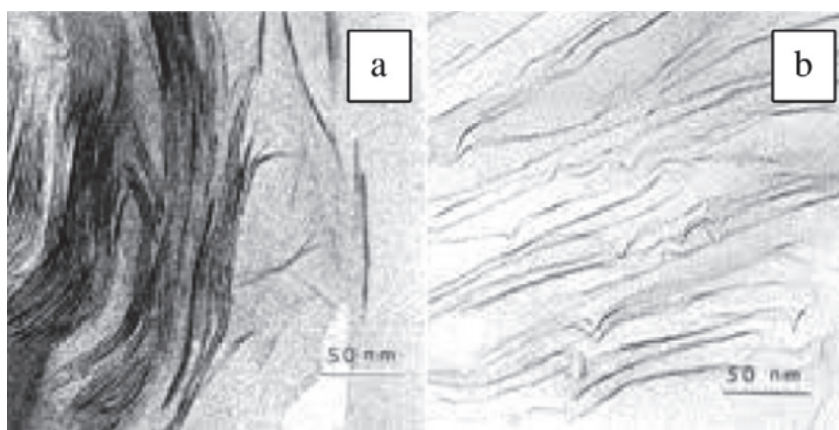
El proceso de encapsulado con polímeros es una tecnología relativamente nueva que ha sido desarrollada en los últimos 12 años para el tratamiento de residuos sólidos tóxicos, peligrosos y/o con un nivel bajo de radioactividad. La EPA (1996) afirma que la microencapsulación con polímeros es una opción de tratamiento viable para una gran variedad de desechos sólidos entre los que se pueden mencionar: sales concentradas de evaporadores, lodos, cenizas producto de incineración, residuos de oxidación de sales, entre otros. Adicionalmente, los polímeros han demostrado un desempeño satisfactorio en la macroencapsulación de desechos radioactivos (p. 50).

Los polímeros termoestables son aquellos que se forman por una reacción de entrecruzamiento químico irreversible al ser sometido a calentamiento, por lo que el pre-polímero líquido a temperatura ambiente se convierte en una masa sólida infundible. Una vez que se solidifican, los polímeros termoestables no se pueden refusionar o reconformar; es por ello que la reacción de polimerización se lleva a

cabo en un molde para obtener de esta manera la forma definitiva de la mismo (Newel, 2010, p. 151).

Los polímeros termoestables se forman por una reacción química entre el prepolímero líquido mencionado previamente y un agente de curado o iniciador. El residuo sólido, de preferencia en polvo y seco, se mezcla y añade a estos dos componentes formando así una esponja, que retiene en la matriz partículas sólidas del residuo peligroso (La Grega, Buckingham y Evans, 1996, p. 767; EPA, 1996, p. 50).

En bibliografía se han probado diversas resinas termoestables para el encapsulado de residuos sólidos peligrosos, entre estas se encuentran: la resina poliéster ortoftálica, la resina vinil ester, la resina epóxica, etc. Según Chattopadhyay y Condit (2002) se han obtenido una reducción de contaminantes en el lixiviado de hasta 50% con resinas poliéster y una resistencia a la compresión del material encapsulado que oscila entre 35 a 42 MPa (p. 23). A manera de ejemplo, en la Figura 1.11 se ilustra un proceso de encapsulado de arcilla con resina epóxica a 10% de concentración.



**Figura 1. 11** Micrografía obtenida mediante microscopio electrónico de transmisión de arcilla pura (a) y arcilla estabilizada con polímero al 10% de concentración. (b) (Ragam, 2013, p. 97)

Se conoce que las resinas termoestables estabilizan los desechos por dos mecanismos principales, macro y micro encapsulación; ya que no se produce una

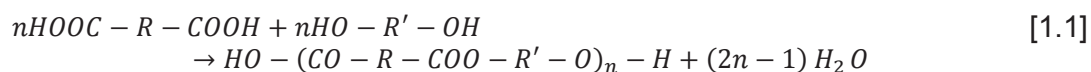
reacción química entre los contaminantes y el pre-polímero de la resina (La Grega, Buckingham y Evans, 1996, p. 767).

La ventaja de este proceso, en relación con otras técnicas de fijación, es que generalmente el material obtenido es de baja densidad. Además, se requieren únicamente pequeñas cantidades de aditivos para solidificar los residuos. Por otro lado, existe la posibilidad de que se produzca una reacción entre los contaminantes y el monómero o agente de curado, interfiriendo la solidificación en algunos casos. (La Grega, Buckingham y Evans, 1996, p. 767; EPA, 1996, p. 51).

- **Resina poliéster insaturada**

La resina poliéster insaturada es considerada una de las cuatro resinas termoestables más importantes a nivel mundial junto con la epoxi, la fenólica y la uréica representando actualmente el 20% en volumen de los termoestables a nivel global (Akovali, 2005, p.14).

Se forma por la reacción de esterificación entre ciertos ácidos orgánicos o anhídridos de ácidos, denominados ácidos di o poli-carboxílicos y un grupo de alcoholes denominados polioles según la ecuación [1.1]. Las insaturaciones se forman por inclusiones de anhídrido maleico o ácido fumárico que se realizan en el proceso de fabricación de la resina, mientras mayor sea el número añadido, más centros reactivos tendrá la resina y adquiere más rigidez una vez curada (Tsai y Hwang, 2011, p. 8-9).



La reacción de curado o entrecruzamiento de la resina es muy complejo, ya que intervienen diversos mecanismos de forma simultánea. El proceso inicia con la adición de radicales libres suministrados por un iniciador, habitualmente un peróxido, con el objetivo de descomponer el enlace O-O. Esta reacción es



catalizada mediante la acción del calor o de un acelerador; los más utilizados son las sales orgánicas de cobalto y las aminas terciarias (Tsai y Hwang, 2011, p. 8-9).

Como consecuencia de la apertura del enlace, se inicia un crecimiento lineal de las cadenas que pronto empiezan a ramificarse y posteriormente a entrecruzarse. Esta reacción transforma rápidamente y de forma irreversible a la resina de un líquido viscoso hasta un estado de gel elástico, a partir del cual, el material adquiere una forma definida y ya no puede ser refundido. (Tsai y Hwang, 2011, p. 13-15).

#### **1.2.4 NORMATIVA AMBIENTAL VIGENTE PARA RESIDUOS PELIGROSOS**

Las normativas ambientales vigentes en el Ecuador; y, en particular, en la ciudad de Quito, son muy estrictas en lo que respecta a límites máximos permisibles de metales pesados para desechos sólidos industriales. El incumplimiento de estas normas conlleva a la suspensión y/o revocatoria de los permisos ambientales en las empresas (Concejo del Distrito Metropolitano de Quito, 2014a, pp. 41-42).

##### **1.2.4.1 Ordenanza municipal 404 para el Distrito Metropolitano de Quito**

Toda organización que realice proyectos dentro del Distrito Metropolitano de Quito y que genere impacto o riesgos ambientales debe cumplir las normas expedidas en la Ordenanza Metropolitana 404. Esta ordenanza a través de la Resolución 002 en el Artículo 11 establece la Norma Técnica de Desechos Peligrosos y Especiales y la Norma Técnica para el Control de Descargas Líquidas a Cauce de Agua (Concejo del Distrito Metropolitano de Quito, 2014a, pp. 5-6).

#### 1.2.4.2 Norma técnica de desechos peligrosos y especiales

Esta norma rige para la jurisdicción del Distrito Metropolitano de Quito y se aplica a todos los establecimientos públicos o privados que generan desechos peligrosos y especiales, y a los gestores ambientales involucrados en su gestión. Así pues, un desecho peligroso puede ser calificado como un desecho especial o no peligroso si las sustancias que le otorgan características tóxicas no superan los límites de concentración por contaminante establecidos en la Tabla 1.5 (Concejo del Distrito Metropolitano de Quito, 2014b, p.3 -7).

Adicionalmente, establece que los lodos de planta de tratamiento de aguas residuales deberán ser estabilizados previos a su disposición

**Tabla 1.5** Límites máximos permisibles en el extracto PECT (Prueba de Lixiviación) para constituyentes inorgánicos (metales pesados)

CONTAMINANTE	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE (mg/L)
Arsénico	5,0
Bario	100,0
Cadmio	1,0
Cromo	5,0
Mercurio	0,2
Plata	5,0
Plomo	5,0
Selenio	1,0

\*Concejo de Distrito Metropolitano de Quito, 2014b, p. 7

#### 1.2.4.3 Norma técnica para el control de descargas líquidas

Esta norma tiene como objetivo establecer los límites permisibles de concentración de contaminantes en los efluentes líquidos de origen industrial, comercial y de servicios, vertidos al sistema de alcantarillado y cauce de aguas dentro del territorio del Distrito Metropolitano de Quito (Concejo de Distrito Metropolitano de Quito, 2014c, pp. 1-2)

La norma exige que toda descarga proveniente de actividades industriales debe ser vertida al receptor (cauce de agua para el caso particular de este estudio) cuando se haya verificado el cumplimiento de los valores máximos permisibles establecidos en la Tabla 1.6 (Concejo de Distrito Metropolitano de Quito, 2014c, pp. 1-2)

**Tabla 1. 6** Límites máximos permisibles de descargas líquidas a cauce de agua para constituyentes inorgánicos (metales pesados)

<b>CONTAMINANTE</b>	<b>LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE (mg/L)</b>
Aluminio	5,0
Arsénico	0,1
Cadmio	0,02
Cobre	1,0
Cromo	0,5
Mercurio	0,005
Níquel	2,0
Plata	5,0
Plomo	0,5
Zinc	2,0

\*Concejo de Distrito Metropolitano de Quito, 2014c, pp. 6-7

## **2 PARTE EXPERIMENTAL**

### **2.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DE LOS LODOS PROVENIENTES DE LOS PROCESOS DE FOSFATADO Y ENFRIAMIENTO DE LA INDUSTRIA DE GALVANIZADO**

#### **2.1.1 MUESTREO**

Para realizar la caracterización inicial física y química de los lodos provenientes de los procesos de fosfatado y enfriamiento se efectuó un muestreo compuesto de los mismos. Se tomaron cuatro muestras de 500 g a intervalos de 6 h durante un día. Esta metodología se repitió por 7 días distintos, determinados al azar, durante 2 semanas, para garantizar la representatividad de la muestra.

Tanto los lodos producto del proceso de fosfatado como los provenientes del proceso de enfriamiento fueron recogidos en un recipiente plástico inmediatamente después de su paso por el filtro. Las muestras individuales se caracterizaron mediante parámetros químicos y físicos entre los que se encuentran: pH, temperatura, humedad y densidad, con el objetivo de utilizar estos parámetros en el futuro dimensionamiento de la planta, así como explicar los resultados obtenidos en el ensayo de lixiviación que se realizó para cada una de las muestras encapsuladas.

#### **2.1.2 DETERMINACIÓN DE pH**

La determinación del pH de los lodos se realizó mediante un phmetro. Para el efecto, se colocó 100 g de lodo en un vaso de precipitación de 250 mL, se dejó reposar el residuo por aproximadamente 12 h y se introdujo el electrodo en el lixiviado sobrenadante del mismo. Se esperó un minuto hasta que la medida se estabilice en el aparato. Este procedimiento se repitió 3 veces para cada uno de los lodos (fosfatado y enfriamiento). Los resultados obtenidos son presentados en la sección 3.1.1.

### 2.1.3 DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA

Para determinar la temperatura de los lodos producto de fosfatado y enfrió, se utilizó un termómetro de bulbo de mercurio. Para el efecto, se colocó el bulbo del termómetro en el interior de las muestras frescas de lodos (inmediatamente después de que fueron removidas del filtro) y se esperó un minuto para que se establezca la medida. Este procedimiento se repitió 3 veces para cada uno de los lodos (fosfatado y enfrió). Los resultados de este experimento influyen directamente en el dimensionamiento del secador en la planta de tratamiento de lodos ya que corresponde a la temperatura de ingreso de los lodos al equipo; los valores obtenidos se muestran en la sección 3.1.2.

### 2.1.4 DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD Y ELABORACIÓN DE CURVA DE SECADO

La determinación de la humedad de los lodos producto de fosfatado y enfrió se realizó mediante la norma ASTM D2216-10 *Determinación nivel laboratorio de agua (humedad) contenida en sólidos y rocas mediante diferencia de masa* cuyo detalle se encuentra en el ANEXO I.

Para el ensayo se utilizó una estufa de secado con control de temperatura cuya sensibilidad es 50°C y capacidad de 250 °C. Adicionalmente, para tener un mejor control de la temperatura, se adecuó un termómetro de bulbo de mercurio. Se pesó tres muestras de 185 g aproximadamente para cada tipo de lodo (fosfatado y enfrió) en un recipiente cerámico. Las muestras fueron sometidas a secado en el horno a una temperatura de 110 ± 5 °C, cada muestra se retiró del mismo a intervalos de 30 min para ser pesadas hasta que se obtuvo una masa constante. El contenido de agua para cada intervalo de tiempo fue calculado utilizando la ecuación [2.1]:

$$w = \left[ \frac{(M_{cms} - M_{cds})}{(M_{cms} - M_c)} \right] \times 100 = \left( \frac{M_w}{M_s} \right) \times 100 \quad [2.1]$$

Donde:

$w$ : contenido de agua, %

$M_{cms}$ : masa del recipiente y la mezcla húmeda, g

$M_{cds}$ : masa del recipiente y la mezcla seca, g

$M_c$ : masa del recipiente, g

$M_w$ : masa de agua, g

$M_s$ : masa de la mezcla seca, g

Con los resultados obtenidos, se construyó la gráfica de contenido humedad en base seca en función del tiempo utilizando el contenido de agua  $w$  (%) que se reportó en las muestras de lodo cada 30 min. Para transformar el contenido de agua ( $w$ ) en humedad base seca se utilizó la ecuación [2.2]

$$X_t = \frac{1}{1 - \frac{w}{100}} \text{ para cada tiempo } t \quad [2.2]$$

Donde:

$X_t$ : humedad en base seca

$w$ : contenido de agua, %

A partir de la gráfica de humedad base seca en función del tiempo, se construyó una curva de velocidad de secado midiendo las pendientes de las tangentes en cada punto, obteniendo el valor de  $\frac{dX}{dt}$  para distintos contenidos de humedad. Mediante este procedimiento se calculó la velocidad de secado a partir de la expresión [2.3]

$$R = -\frac{M_s}{A} \left( \frac{dX}{dt} \right) \quad [2.3]$$

Donde:

$R$ : velocidad de secado

- $M_s$ : masa de la sólido seco
- $\frac{dX}{dt}$ : pendiente de la tangente para distintos contenidos de humedad
- A: área expuesta al secado

La curva de velocidad de secado se obtuvo graficando R en función del contenido de humedad en base seca y se utilizó para determinar el tiempo de secado en el cual el lodo cumple con las características de humedad requeridas para cada encapsulante. El detalle de cálculo se muestra en el ANEXO II y los resultados obtenidos se presentan en la sección 3.1.4

### **2.1.5 DETERMINACIÓN DE DENSIDAD**

La determinación de la densidad de los lodos se realizó mediante la norma ASTM D854-10 *Test estándar para la determinación de gravedad específica de sólidos mediante picnómetro de agua* cuyo detalle se encuentra en el ANEXO III

Esta norma proporciona dos métodos A y B para determinar la gravedad específica de una muestra de sólidos que pasen la malla N° 4 (4,75 mm). Para el caso particular de este proyecto, se utilizó el método B: *Procedimiento para especímenes secados en horno* por medio del valor del contenido de humedad de los lodos, fosfato y enfrío obtenido experimentalmente en el punto 2.1.4 Los resultados obtenidos se presentan en la sección 3.1.5 y se utilizaron en el dimensionamiento del secador y el tanque de mezcla.

### **2.1.6 DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS EN LOS LIXIVIADOS DE LOS LODOS PROVENIENTES DEL PROCESO DE FOSFATADO Y ENFRÍO.**

La determinación de la concentración de metales pesados contaminantes en los lixiviados de los lodos provenientes de los procesos de fosfatado y enfrío se realizó mediante el método 1311 de la EPA conocido como ensayo TCLP, cuyas

siglas significan características de toxicidad, procedimiento de lixiviación. Un resumen de esta norma se encuentra en el ANEXO IV.

El ensayo consistió en triturar el residuo que va a ser sometido a la prueba (de ser necesario) hasta obtener partículas inferiores a 9,5 mm. Esta mezcla triturada se mezcló con una solución de ácido acético débil cuyo pH correspondió a  $2,88 \pm 0,05$  con una relación en peso líquido-sólido de 20. La solución fue preparada mediante la adición de 5,7 mL de ácido acético glacial, grado reactivo 99.8% de pureza, marca Baker, en 1 L de agua. La muestra fue agitada por 18 h a 30 rpm a 22 °C en un aparato específico para agitación rotatoria con ajuste automático de velocidad de rotación para finalmente filtrarla en un filtro de fibra de vidrio de 0,6 a 0,8  $\mu\text{m}$ . El extracto filtrado se sometió a absorción atómica para cuantificación de arsénico, bario, cadmio, cromo, mercurio, selenio, plata, plomo, zinc y níquel; todos estos metales están normados por la Ordenanza 404. El análisis descrito se efectuó en el Laboratorio DPEG de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Central del Ecuador.

Los resultados presentados en el punto 3.1.6 fueron comparados con los valores establecidos como máximos permisibles en las normas técnicas de la Ordenanza 404 especificados en la sección 1.2.4; particularmente, con la Norma Técnica de Residuos Peligrosos; sin embargo, las concentraciones de zinc y níquel no están reguladas por la mencionada norma. Debido a este vacío legal, se tomó como valor de referencia el valor máximo permisible para descargas líquidas a cauce de agua, especificado en la Norma Técnica de la Ordenanza 404. (Concejo de Distrito Metropolitano de Quito, 2014b, p. 7; Concejo de Distrito Metropolitano de Quito, 2014c, pp. 6-7)

## **2.2 EVALUACIÓN DEL PROCESO DE ENCAPSULADO DE LODOS UTILIZANDO CEMENTO**

Con el fin de evaluar el proceso de encapsulado de lodos utilizando cemento se realizaron 2 experimentos consecutivos y dependientes para trabajar con 2



variables de respuesta diferentes: la concentración de zinc, plomo y níquel en los lixiviados y la resistencia a la compresión de los residuos encapsulados.

### **2.2.1 EVALUACIÓN DE LA LIXIVIACIÓN DE CONTAMINANTES A PARTIR RESIDUO ENCAPSULADO**

El primer experimento estaba orientado a minimizar la concentración de contaminantes en los lixiviados. Para el efecto, se trabajó con un diseño experimental completamente al azar de tipo  $1^2 \times 1^6$ ; es decir, se analizó la influencia de dos variables, la primera comprendió 2 niveles mientras que la segunda involucró 6.

Las variables incluidas en la experimentación fueron la presencia de aglomerado grueso y la proporción en peso lodo:encapsulante. La primera variable comprendió dos niveles: sin aglomerado grueso que se conoce técnicamente como mortero y con aglomerado grueso que se califica como hormigón. La segunda variable comprendió 6 niveles 30%, 40%, 50%, 60%, 75% y 90% de composición en peso lodo:encapsulante. Cada tratamiento se realizó por triplicado y en cada caso se determinó la concentración en los lixiviados de zinc, plomo y níquel.

Los especímenes encapsulados fueron obtenidos mezclando diferente cantidad de lodo seco, cemento y agua. Las muestras fueron elaboradas con cemento y, para el caso del hormigón, ripio tipo estrella (aglomerado grueso disponible en planta) cuyo tamaño de partícula se determinó en  $d_{80} = 6$  mm mediante un análisis granulométrico realizado en el Departamento de Metalurgia Extractiva de la EPN. Se elaboró muestras de 200 g base seca cuya composición se detalla en la Tabla 2.1

La cantidad de agua añadida para fraguar el cemento se fijó para establecer una relación en peso agua:sólidos de 0,3; este dato se seleccionó con base en las recomendaciones del Instituto Ecuatoriano del Cemento y el Hormigón, el cual

sugiere que la relación en peso agua:sólidos puede oscilar entre 0,15 y 0,45 según la resistencia del material que se requiera (INECYC, 2011, p. 1). Adicionalmente, se tomó en consideración el estudio de Flores (2006), donde se estabilizó cenizas producto de la incineración de residuos peligrosos con cemento en una relación agua sólidos de 0,3 (p.30).

**Tabla 2. 1** Composición de especímenes encapsulados con cemento

Componente	Relación en porcentaje Lodo:encapsulante (%)						
	30	40	50	60	75	90	
<b>Mortero (sin aglomerado grueso)</b>	Lodo Fosfato	22,50	30,00	37,50	45,00	56,25	67,50
	Lodo Enfrio	7,50	10,00	12,50	15,00	18,75	22,50
	Cemento	70,00	60,00	50,00	40,00	25,00	10,00
<b>Hormigón (con aglomerado grueso <math>d_{80} = 6 \text{ mm}</math>)</b>	Lodo Fosfato	22,50	30,00	37,50	45,00	56,25	67,50
	Lodo Enfrio	7,50	10,00	12,50	15,00	18,75	22,50
	Cemento	42,00	36,00	30,00	24,00	15,00	6,00
	Aglomerado	28,00	24,00	20,00	16,00	10,00	3,00

La mezcla fue compactada manualmente en moldes plásticos circulares de 15 cm de diámetro como se observa en la Figura 2.1.



**Figura 2. 1** Muestras encapsuladas con cemento y hormigón a 30%, 40% y 50% de relación en peso lodo:encapsulante

Todas las muestras fueron sometidas a igual tiempo de curado y condiciones de exposición, 25 días y temperatura ambiente en Quito. Las condiciones de curado

replicadas en el presente experimento intentaron imitar aquellas que se tendrán en la operación normal de la planta. El tiempo se escogió con base en la norma INEN 1488 donde se establece los requisitos para adoquines (INEN, 1485, 1987a, p.1).

Una vez concluido el período de curado, se realizó la determinación de la concentración de metales pesados contaminantes (níquel, plomo y zinc) en los lixiviados de las muestras encapsuladas mediante el ensayo TCLP. A partir de los resultados obtenidos, se evaluó el cumplimiento de la Ordenanza 404 y el porcentaje de retención de contaminantes en la matriz de cemento.

### **2.2.2 EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL RESIDUO ENCAPSULADO**

El segundo experimento consistió en determinar la resistencia a la compresión de los residuos encapsulados, se tomó como base los resultados obtenidos en el experimento 2.2.1 y se realizó este ensayo solo a aquellas composiciones lodo:encapsulante que cumplieron con la norma técnica de la Ordenanza 404.

Para el efecto, se escogió tres composiciones de las seis analizadas. El diseño experimental fue de tipo  $1^2 \times 1^3$ . De manera análoga al experimento 2.2.1, se incluyó dos variables, presencia de aglomerado grueso y proporción en peso lodo:encapsulante. La primera variable comprendió dos niveles: mortero y hormigón. La segunda variable comprendió 3 niveles 40%, 50% y 60% de relación en peso lodo:encapsulante. Cada tratamiento se realizó por triplicado y en cada caso se determinó la resistencia a la compresión del residuo encapsulado.

En el caso del mortero y el hormigón, este ensayo se realizó bajo la Norma INEN 1485: *Adoquines, Determinación de la resistencia a la compresión*. Para el efecto, se elaboró bloques de mortero y de hormigón rectangulares de 20 x 10 x 8 mm; condición prefijada por la mencionada norma detallada en el ANEXO V. La Figura

2.2 muestra los bloques elaborados en sus respectivos moldes y en proceso de curado. (INEN 1485, 1987a, p.1)



**Figura 2. 2** Bloques encapsulados con cemento y hormigón en proceso de curado

La prueba descrita se realizó en una máquina de ensayos de compresión, cuya capacidad máxima era 1 000 kN, en el laboratorio de ensayo de materiales y modelos de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Central del Ecuador.

El resultado de las pruebas de resistencia a la compresión a los 25 días de curado se comparó con la norma INEN 1488 *Adoquines: Requisitos*, correspondiente a los valores mínimos de resistencia a la compresión que debe cumplir el material para ser utilizado como adoquín. El detalle de esta norma se presenta en el ANEXO VI.

La Tabla 2.2 muestra el valor mínimo de resistencia a la compresión que deben cumplir los adoquines para poder tener aplicación en sus respectivos usos.

**Tabla 2. 2** Valores mínimos de resistencia a la compresión en adoquines por aplicación

Aplicación	Resistencia a la compresión (MPa)*
Peatonal	20
Estacionamiento y calles residenciales	30
Caminos secundarios y calles principales	40

\*Ensayo de compresión a los 25 días (INEN 1488, 1987b, p. 3)

## 2.3 EVALUACIÓN DEL PROCESO DE ENCAPSULADO DE LODOS UTILIZANDO RESINA POLIÉSTER INSATURADA

La evaluación del proceso de encapsulado de lodos utilizando resina poliéster insaturada consistió en la realización de 2 experimentos consecutivos y dependientes para trabajar con 2 variables de respuesta diferentes: la concentración de zinc, plomo y níquel en los lixiviados y la resistencia a la compresión de los residuos encapsulados.

El primer experimento, al igual que en el caso del cemento, estuvo orientado a maximizar el grado de reducción de la concentración de contaminantes en los lixiviados. Para el efecto, se desarrolló un diseño experimental completamente al azar de tipo  $1^3$ ; es decir, se trabajó con una variable a tres niveles 30%, 40% y 50% de relación en peso lodo:resina. Este rango de trabajo se escogió con base en pruebas preliminares considerando el máximo porcentaje de lodo seco que soporta la resina para poder curar de una manera estable.

En primera instancia, se secó 1 kg de lodo, tanto de fosfato como de enfrió para utilizar el mismo en la elaboración del material encapsulado. Se elaboró mezclas de lodo y resina 200 g base seca según la composición se detalla en la Tabla 2.3

**Tabla 2. 3** Composición especímenes encapsulados con resina poliéster insaturada

Componente	Relación en porcentaje Lodo:encapsulante (%)		
	30	40	50
Lodo Fosfato	22.5	30.0	37.5
Lodo Enfrió	7.5	10.0	12.5
Resina	70.0	60.0	50.0
Iniciador (Metil etil cetona peróxido)	<0.1	<0.1	<0.1
Catalizador (Octoato de cobalto )	<0.1	<0.1	<0.1

La resina poliéster insaturada así como el reactivo iniciador (metil, etil cetona peróxido) y el catalizador (octoato de cobalto) utilizados fueron adquiridos en La Casa del Pintor. La mezcla fue compactada en moldes plásticos circulares de 15 cm de diámetro cómo se observa en la Figura 2.3.



**Figura 2. 3** Muestras encapsuladas con resina al 30%, 40% y 50% de relación lodo: encapsulante

Dado que la resina, el iniciador y el catalizador vienen en presentación líquida, se realizó la mezcla en el mismo molde utilizando un agitador de plástico. Todas las muestras fueron sometidas a igual tiempo de curado y condiciones de exposición, 25 días y temperatura ambiente promedio en Quito, 15°C (EPMMQ, 2012, p. 6-2).

Una vez concluido el período de curado, se realizó la determinación de la concentración de metales pesados contaminantes en los lixiviados de las muestras encapsuladas mediante el ensayo TCLP. A partir de los resultados obtenidos, se evaluó el cumplimiento de la Ordenanza 404. Sólo las muestras que cumplieron con la Norma técnica de la Ordenanza 404, se sometieron a un ensayo de resistencia a la compresión según la norma ASTM D 695-10 *Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics*.

En caso de que ninguna de las muestras permitiera que la concentración de los metales pesados en los lixiviados sea inferior a los especificados por la norma técnica de la Ordenanza 404, el ensayo mencionado no se aplicaría.

## 2.4 COMPARACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DEL PROCESO DE ENCAPSULADO PARA ESCOGER EL ENCAPSULANTE QUE PERMITA LA MÁXIMA REDUCCIÓN DE LOS CONTAMINANTES Y EL CUMPLIMIENTO DE LA NORMA TÉCNICA DE LA ORDENANZA 404

Una vez obtenidos los resultados de los ensayos TCLP y de resistencia a la compresión, se procedió a compararlos entre sí para escoger el mejor encapsulante desde el punto de vista técnico y económico. Para el efecto, se consideraron cinco factores fundamentales:

- Porcentaje de reducción de los metales pesados (zinc, plomo y níquel) en los lixiviados calculado según la ecuación 2.4. Los resultados obtenidos se pueden visualizar en la sección 3.4.1

$$P (\%) = \frac{C_o - C_f}{C_o} \times 100 \quad \text{cada relación en peso lodo:encapsulante} \quad [2.4]$$

Donde:

$P$ : Porcentaje de reducción de lixiviados

$C_o$ : Concentración de metal en lixiviados en el lodo sin encapsular

$C_f$ : Concentración de metal en lixiviados en el lodo encapsulado

- Cumplimiento de la Norma Técnica de la Ordenanza 404 para la concentración de zinc, plomo y níquel en el lixiviado de las muestras encapsuladas cuyos resultados se observan en la sección 3.4.2
- Resistencia a la compresión de las muestras encapsuladas presentadas en la sección 3.4.3
- Tiempo de secado necesario para obtener la humedad requerida para cada encapsulante cuyo resultado se observa en la sección 3.4.4

Se calculó el tiempo de secado al que se debe exponer la materia prima (lodo) necesario para cada uno de los encapsulantes con el objetivo de evaluar la factibilidad técnica del proceso, considerando que los encapsulantes presentan diferentes requerimientos de humedad para poder funcionar como tales.

El cemento requiere adición de agua mientras que la resina trabaja con el lodo seco. Para el efecto, se utilizaron las Figuras 3.1 y 3.2 en las cuales se determinaron las humedades finales en base seca que se debería tener en los lodos para poder encapsularlos con cemento o con resina. Una vez definidos estos valores, se determinó gráficamente la velocidad de secado que corresponde a cada una de las humedades finales en base seca a partir de las Figuras 3.3 y 3.4 presentadas en la sección 3.1.4. Una vez obtenido el valor de velocidad en unidades de  $\text{kg sólido seco}/\text{m}^2\text{s}$ , se obtuvo el tiempo de secado utilizando la ecuación 2.5.

$$\theta = \frac{M_s (X_o - X_f)}{A \cdot R_{sc}} \text{ para humedades superiores a la crítica} \quad [2.5]$$

Donde:

$\theta$ : Tiempo de secado

$X_o$ : Humedad inicial en base seca

$X_f$ : Humedad final en base seca

$M_s$ : Masa sólido seco

$R_{sc}$ : Velocidad de secado en el período de secado constante

A: Área expuesta al secado

Para poder realizar una comparación preliminar, se fijó la cantidad de materia prima y su respectiva área expuesta al secado; se utilizó 100 kg de lodo seco y 5  $\text{m}^2$  de superficie.

- Precio del encapsulante



Con la finalidad de verificar la factibilidad económica del proceso, se calculó y comparó el costo en dólares que representa la encapsulación de 100 kg de lodo contaminado para las diferentes composiciones lodo:encapsulante en todo el rango de experimentación; es decir, entre 30% y 90%. Los precios reportados en la presente comparación utilizan como referencia los datos presentados en la Tabla 2.4 actualizados a junio de 2014.

**Tabla 2. 4** Precio de los materiales utilizados en el proceso de encapsulado

<b>Material</b>	<b>Presentación</b>	<b>Precio (USD + IVA)</b>
Cemento	50 kg	7,85
Ripio tipo estrella	120 m <sup>3</sup>	120,00
Resina poliéster insaturada	25 kg	106,25
Iniciador	120 cm <sup>3</sup>	1,09
Catalizador	120 cm <sup>3</sup>	1,02

## 2.5 DIMENSIONAMIENTO DE LOS EQUIPOS QUE CONFORMAN EL PROCESO DE ENCAPSULADO

El diseño conceptual de una planta de residuos sólidos provenientes del galvanizado por inmersión en caliente de alambre de acero se realizó siguiendo la secuencia presentada en la Figura 2.4 donde se enumera las operaciones unitarias consideradas. La capacidad total de la planta se diseñó para una producción mensual de 2 000 kg de lodo de fosfato y 500 kg de lodo de enfriamiento tomando en consideración el historial de producción mensual en una planta de galvanizado.



**Figura 2. 4** Secuencia de operaciones unitarias contempladas en el diseño de la planta de tratamiento de residuos sólido provenientes de galvanizado

La obtención de los flujos de entrada y salida de cada operación unitaria en el diagrama se realizó con base en la ecuación global de balance de masa representada en la ecuación 2.6

$$A = E - S - C + G \quad [2.6]$$

Dónde:

A: acumulación

E: Masa que entra

S: Masa que sale

C: Masa que se consume y

G: Masa que se genera

Debido a que no existe reacción química en ninguna de las fases del proceso por lo cual la ecuación 2.7 se reduce a:

$$A = E - S \quad [2.7]$$

Una vez obtenidos todos los flujos requeridos, se realizó los diagramas BFD y PFD de la planta de tratamiento de residuos sólidos bajo la norma ANSI Y32.11. Los diagramas en cuestión se pueden visualizar en la Figura 3.33 y la 3.34, respectivamente.

A continuación, se establecieron los tiempos de operación en cada proceso involucrado para lo cual se construyó un diagrama de recorrido de producto que se presenta en la Tabla 3.14 y se realizó una descripción detallada del funcionamiento de la planta de tratamiento de desechos sólidos tomando en cuenta los aspectos logísticos de operación. Con base en toda la información obtenida, se procedió a dimensionar los equipos requeridos según los criterios que se enumeran a continuación y considerando una previsión de producción diaria de 20 días al mes.

### 2.5.1 SECADOR

Para el dimensionamiento del secador se consideraron los siguientes factores.

- Condiciones de secado idénticas a las experimentales para utilizar los resultados obtenidos en la sección 3.1.4. La operación de secado debe trabajar a 100°C, a presión constante y atmosférica en la ciudad de Quito equivalente a 0,72 atm, sin convección de aire en la cámara de secado y con una humedad relativa del aire media de 60% que corresponde a las condiciones ambientales experimentales con las que se trabajó en el presente proyecto (EPMMQ, 2012, p. 6-13).
- La humedad inicial de los lodos de fosfato y enfrió determinadas experimentalmente en el punto 2.1.4 y cuyos resultados se encuentran en la sección 3.1.4.
- La humedad crítica de los lodos de fosfato y enfrió y la velocidad de secado en el periodo de secado constante determinadas a partir de las curvas de velocidad de secado presentadas en las Figuras 3.3 y 3.4
- Temperatura inicial de los lodos determinados experimentalmente en el punto 2.1.3
- El flujo másico diario de lodo de fosfato y enfrió que se requiere para suplir la capacidad de producción mensual.
- El área expuesta al secado en el secador que se requiere en planta determinado a partir de las dimensiones de la cámara de secado obtenidas a partir del catálogo del equipo y especificadas en la Figura 3.35.
- Material acero ANSI 304 considerando que estará ubicado en un galpón abierto al aire libre.
- Un factor de sobredimensionamiento que no supere el 10% (Palacio, Tapia y Saldarriaga, 2005, p.5).

### **2.5.2 TANQUE DE MEZCLADO**

La capacidad y dimensiones del tanque de mezcla se determinaron considerando los siguientes factores.

- El flujo másico de lodo seco que sale del secador determinado a partir del balance de masa presentado en la sección 3.5.2.
- La densidad de los lodos de fosfato y enfrió determinados experimentalmente en el punto 2.1.5 y cuyos resultados se presentan en la sección 3.1.6.
- Tiempo de mezclado determinado de manera preliminar en planta.
- Equipo que sea conocido por su aplicación específica para la construcción de tal manera que garantice homogeneidad en la muestra.
- Material acero ANSI 304 considerando que el equipo se encontrará en un galpón abierto al aire libre.
- Un factor de sobredimensionamiento que no supere el 10%. (Palacio, Tapia y Saldarriaga, 2005, p.5)

### **2.5.3 EQUIPO DE VIBROCOMPACTACIÓN**

El equipo de vibro compactación se dimensionó de acuerdo a los siguientes criterios:

- El flujo másico que sale de la operación unitaria precedente de mezclado determinado a partir del balance de masa presentado en la sección 3.5.2.
- Las dimensiones estándar que se encuentra en el mercado para la fabricación de bloques de hormigón que corresponden a moldes de 10 x 20 x 40 cm o 20 x 20 x 40 cm.
- La densidad de los lodos de fosfato y enfrió determinados experimentalmente en el punto 2.1.5 y cuyos resultados se presentan en la sección 3.1.6 y la densidad promedio del cemento Portland equivalente a

1,5 g/cm<sup>3</sup>. Estos valores se utilizaron para estimar la cantidad de mezcla que contiene cada molde.

- La composición en peso de la mezcla final lodo:encapsulante escogida en la sección 3.4.
- Material acero ANSI 304 considerando que el equipo se encontrará en un galpón abierto al aire libre.
- Un factor de sobredimensionamiento que no supere el 10% (Palacio, Tapia y Saldarriaga, 2005, p.5).
- Operación manual del equipo debido a la baja capacidad de producción de bloques.

Una vez que se obtuvo las capacidades adecuadas del secador, tanque de mezcla y equipo de vibroprensado, se procedió a buscar catálogos de equipos en el mercado que cumplan con las condiciones establecidas. Los diagramas de los equipos seleccionados se muestran en las Figuras 3.35, 3.36 y 3.37 para el secador, tanque de mezcla y equipo de vibroprensado respectivamente.

Finalmente, con estos datos, se elaboró un diagrama de distribución en planta *Layout* presentado en la Figura 3.38 y dos cortes del mismo presentados en la Figura 3.39. Como complemento, en la Figura 3.38 también se muestra el flujo de materia prima y producto.

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DE LOS LODOS PROVENIENTES DE LOS PROCESOS DE FOSFATADO Y ENFRIAMIENTO DE LA INDUSTRIA DE GALVANIZADO

##### 3.1.1 DETERMINACIÓN DEL pH

La determinación de pH se realizó por separado en cada uno de los lodos, fosfato y enfrió, por triplicado. Los resultados obtenidos por réplica así como su media se aprecian en la Tabla 3.1.

**Tabla 3. 1** Resultados de pH reportados para los lodos de fosfato y enfrió

Lodo	pH	pH medio
Fosfato	2,60	2,57
	2,54	
	2,56	
Enfrió	7,64	7,68
	7,80	
	7,60	

El lodo de fosfato presenta un pH ácido medio equivalente a 2,57 que se explica con la naturaleza del proceso y la composición del baño respectivo. El mayor componente del baño de fosfato es el ácido fosfórico libre ( $H_3PO_4$ ) que debe mantenerse a un pH fijo entre 1,8 y 3,2; bajo estas condiciones el metal puede ser atacado por los ácidos presentes y formar la capa pasivadora anticorrosiva como se detalla en la sección 1.1.3.3. Por lo tanto, el resultado de pH obtenido está dentro del rango correspondiente a las condiciones inherentes del proceso. (Sinha y Feser, 2002, p. 158)

El pH ácido que se reporta en los lodos de fosfato constituye un factor que facilita la futura lixiviación de cualquier contaminante contenido en el mismo ya que los metales pesados alcanzan su mínima solubilidad a pH superiores a 4,5 tal como se especificó en la sección 1.2.3.1 (Yilmaz, Çorça y Ünlü, 2003, pp. 205-206).

El lodo de enfriamiento, por su parte, presenta un pH más neutro correspondiente a 7,68. La explicación igualmente radica en la naturaleza del proceso que origina este lodo; el enfriamiento tiene como objetivo disminuir tensiones en el alambre mediante la inmersión del mismo en agua, de tal manera que se reduzca su temperatura de una manera súbita. El agua que sirvió como medio de enfriamiento directo se somete a tratamiento tal como se describió en la sección 1.1.4.3. Se conoce que el pH del agua oscila entre 6,8 y 7,3 por la presencia de diversos minerales; sin embargo, se reporta una ligera basicidad que puede ser consecuencia de la adición de cal y floculante al agua residual para su tratamiento.

El pH neutro que se reporta en los lodos de enfriamiento no permite emitir una conclusión definitiva acerca de su potencial de lixiviación, en este caso la cantidad de contaminante contenido en el lodo es el factor más importante para determinar la concentración que se obtendrá en el lixiviado. Para obtener datos acertados se realizó un ensayo TCLP cuyos resultados se observan en la sección 3.1.6.

### 3.1.2 DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA

La determinación de la temperatura se realizó en planta para cada uno de los lodos inmediatamente después de ser extraídos de los filtros. Los resultados obtenidos se reportan en la Tabla 3.2.

**Tabla 3. 2** Temperatura de los lodos de fosfato y enfriamiento después de ser extraídos del filtro

Lodo	Temperatura (°C)	Temperatura media (°C)
Fosfato	65,1	65,1
	67,9	
	62,2	
Enfriamiento	22,5	22,6
	22,3	
	22,9	

Los lodos de fosfato presentan una temperatura de 65,1 °C inmediatamente después de ser extraídos del filtro prensa. Este resultado se explica por las condiciones de temperatura que exige el proceso (entre 40 y 100 °C). Particularmente para este caso, el baño de fosfato se mantiene alrededor de los 70 °C.

El lodo de enfriamiento presenta una temperatura inferior comparada con el de fosfato, con un valor de 22,6 °C. Este resultado se explica al considerar la naturaleza del proceso que origina los lodos; las tortas en este caso provienen del filtrado de lodos de sedimentación de agua de enfriamiento que se mantiene a temperatura ambiente (20-23 °C aproximadamente).

Los resultados de la temperatura de cada uno de los lodos son un factor a considerar en el diseño de la planta de tratamiento, específicamente en el dimensionamiento del secador de lodos.

### 3.1.3 DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD

La humedad presente en los lodos se determinó utilizando la norma ASTM D2216-10 mediante tres réplicas para cada uno de los lodos, fosfato y enfriamiento, cuyos resultados se detallan en la Tabla 3.3.

**Tabla 3. 3** Resultados de contenido de humedad en los lodos de fosfato y enfriamiento

Lodo	Humedad base húmeda (%)	Humedad base húmeda media (%)	Humedad base seca (kg agua/kg sólido seco)	Humedad base seca media (kg agua/kg sólido seco)
Fosfato	39,15	39,33	0,64	0,65
	38,75		0,63	
	40,08		0,67	
Enfriamiento	83,67	82,02	5,12	4,62
	83,03		4,89	
	79,38		3,85	



En primer lugar, la humedad reportada para cada uno de los lodos es consecuencia directa de las condiciones bajo las cuales se opera los filtros prensa de fosfato y enfrió, respectivamente. En los procesos donde se generan los lodos se disponen de dos filtros prensa, destinados específica e individualmente para la obtención de cada uno de estos residuos

El lodo de fosfato tiene una humedad de 39,33 % base húmeda que corresponde a 0,65 kg agua/kg sólido seco; mientras que, el lodo de enfrió reporta una humedad correspondiente a 82,02% equivalente a 4,62 kg agua/kg sólido seco, duplicando el contenido de agua.

Los procesos de filtración de los lodos de fosfato y enfrió son de operación enteramente manual. El filtro de fosfato consta de 7 placas cuyas dimensiones son 40 x 40 cm. Los lodos de fosfato sedimentados en la tina del proceso se alimentan al filtro mediante una bomba neumática de 100 psi de presión de aire.

Por otro lado, el filtro del lodo de enfrió posee 13 placas de 47 x 47 cm; los lodos sedimentados en el clarificador son alimentados al filtro también con una bomba neumática de 100 psi de presión de aire. Estos datos fueron obtenidos en planta mediante manómetros en línea durante la operación de los filtros.

Las condiciones de operación del filtro de enfrió explican parcialmente el mayor contenido de humedad presente en las tortas. Aunque ambos filtros poseen igual presión en la bomba de alimentación, el gradiente de presión es mayor en el filtro de enfrió debido a que posee mayor número de placas; como resultado, la presión durante el llenado del filtro será menor favoreciendo un mayor contenido de humedad.

La naturaleza de los lodos también explica la diferencia de humedad reportada como resultado en este estudio, el componente mayoritario del lodo de fosfato es el fosfato de zinc, que físicamente es un polvo blanco fino y denso, por lo que no genera mucha porosidad en la torta resultante y disminuye la humedad que contiene la torta final. El lodo de enfrió, se genera en el proceso de

clarificación/floculación del tratamiento del agua de recirculación del proceso de enfriamiento, están compuestos por calcita magnesiana  $(\text{CaMg})\text{CO}_3$  en un 46%, calcita  $\text{CaCO}_3$  en un 30% y hematita  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  en un 10%, sólidos en forma de *floc*, con presencia de polímero floculante, por lo que presenta mayor porosidad y como consecuencia mayor humedad en la torta de filtración resultante. La composición aproximada de los lodos de enfriamiento se obtuvo a partir de resultados de análisis de Difracción de rayos X realizados a los lodos de enfriamiento en el Departamento de Metalurgia Extractiva de la Escuela Politécnica Nacional.

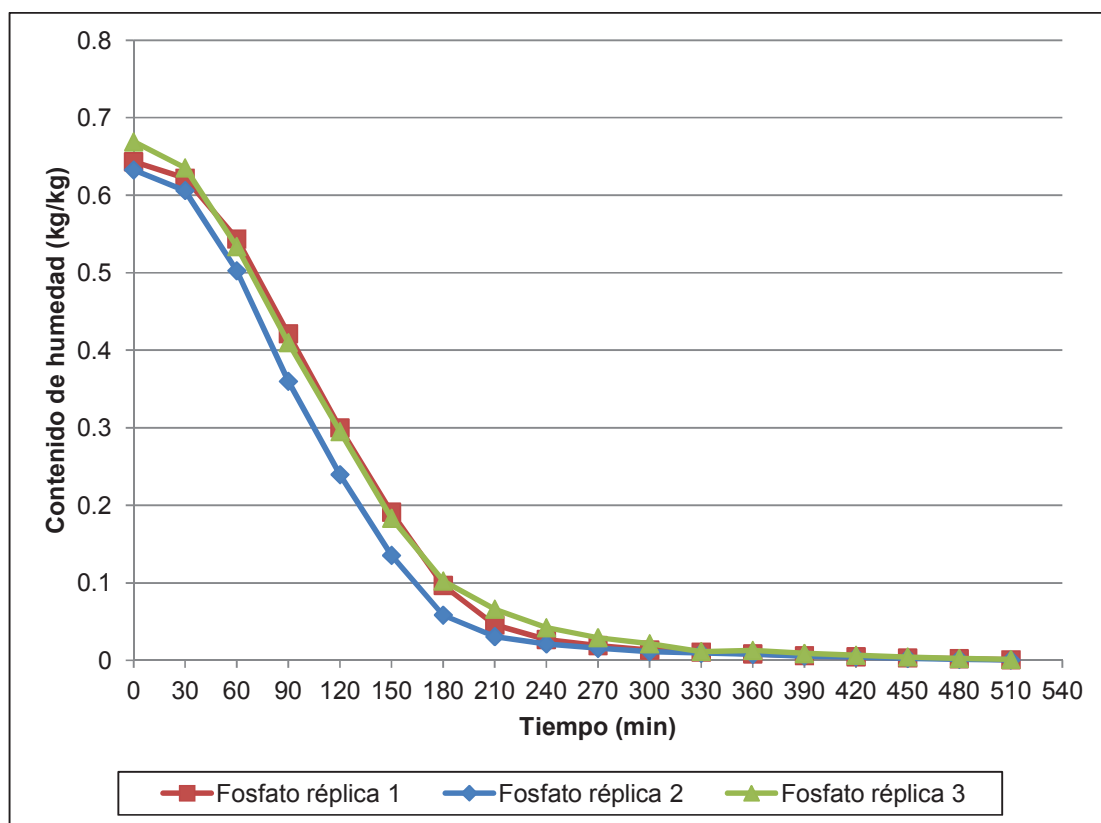
### 3.1.4 ELABORACIÓN DE LA CURVA DE VELOCIDAD DE SECADO

En el presente estudio, se realizaron curvas de velocidad de secado para cada uno de los lodos con el objetivo de determinar el tiempo de secado en el cual se cumple con las características de humedad requeridas para cada encapsulante; se efectuaron tres réplicas por cada uno de los residuos en estudio. En primera instancia, se presentan las curvas de contenido de humedad en función del tiempo obtenidas por cada réplica (3 en total) para los lodos de fosfato y enfriamiento en las Figuras 3.1 y 3.2, respectivamente.

La Figura 3.1 permite observar que el contenido de humedad del lodo de fosfato inicia aproximadamente en un rango que va entre 0,63 y 0,67 kg agua/kg sólido seco y disminuye progresivamente en función del tiempo hasta obtener una humedad cercana a 0,01 kg agua/kg sólido seco. Esta curva de contenido de humedad se identifica con las curvas teóricas para sólidos porosos, donde se presenta tres periodos definidos. El primero corresponde al período de secado inicial en el cual el sólido cubierto por una capa de líquido se calienta progresivamente hasta alcanzar la temperatura de equilibrio del sistema y por lo tanto, la velocidad de secado es mayor (minuto 30). (McCabe, Smith y Harriot, 2007, pp. 841)

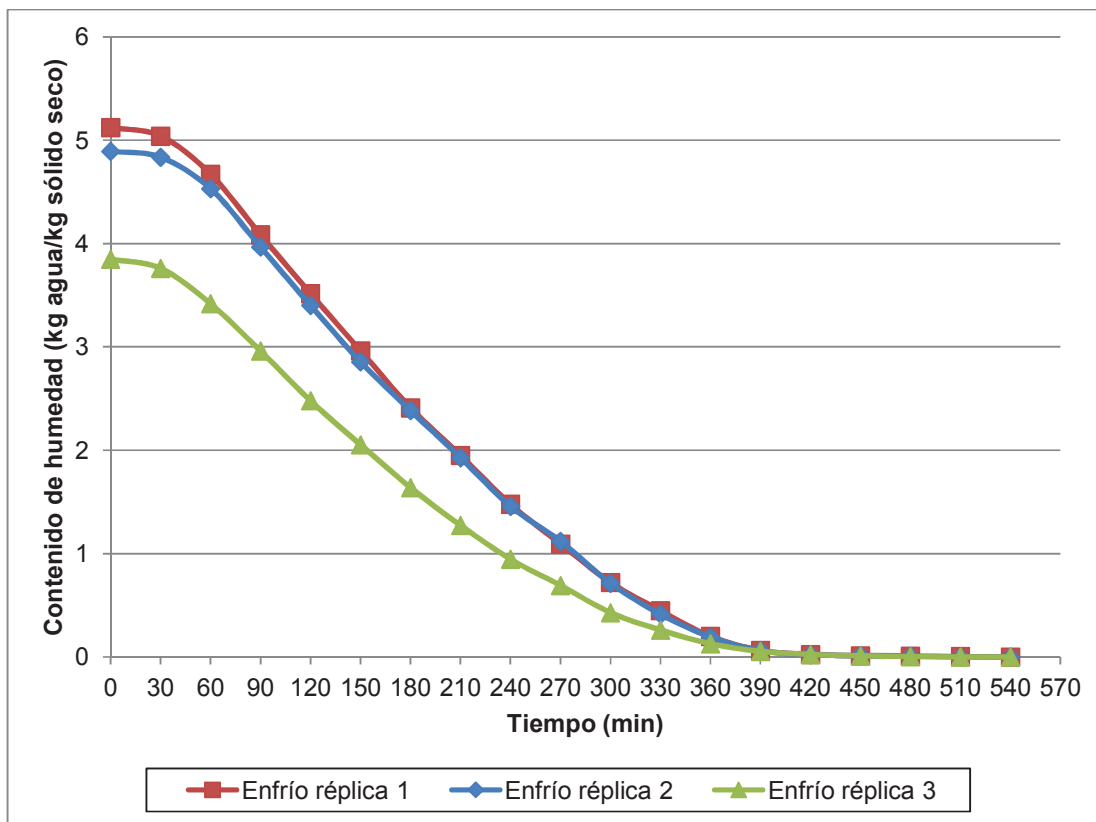
El segundo, denominado período de secado constante, comprendido entre el minuto 30 y el 180 para el lodo de fosfato, elimina la humedad adherida

mecánicamente al sólido a condiciones de equilibrio. Por último, se tiene un periodo de caída de velocidad de secado a partir del cual, la humedad no varía significativamente con el tiempo ya que remueve el agua adherida por mecanismos físico químicos al sólido en cuestión. Este tipo de humedad requiere mayor energía para su remoción. (McCabe, Smith y Harriot, 2007, pp. 841-843)



**Figura 3. 1** Curvas de contenido de humedad en función del tiempo por réplica para el lodo de fosfato

La curva de contenido de humedad del lodo de enfriamiento presentada en la Figura 3.2 presenta una ligera diferencia con la curva de fosfato. Aunque en ambos casos, se registra una disminución del contenido de humedad en función del tiempo, para el lodo de enfriamiento, se registra un periodo de inicio de secado más largo que finaliza a los 90 minutos aproximadamente, a diferencia del lodo de fosfato, donde el mismo período concluye a los 30 min.



**Figura 3. 2** Curvas de contenido de humedad en función del tiempo por réplica para el lodo de enfrió

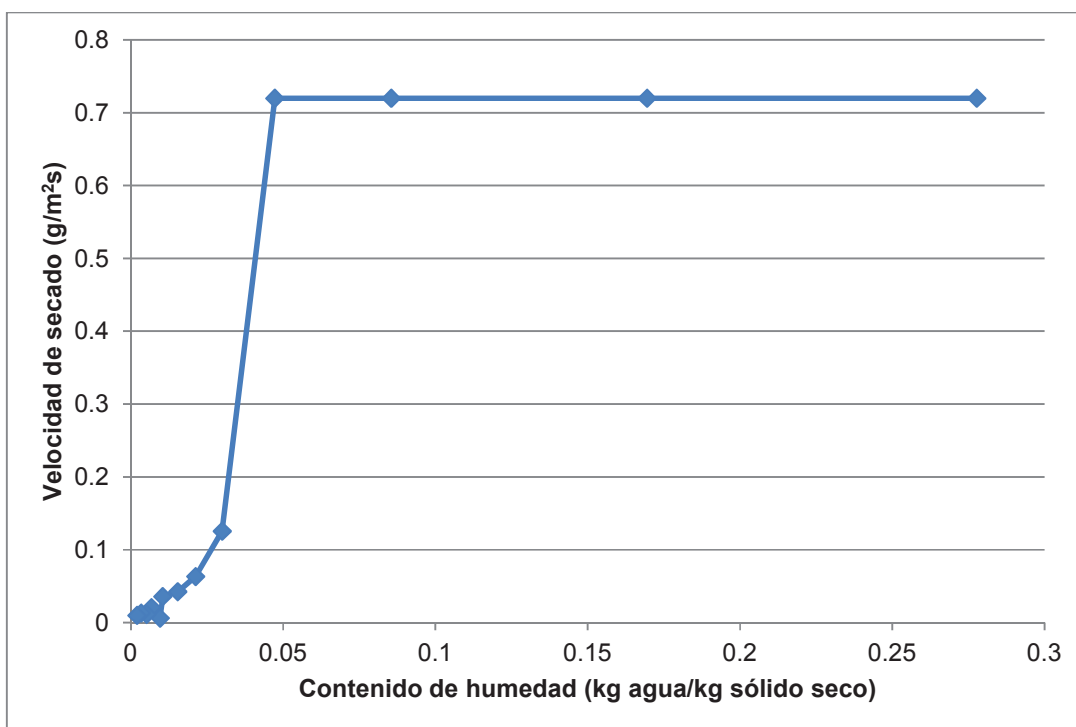
Las curvas de humedad son función del contenido de agua inicial, de la naturaleza de los sólidos y las condiciones de secado. En este caso, las dos primeras influyen directamente ya que las condiciones de secado han sido prefijadas mediante la norma ASTM D2216-10 para ambos casos.

El comportamiento obtenido para el enfrió se identifica de mejor manera con el secado de sólidos granulares embebidos en agua, por el alto contenido de humedad inicial en este lodo equivalente a 4,56 kg agua/kg sólido seco aproximadamente. Estudios han reportado que en este caso, se registra una tasa casi constante de secado hasta que se extrae el 80% de agua; sin embargo, aún no se ha presentado mecanismos que expliquen el fenómeno de manera satisfactoria. (McCabe, Smith y Harriot, 2007, pp. 843)

Cómo se observa en la Figura 3.2, el período de secado constante se extiende prácticamente hasta los 330 min; es decir, no se distingue el periodo de caída de secado. Sin embargo, a diferencia del fosfato, la réplica 3 del lodo de enfriamiento registra una mayor desviación respecto a las réplicas 1 y 2.

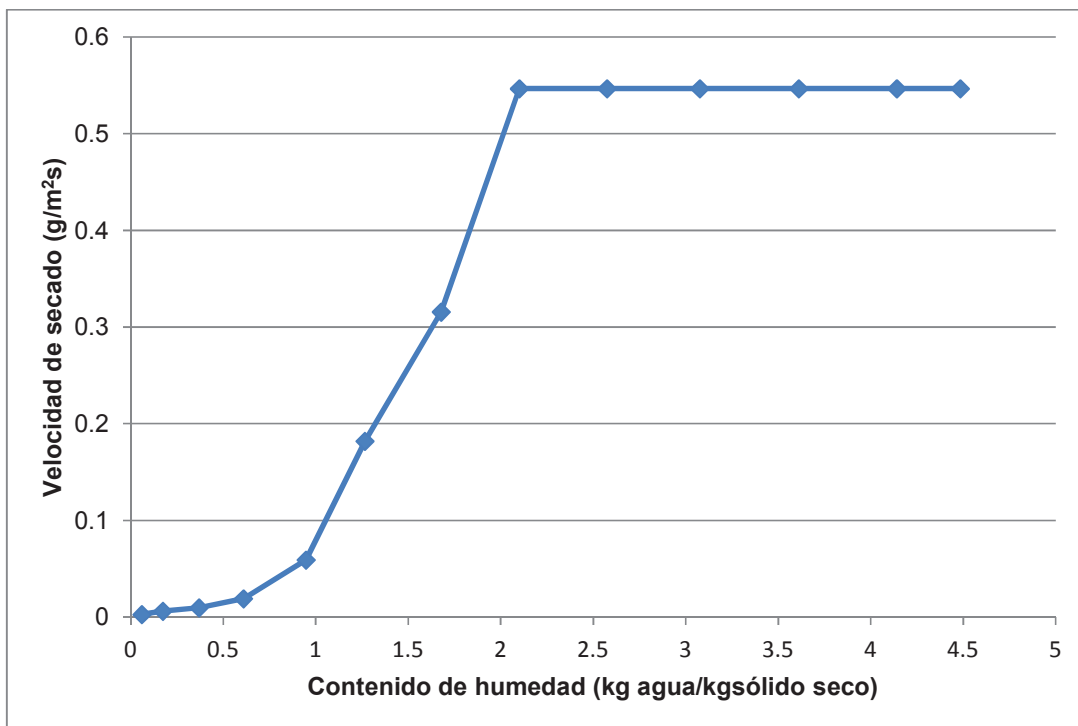
A partir de las Figuras 3.1 y 3.2, se construyó una curva de velocidad de secado utilizando la curva de humedad media obtenida para cada uno de los lodos y la ecuación 2.3, como resultado se obtuvieron las Figuras 3.3 y 3.4 para el lodo de fosfato y enfriamiento respectivamente.

La Figura 3.3 tiene correspondencia directa con la Figura 3.1, ya que la segunda se obtiene mediante el cálculo de las tangentes en cada punto de la primera. El objetivo de estos experimentos es estimar tiempos de secado reales en función del contenido de humedad que se requiere alcanzar, considerando que la curva de velocidad de secado, a diferencia de la curva de humedad, no depende de la masa de sólido seco utilizada en la prueba.



**Figura 3.3** Curva de velocidad de secado para lodo de fosfato

Así también, la Figura 3.4 es correspondiente con la Figura 3.2. Sin embargo, el ajuste de esta curva resultó menos exacto que en el caso anterior debido a la longitud del periodo de secado constante y la desviación reportada para cada una de las réplicas con respecto a la media. Como resultado, se deduce que la curva de velocidad de secado obtenida para el lodo de fosfato brindará resultados más reproducibles en la práctica.



**Figura 3. 4** Curva de velocidad de secado para lodo de enfriamiento

Las Figuras 3.3 y 3.4 permiten establecer dos parámetros importantes que se utilizarán en el presente trabajo para el diseño del secador. La humedad crítica correspondiente a 0,047 y 2,100 kg agua/kg sólido seco para el lodo de fosfato y el de enfriamiento, respectivamente; este valor es propio de la naturaleza del sólido y función de sus características físicas. El segundo parámetro obtenido es la velocidad de secado en el período constante correspondiente a 0,70 y 0,54 g agua evaporada/m<sup>2</sup>s. Teóricamente, este valor de velocidad es idéntico para igual tipo y temperatura de secado; variables que fueron fijadas por la norma ASTM D2216-10. En este caso, se registra una variación de 0,16 g agua evaporada/m<sup>2</sup>s

que puede ser consecuencia del ajuste de la curva de enfrió. La desviación que se obtuvo en esta última es mayor con respecto a la media y la longitud del periodo de secado constante hizo más difícil encontrar una ecuación con un  $r^2$  aceptable para poder trabajar; en el caso de la curva de fosfato el  $r^2$  es equivalente a 0,9938 mientras que en la curva de enfrió se tiene un valor de 0,9707. Estos valores se pueden verificar en las Figuras II.1 y II.2 del ANEXO II para el lodo de fosfato y enfrió, respectivamente.

### 3.1.5 DETERMINACIÓN DE DENSIDAD

La determinación de la densidad presente en los lodos se realizó por triplicado mediante la norma ASTM D854-10 cuyos resultados y se presentan en la Tabla 3.4.

**Tabla 3. 4** Densidad de lodos de fosfato y enfrió

Lodo	Densidad (g/cm <sup>3</sup> a 20°C)	Densidad media (g/cm <sup>3</sup> a 20°C)
Fosfato	1,66	1,64
	1,64	
	1,62	
Enfrió	1,57	1,58
	1,54	
	1,56	

Los resultados obtenidos permiten evidenciar que el lodo de fosfato es más denso con un valor de 1,64 g/ cm<sup>3</sup> comparado con el de enfrió cuya densidad es igual a 1,56 g/ cm<sup>3</sup> a 20 °C.

Los lodos de fosfato están compuestos en su mayoría por fosfato de zinc cuya densidad se estima en 3,99 g/cm<sup>3</sup> a temperatura ambiente mientras que la composición aproximada de los lodos de enfrió es calcita magnesiana ((CaMg)CO<sub>3</sub>) en un 46%, calcita (CaCO<sub>3</sub>) en un 30% y hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) en un 10%, cuyas densidades oscila entre los 2,1 y 2,7 g/cm<sup>3</sup>. La composición aproximada de los lodos se obtuvo a partir de un ensayo de Difracción de rayos X

realizado a los lodos en el Departamento de Metalurgia Extractiva de la Escuela Politécnica Nacional. Como se evidencia, el componente mayoritario del lodo de fosfato es más denso que los componentes del lodo de enfriamiento; lo cual explicaría la diferencia entre los valores reportados para los residuos. Estos resultados se utilizarán posteriormente para el dimensionamiento de la planta de tratamiento de desechos sólidos.

### 3.1.6 DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS EN LOS LIXIVIADOS DE LOS LODOS PROVENIENTES DEL PROCESO DE FOSFATADO Y ENFRÍO

La determinación de la concentración de metales pesados en los lixiviados de los lodos provenientes de los procesos de fosfatado y enfriamiento se realizó con la finalidad de comparar los resultados con los valores máximos permisibles establecidos en la norma técnica de la Ordenanza 404. En la Tabla 3.5 se muestra los resultados obtenidos en el análisis TCLP, así como la comparación con el valor máximo permisible establecido en la Norma Técnica de la Ordenanza 404.

**Tabla 3. 5** Resultados de concentración de metales en lixiviado de lodos de fosfatado y enfriamiento y comparación con la norma técnica de la Ordenanza 404

Contaminante	Concentración en Lixiviados (mg/L)		Nivel máximo permisible Ordenanza 404 (mg/L)		Cumple Norma
	Lodos Fosfato	Lodos Enfriamiento	Lixiviados	Descargas líquidas a cauce de agua	
Zinc	2500,000	5,500	NA	2,0	No
Plomo	<0,900	294,000	5,0	0,5	No
Níquel	20,780	<0,150	NA	2,0	No
Arsénico	0,002	0,001	5,0	0,1	Sí
Bario	<0,300	16,602	100,0	NA	Sí
Cadmio	0,050	<0,770	1,0	0,02	Sí
Cromo	<0,500	<0,500	5,0	1,0	Sí
Mercurio	<0,005	<0,005	0,2	NA	Sí
Plata	<0,025	<0,025	5,0	5,0	Sí
Selenio	<0,0001	<0,0001	1,0	NA	Sí



El lodo proveniente del proceso de enfriamiento incumple en la concentración de plomo según la especificación establecida en la Norma Técnica de Residuos Peligrosos de la Ordenanza 404. El valor reportado por el ensayo, 294 mg/L, excede en 58,8 veces el máximo valor permisible establecido 5,0 mg/L lo cual implica que el residuo debe ser tratado para disminuir sus niveles de toxicidad antes de ser desechado directamente en un relleno sanitario. Así también, el lodo contiene un nivel elevado de zinc (5,5 mg/L) cuyo nivel máximo permisible no está regulado por la mencionada norma. Debido a este vacío legal, se tomó como referencia el valor máximo permisible para descargas líquidas a cauce de agua (2 mg/L), especificado en la norma técnica respectiva de la Ordenanza 404. Bajo esta consideración, el lodo también incumple con la concentración de zinc en lixiviados.

El alto contenido de plomo en los lixiviados de los lodos de enfriamiento (294 mg/L) es consecuencia directa del proceso del cual provienen; estos lodos son el producto de la filtración de los lodos sedimentados del tratamiento de agua de enfriamiento que posee concentraciones elevadas de hierro y plomo, arrastrados por el alambre del proceso de recocido.

El contenido de zinc (5,5 mg/L) en los lixiviados del lodo de enfriamiento es una consecuencia del reproceso eventual del producto final (alambre galvanizado) cuando no cumple con los estándares de calidad establecidos. Este reproceso acarrea una transferencia de zinc a la piscina de plomo que, aunque no tiene influencia en el proceso de recocido, se ve reflejado en la composición de los lodos de enfriamiento. Esta piscina de plomo fundido se purga cada 10 años aproximadamente, tiempo en el cual solo se repone de forma paulatina el plomo perdido durante la producción de alambre galvanizado sin remover el contenido de la misma.

El lodo proveniente del proceso de fosfatado incumple en la concentración de zinc y níquel según la especificación establecida en la Norma Técnica de Descargas Líquidas a Cauce de Agua de la Ordenanza 404. El valor reportado por el ensayo, 2 500 mg/L para zinc y 20,78 mg/L para níquel, excede en 2 750 veces y en un

2000% el máximo valor permisible establecido en la norma, 2 mg/L para cada metal.

El alto contenido de zinc en los lodos de fosfato se debe a la naturaleza del proceso del cual provienen ya que son el producto de la precipitación de las sales terciarias de fosfato de zinc. El níquel, que se encuentra en menor concentración y es producto de los componentes de baño de fosfatado que también contienen níquel en la formulación según se especificó en la sección 1.1.3.3.

Los valores de arsénico, bario, cadmio, cromo, mercurio, plata y selenio no exceden los límites máximos permisibles especificados en la Norma Técnica de Residuos Peligrosos de la Ordenanza 404. Esto se explica porque no existe ninguna fuente de los metales mencionados en el proceso de galvanizado por inmersión en caliente de alambre, tal como se detalla en la sección 1.1. Es más, para el caso del cromo, cadmio, mercurio, plata y selenio; la concentración de metales en el lixiviado es inferior al mínimo nivel de detección del equipo.

Como caso particular, existe una concentración ligeramente superior de bario en el lodo de enfriamiento (16,60 mg/L) si se compara este resultado con el resto de metales pesados cuyo nivel es inferior al límite máximo permisible; no obstante aún con ese nivel de bario, el valor no excede la norma. La fuente de bario puede ser el resultado de la composición del acero con el que se fabrican los alambres para galvanizar.

## **3.2 EVALUACIÓN DEL PROCESO DE ENCAPSULADO DE LODOS UTILIZANDO CEMENTO**

### **3.2.1 CONCENTRACIÓN EN LIXIVIADOS DE ZINC, PLOMO Y NIQUEL**

Las Tablas 3.6, 3.7 y 3.8 muestran las diferentes concentraciones de zinc, plomo y níquel obtenidas por réplica para cada composición lodo:mortero (L/M) y lodo:hormigón (L/H) contemplada en el diseño experimental.

**Tabla 3. 6** Concentraciones de zinc en función de la composición lodo: mortero (L:M) y lodo:hormigón (L:H)

Composición en peso lodo:encapsulante (%)		Concentración de zinc en lixiviado (mg/L)		
		# de réplica		
		1	2	3
30	L:M	<1,50	<1,50	<1,50
	L:H	<1,50	<1,50	<1,50
40	L:M	<1,50	<1,50	<1,50
	L:H	<1,50	6,00	<1,50
50	L:M	<1,50	<1,50	<1,50
	L:H	<1,50	<1,50	<1,50
60	L:M	<1,50	<1,50	<1,50
	L:H	1,74	2,07	1,35
75	L:M	<1,5	<1,5	<1,50
	L:M	4,30	5,94	2,93
90	L:M	4,36	3,93	5,17
	L:H	4,37	5,87	3,95

Cómo se observa, para las composiciones lodo:mortero preparadas con 30%, 40% y 50% de lodo, las concentraciones de zinc, plomo y níquel correspondientes se encuentran en su mayoría por debajo del mínimo nivel de detección del equipo; es decir, concentraciones inferiores a 1,5 mg/L para el zinc, 0,9 mg/L para plomo y 0,15 mg/L para el níquel. Por lo tanto, no se puede obtener un valor puntual de la concentración de zinc, plomo y níquel en los lixiviados bajo estas condiciones; sin embargo, para los tratamientos que contienen 60%, 75% y 90% de lodo, se reporta concentraciones puntuales (mayores a los límites señalados) de estos metales en los lixiviados, especialmente para el plomo y el níquel.

En cuanto al hormigón, las Tablas 3.6, 3.7 y 3.8 permiten observar que igualmente existen valores de concentración de zinc, plomo y níquel que están por debajo del mínimo nivel de detección del equipo para las mezclas que tienen menor cantidad de lodo en su composición, 30%, 40% y 50%; sin embargo, para un mismo tratamiento, a diferencia del mortero, se reportan tanto datos puntuales como valores que están por debajo del límite mínimo de detección del equipo. Esto implica que hay una mayor concentración en los lixiviados.

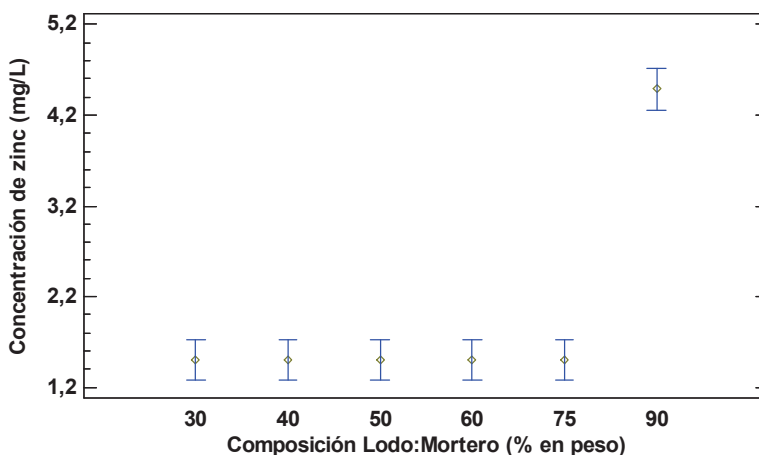
**Tabla 3. 7** Concentraciones de plomo en función de la composición lodo: mortero (L:M) y lodo:hormigón (L:H)

Composición en peso lodo:encapsulante (%)		Concentración de plomo en lixiviado (mg/L)		
		# de réplica		
		1	2	3
30	L:M	<0,90	<0,90	<0,90
	L:H	<0,90	<0,90	<0,90
40	L:M	<0,90	<0,90	<0,90
	L:H	0,93	0,98	0,90
50	L:M	<0,90	<0,90	<0,90
	L:H	<0,90	0,97	<0,90
60	L:M	<0,90	<0,90	<0,90
	L:H	<0,90	<0,90	<0,90
75	L:M	3,90	5,40	6,90
	L:H	2,44	3,89	1,54
90	L:M	7,65	9,59	5,34
	L:H	3,32	5,91	2,74

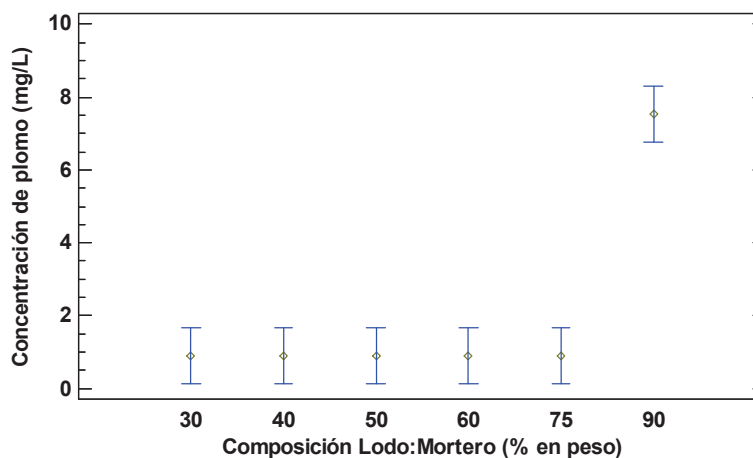
**Tabla 3. 8** Concentraciones de níquel en función de la composición lodo: mortero (L:M) y lodo:hormigón (L:H)

Composición en peso lodo:encapsulante (%)		Concentración de zinc en lixiviado (mg/L)		
		# de réplica		
		1	2	3
30	L:M	<0,15	<0,15	0,17
	L:H	0,153	<0,15	0,17
40	L:M	<0,15	<0,15	0,15
	L:H	<0,15	<0,15	0,152
50	L:M	<0,15	<0,15	<0,15
	L:H	<0,15	0,17	<0,15
60	L:M	<0,15	0,17	0,15
	L:H	0,29	0,32	0,49
75	L:M	0,26	0,24	0,30
	L:M	0,54	0,58	0,31
90	L:M	0,53	0,73	0,39
	L:H	0,71	0,82	0,57

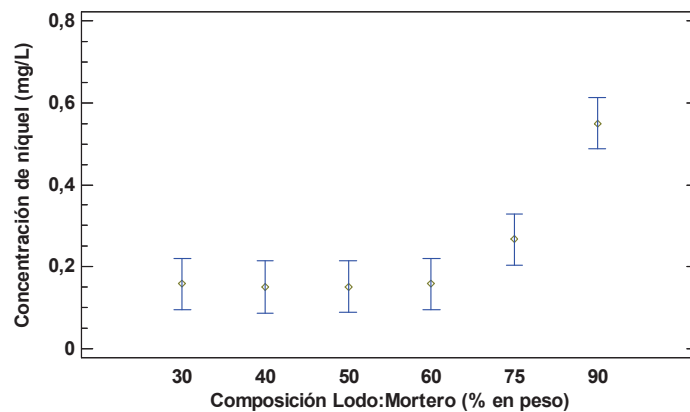
A pesar de las limitaciones que se presentaron por la sensibilidad del equipo, los datos que se obtuvieron para las composiciones de 60%, 75% y 90% permiten aseverar que la relación en peso lodo:encapsulante influye de una manera estadísticamente significativa en la concentración de zinc, plomo y níquel presente en los lixiviados del residuo sólido, como se aprecia en las Figuras 3.5, 3. 6 y 3. 7 para el caso de mortero y 3.8, 3.9 y 3.10 para el hormigón.



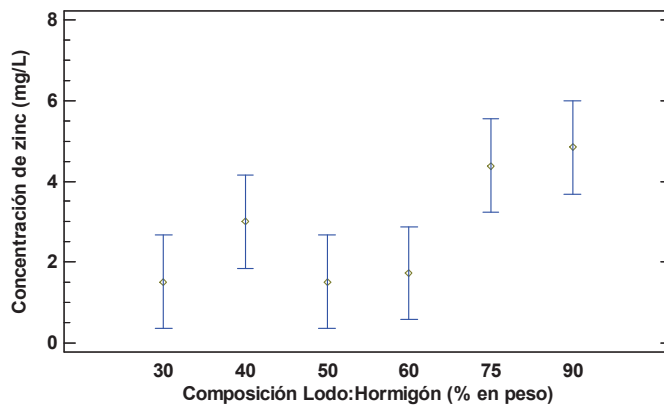
**Figura 3. 5** Concentración de zinc presente en los lixiviados (mg/L) en función de la composición lodo:mortero (L:M)



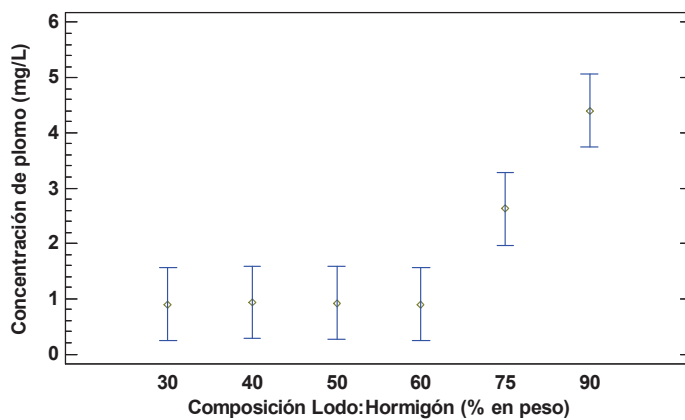
**Figura 3. 6** Concentración de plomo presente en los lixiviados (mg/L) en función de la composición lodo:mortero (L:M)



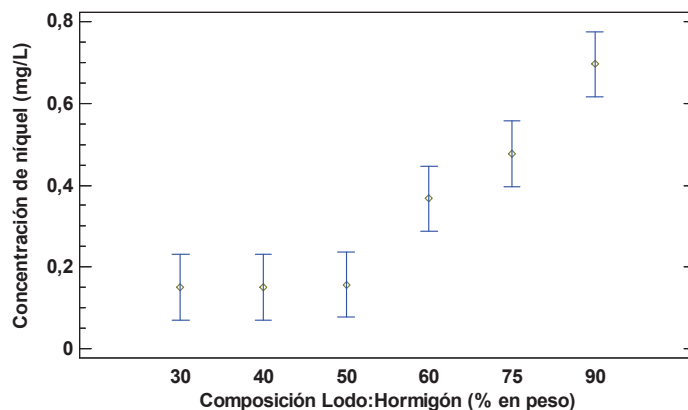
**Figura 3. 7** Concentración de níquel presente en los lixiviados (mg/L) en función de la composición lodo:mortero (L:M)



**Figura 3. 8** Concentración de zinc presente en lixiviados (mg/L) en función de la composición lodo:hormigón (L:H)



**Figura 3. 9** Concentración de plomo presente en lixiviados (mg/L) en función de la composición lodo:hormigón (L:H)



**Figura 3. 10** Concentración de níquel presente en lixiviados (mg/L) en función de la composición lodo:hormigón (L:H)

Para todos los casos, a medida que se incrementa la cantidad de lodo en el proceso de estabilización, la concentración de metales que se detectan en los lixiviados es mayor. Este comportamiento es común para los tres metales analizados donde se evidencia un aumento progresivo del porcentaje de zinc, plomo y níquel a partir del tratamiento donde se tiene un 60% de lodo y un 40% de encapsulante. Esto implica que la tendencia observada es independiente del encapsulante utilizado y/o de la presencia de aglomerado en el mismo. Por otro lado, para las composiciones que están en el rango de 30 % a 50 % de lodo, no se puede establecer una tendencia ya que los resultados están limitados por la sensibilidad del equipo.

Existe una particularidad en la Figura 3.8 donde se observa que la concentración de zinc media correspondiente a la relación lodo:hormigón de 40% es superior a las mezclas con menor contenido de hormigón (50% y 60% de lodo). El incremento de esta media es causado por un valor atípico de concentración de zinc reportado en una de las réplicas (6 mg/L) que difiere por 4 veces del valor promedio para ese tratamiento.

Este resultado, que se puede verificar en la Tabla 3.1, solo se explica con una posible contaminación en el análisis de esa réplica en particular, ya que no existe justificación teórica para que se haya reportado una mayor concentración de zinc en una muestra encapsulada con mayor contenido de hormigón.

De manera global, los resultados reportados tanto para mortero como para hormigón, permiten corroborar la acción encapsulante del cemento para los metales pesados. En el presente estudio, se logra disminuir la concentración de zinc en lixiviados desde 2500 mg/L hasta una media de 4,39 mg/L y 4,73 mg/L para una relación en peso de 75% y 90% lodo:mortero; tomando como ejemplo el peor de los casos reportado. Para las concentraciones de 30% a 50% lodo:mortero se obtiene los mejores resultados esperados lográndose una disminución de la concentración de zinc en lixiviados hasta valores inferiores a 1,5 mg/L.

En el caso del plomo, en el peor de los escenarios, se consigue una disminución desde 294 mg/L hasta 7,52 mg/L con una relación de 90% lodo:mortero. Para las concentraciones de 30%, 40%, 50%, 60% y 75% lodo:mortero se observa una mayor reducción de la concentración en lixiviados obteniéndose valores inferiores a 0,9 mg/L.

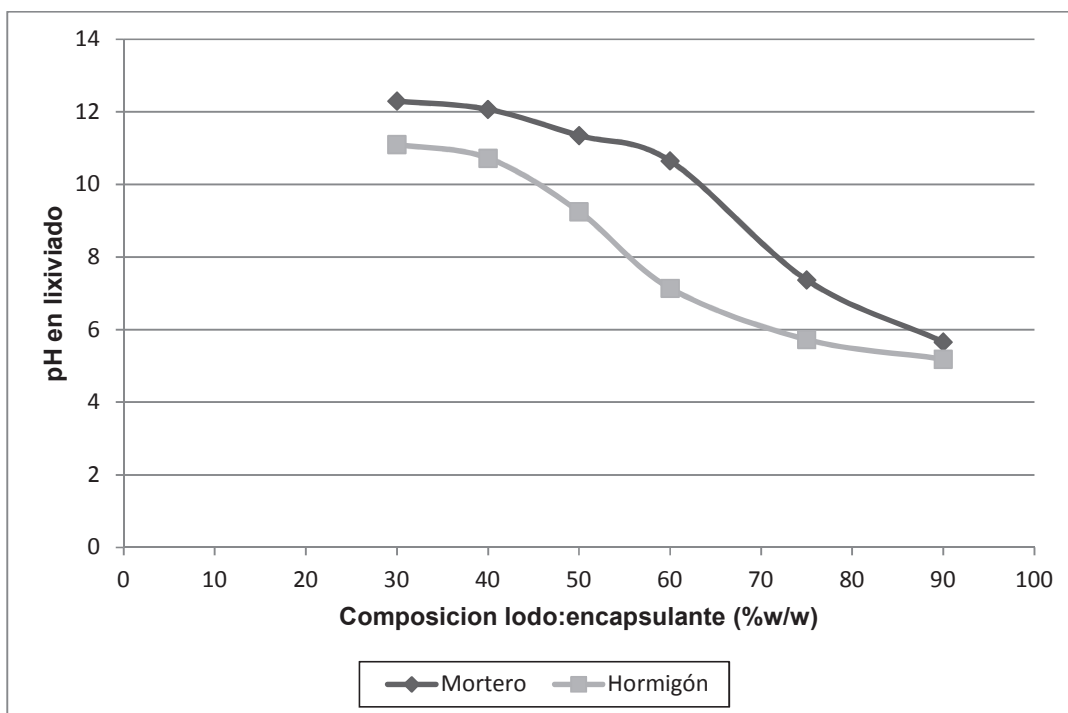
La cantidad de níquel en el extracto TCLP disminuye desde 20,78 mg/L, reportados para el lodo contaminado sin encapsular, hasta 0,82 mg/L cuando la relación en peso lodo encapsulante corresponde al 90%. Las mejores condiciones se presentan para las relaciones en peso de 30%, 40%, 50% y 60% donde la concentración de níquel oscila entre los 0,15 mg/L y 0,17 mg/L.

Los resultados obtenidos demuestran una relación de dependencia entre la cantidad de cemento presente en el residuo estabilizado y el grado de lixiviación de los contaminantes. Esto se explica al considerar la forma de los precipitados de cada metal y la solubilidad de los mismos en función del pH. En la Figura 3.11 se observa el pH medio del lixiviado obtenido en función de la composición lodo:encapsulante. Se evidencia que el pH del lixiviado aumenta mientras mayor sea la cantidad de cemento en la mezcla después de ser sometido al ensayo TCLP.

Cómo se observa, la media de pH del extracto TCLP es equivalente a 5,66 cuando se trabajó con 90% de relación en peso lodo: mortero y es igual a 5,19



para la misma relación, si se trabaja con hormigón. A medida que se incrementa la cantidad de lodo en la mezcla, el pH incrementa. Así pues, al trabajar con 60% de relación en peso lodo: encapsulante se tiene un pH de 10,65 en el caso del mortero y 10,25 en el caso del hormigón. Finalmente, para el tratamiento correspondiente a 30% lodo: encapsulante, se tiene un pH cercano a 12,5 para ambos encapsulantes.



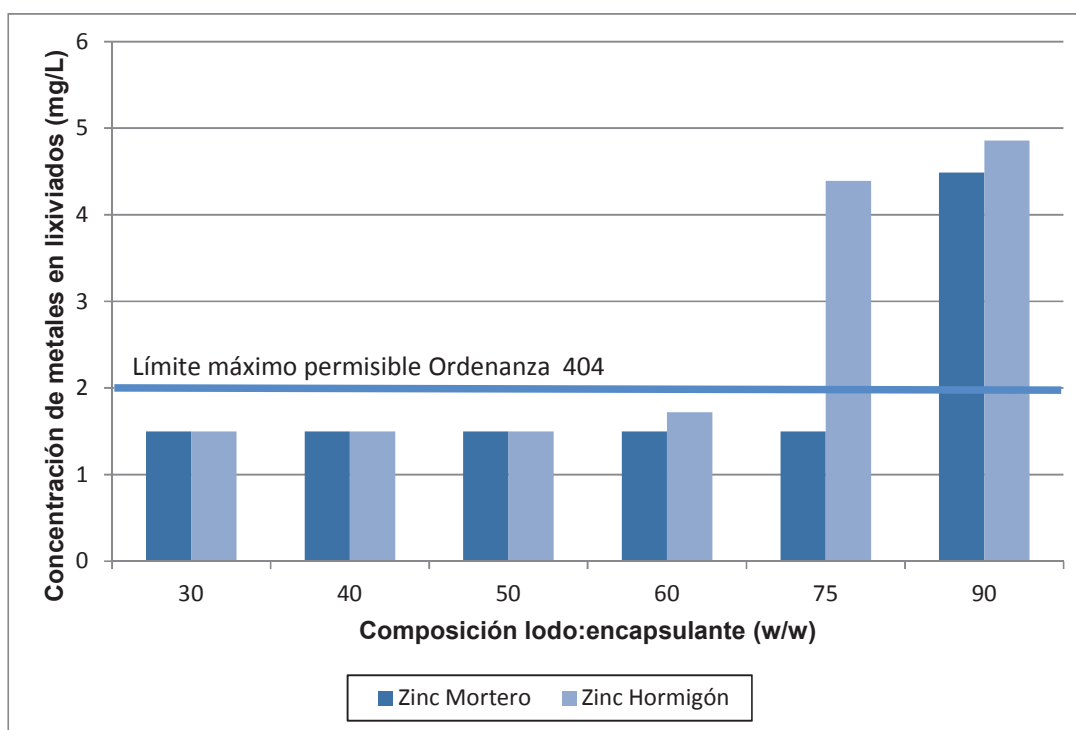
**Figura 3. 11** pH medio del lixiviado en función de la composición lodo : encapsulante

Hale, Evans y Lambert (2011) afirman que, a medida que se alcanza un pH más alcalino, el zinc, plomo y níquel precipitan en forma de hidróxidos y se vuelven menos solubles. (p. 124) Las composiciones en peso lodo: encapsulante que oscilan entre el 30% y 60% cumplen esta condición; por esta razón, son las que reportan menores concentraciones en lixiviados según las Figuras 3.5, 3.6, 3.7, 3.8, 3.9 y 3.10.

El incremento de pH se explica al considerar que el cemento alcanza un pH alcalino aproximado de 12,5 cuando está en fase de hidratación. Los lodos

contaminados poseen un pH igual a 2,57 y 7,68 para el lodo de fosfato y enfriamiento, respectivamente. Mientras mayor es el contenido de cemento, más alcalino se vuelve el extracto TCLP o lixiviado.

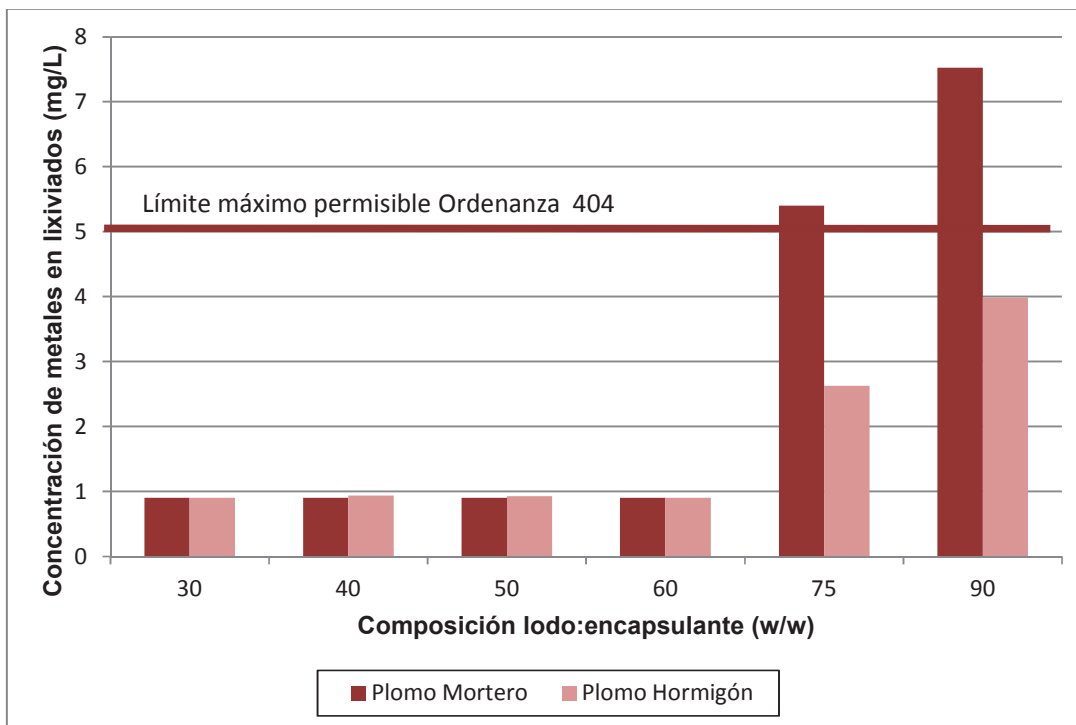
Las Figuras 3.12, 3.13 y 3.14 permiten establecer una comparación entre las medias de las concentraciones de zinc, plomo y níquel obtenidas para cada una de las composiciones lodo:encapsulante utilizadas y el nivel máximo de concentración aceptable especificado en la Norma Técnica de la Ordenanza 404 para cada uno de los metales. La Figura 3.12 permite visualizar que cuando se utilizó mortero como encapsulante, la concentración de zinc en el lixiviado está por debajo del límite normado (2,00 mg/L) para el todo el rango de experimentación con excepción del tratamiento que contiene 90% de lodo, donde se reportó una media de concentración igual a 4,49 mg/L de zinc.



**Figura 3. 12** Concentración de zinc en lixiviados en función de la relación en peso lodo mortero y lodo hormigón

En el caso del hormigón, la tendencia es la misma, la norma se cumple para los tratamientos que contienen 30%, 40%, 50% y 60% de lodo. A medida que se incrementó la cantidad de lodo contaminado en el residuo encapsulado, también lo hizo la concentración de zinc en el lixiviado. Para 75% y 90% de lodo, la concentración asciende a una media de 4,39 mg/L y 4,86 mg/L, respectivamente.

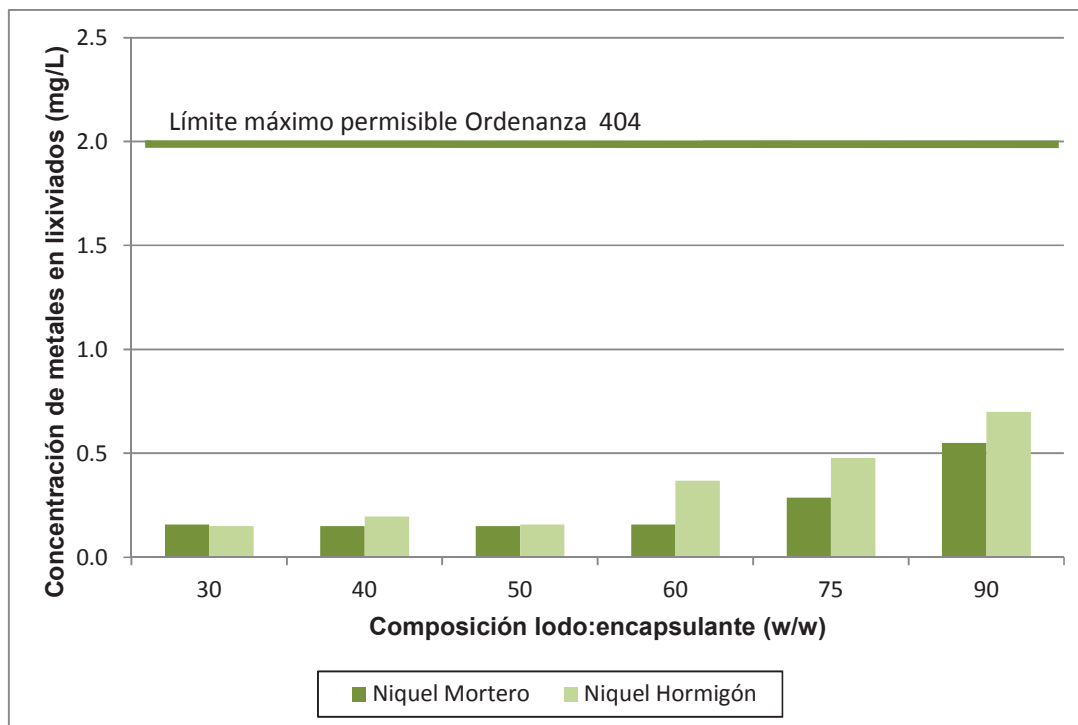
La concentración de plomo por su parte, que se puede visualizar en la Figura 3.13., se encuentra bajo el máximo nivel permisible (5 mg/L) para los tratamientos que contienen 30%, 40%, 50% y 60% de relación en peso lodo:mortero. Para 75% y 90% de lodo, la concentración asciende a una media de 5,40 mg/L y 7,53 mg/L, respectivamente, valores superiores a los 5,00 mg/L especificados en la norma.



**Figura 3. 13** Concentración de plomo en lixiviados en función de la relación en peso lodo mortero y lodo hormigón

A diferencia del mortero, cuando se considera las mezclas con hormigón, la concentración de plomo se encuentra bajo el máximo nivel permisible (5,00 mg/L) para todo el rango de experimentación, el valor más alto de concentración en

lixiviados que se reporta para este metal corresponde a 3,99 mg/L al mezclar 90% de lodo con 10% de hormigón.



**Figura 3. 14** Concentración de níquel en lixiviados en función de la relación en peso lodo mortero y lodo hormigón

De manera complementaria, las Figuras 3.12, 3.13 y 3.14 permiten observar que, para el rango de composiciones lodo:encapsulante que oscilan entre 60 y 90% de contenido de lodo, el plomo es el contaminante que se encuentra en mayor concentración para un mismo tratamiento, seguido de zinc y por último de níquel.

Esta tendencia no guarda relación lógica con los resultados de la caracterización inicial de los lixiviados de los lodos contaminados sin encapsular (sección 3.1.6) donde se evidenció que la carga de zinc es proporcionada por los dos lodos, fosfato (2 500 mg/L) y enfrío (5,5 mg/L) superando 8 veces la concentración de plomo en lixiviados (294 mg/L). Sin embargo, también se evidencia que una vez que se ha encapsulado el residuo, esta diferencia se invierte y disminuye radicalmente ya que la concentración de plomo supera solo por 2 veces la de zinc.

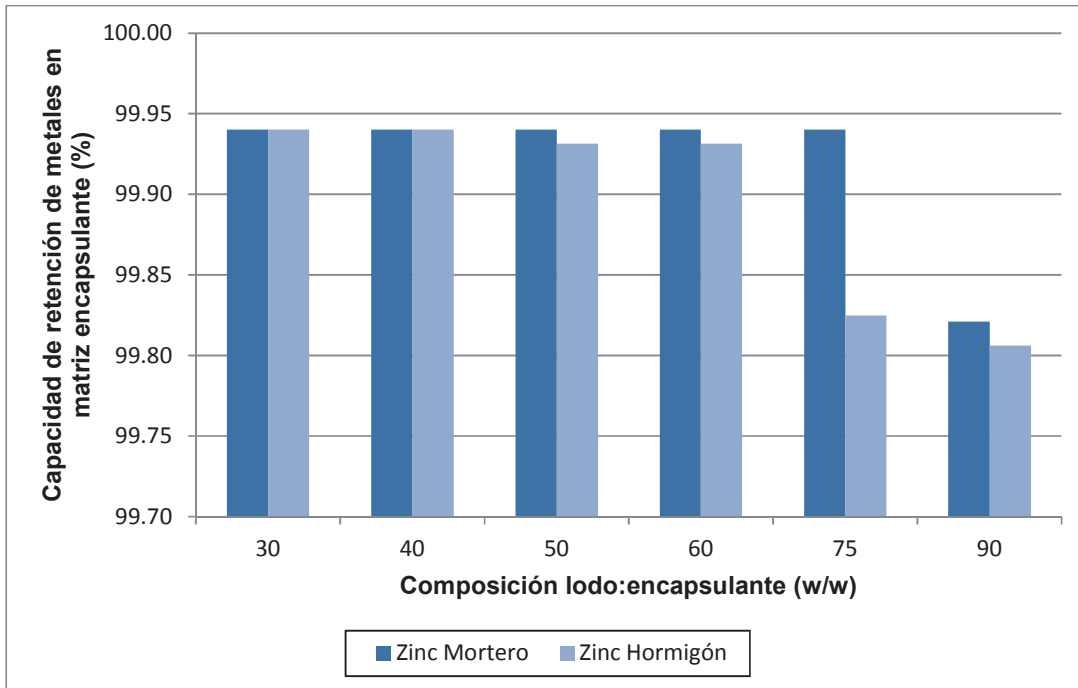
Este comportamiento implica que existe una mejor captación del zinc por parte del cemento comparada con la retención del plomo. El zinc se retiene como smithsonita a pH comprendidos entre 4,5 y 6,0 y como zincita a pH de 7,5 a 12,5. Por su parte, el plomo precipita como carbonato (cerrusita) a pH comprendidos entre 4,6 y 7,1 y como cloropiromorfita  $Pb(PO)Cl$  a pH de 4,2 a 7,9

En otras palabras, el zinc tiene la capacidad de precipitar solo como carbonato a pH más ácidos utilizando como fuente el carbonato de calcio presente en su mayoría en la composición neta del cemento. Al aprovechar este compuesto, el zinc se fija con facilidad en la matriz. El plomo, al tender a precipitar primero como cloropiromorfita a pH de 4,2, no tiene fuente suficiente de cloro para retenerse de mejor manera en la matriz.

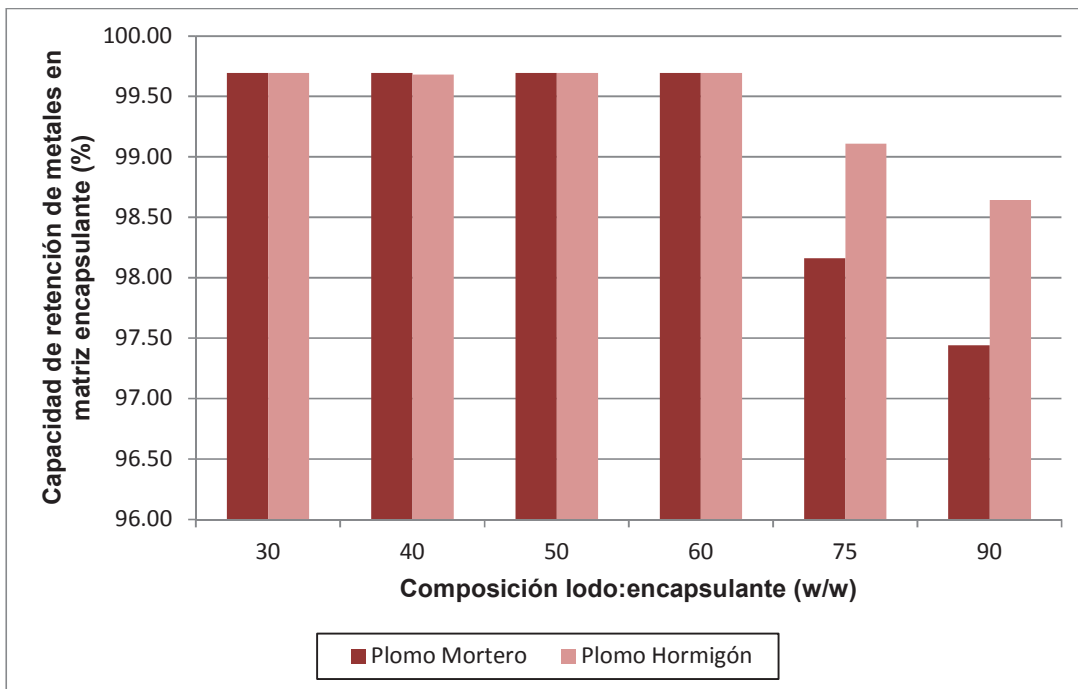
Estudios similares de procesos de estabilización/solidificación de lodos con metales pesados utilizando cemento han sido realizados por diversos autores. Para poder realizar una comparación, se analizó el porcentaje de retención de los metales en la matriz encapsulante después de que las muestras han sido sometidas al TCLP en función de la relación en peso lodo:encapsulante. Estos resultados se pueden visualizar en las Figuras 3.15 para el zinc, 3.16 en el caso del plomo y 3.17 cuando se estudió el níquel.

En el presente trabajo, se evidencia que el zinc reporta un máximo de 99.94% de retención cuando se tiene una relación lodo:encapsulante de 30% (pH 12.3) y un mínimo de 99.80% cuando la cantidad de lodo en la muestra encapsulada asciende a 90% (pH 5.66).

La capacidad de retención de plomo es menor dado que se tiene una media de 99.69% para el rango de experimentación que comprende las relaciones en peso lodo:encapsulante de 30%, 40%, 50% y 60% independientemente de la presencia de aglomerado en el encapsulante. Las peores condiciones se reportan para las composiciones de 75% y 90% lodo:mortero cuyo porcentaje de retención equivale a 98,2% y 97,5%.

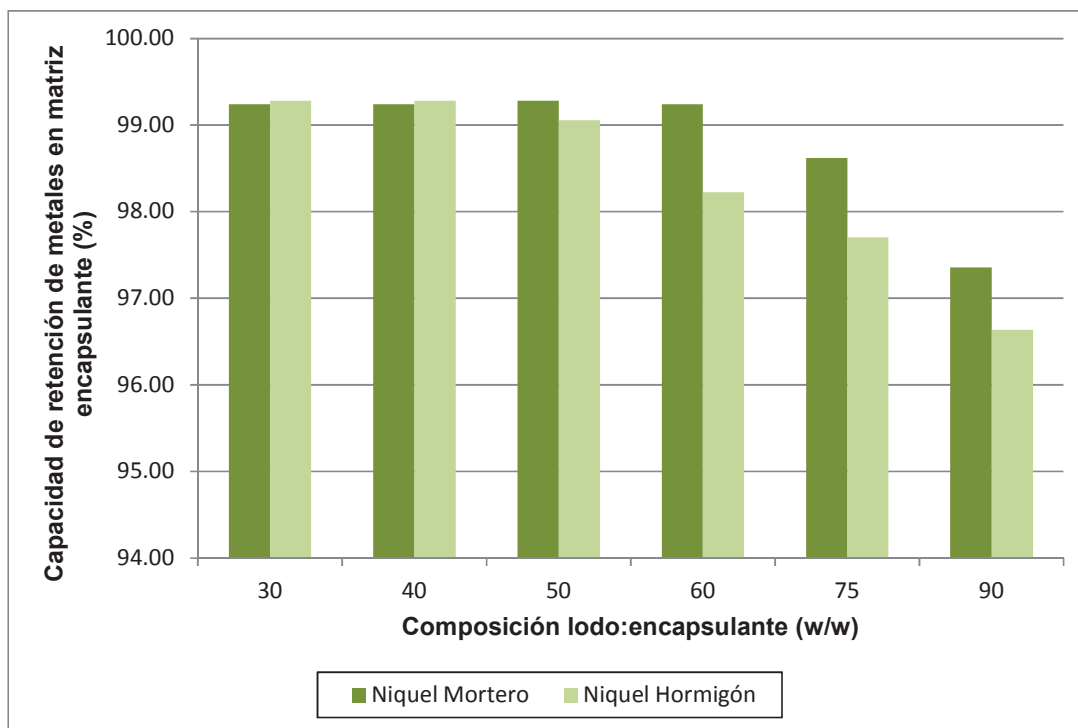


**Figura 3. 15** Capacidad de retención de zinc en matriz en función de la composición lodo:encapsulante



**Figura 3. 16** Capacidad de retención de plomo en matriz en función de la composición lodo:encapsulante

Por último, el níquel es el metal que presenta un mayor porcentaje de retención por parte del cemento; se observa que la máxima retención equivale a 99.24% cuando la relación en peso lodo: encapsulante es 30% y desciende hasta 97.35% cuando la cantidad de lodo en la mezcla alcanza el 90% lodo:hormigón. (pH 5.66).



**Figura 3. 17** Capacidad de retención de metales en matriz en función de la composición lodo:encapsulante

Los resultados mencionados coinciden con los estudios de Yilmaz, Çorça y Ünlü (2003) quienes prepararon muestras que contenían 90% y 80% de lodo para estudiar la capacidad de retención de los metales en la matriz encapsulante; encontraron que la capacidad de retención del zinc ascendía a un 98,10%, valor que difiere en 1,00 % al resultado reportado en la presente experimentación equivalente a 99,94%. Por otro lado, la máxima capacidad de retención del plomo correspondía a un 99,99%, superior al valor que resultó en el presente experimento equivalente a 99,69%. No se reportaron resultados para el níquel (p. 209).

Hale, Evans y Lambert (2011) encontraron que a un pH de lixiviado superior a 6, la capacidad de retención para el plomo y el níquel oscila entre el 99.9%; valor que es similar al obtenido en la experimentación realizada para el caso del plomo y del níquel para las relaciones en peso de 30%, 40%, 50% y 60% lodo:encapsulante que según la Figura 3.11 corresponde a pH superiores a 7. Los mismo autores afirman a su vez, que la capacidad de retención de zinc supera el 99.8% cuando el pH del lixiviado es igual a 8 después de ser sometido a TCLP, resultado que coincide con el obtenido en el presente experimento donde se obtiene una capacidad de retención de 99.94% para las relaciones en peso de 30%, 40% y 50% lodo:encapsulante que según la Figura 3.11 corresponde a pH superiores a 8 (p. 121).

### **3.2.2 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN**

Una vez que se constató la eficacia del cemento para estabilizar los metales pesados y se validó el cumplimiento del valor máximo permisible establecido en la Norma Técnica de Residuos Peligrosos y Especiales de la Ordenanza 404; se prepararon bloques correspondientes a los tratamientos de 40%, 50% y 60% de relación en peso lodo:encapsulante para ser sometidos a ensayos de resistencia a la compresión según la norma NTE INEN 1485.

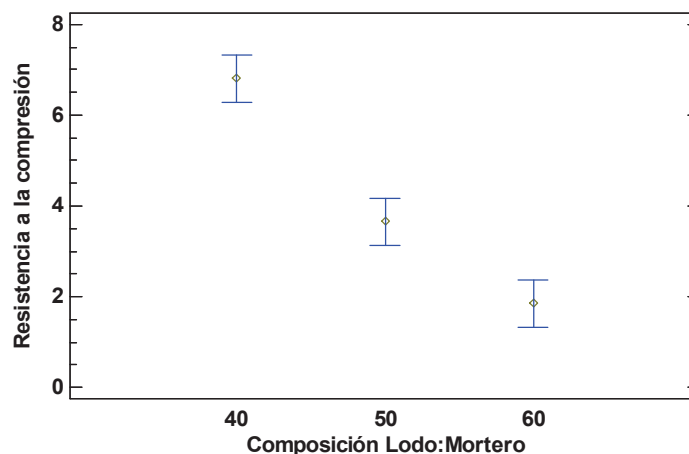
Los resultados obtenidos demuestran que la composición lodo:encapsulante influye de una manera estadísticamente significativa en la resistencia a la compresión de los bloques preparados. La Tabla 3.9 muestra los diferentes valores de resistencia a la compresión obtenidos por réplica para cada composición lodo:mortero (L/M) y lodo:hormigón (L/H) contemplados en el diseño experimental. Con base en estos datos, se construyó las Figuras 3.18 y 3.19 las cuales permiten visualizar que a medida que se incrementa la cantidad de lodo en la muestra, la resistencia a la compresión que exhibe el bloque formado disminuye.



**Tabla 3. 9** Resultados de resistencia a la compresión obtenidos por réplica para diferentes composiciones lodo:mortero (L:M) y lodo:hormigón (L:H).

Composición en peso lodo:encapsulante		Resistencia a la compresión (MPa)		
# de réplica		1	2	3
40	L:M	6,85	6,91	6,66
	L:H	5,38	4,37	4,50
50	L:M	3,50	2,91	4,54
	L:H	2,59	2,04	2,49
60	L:M	2,17	1,48	1,93
	L:H	1,69	1,12	0,95

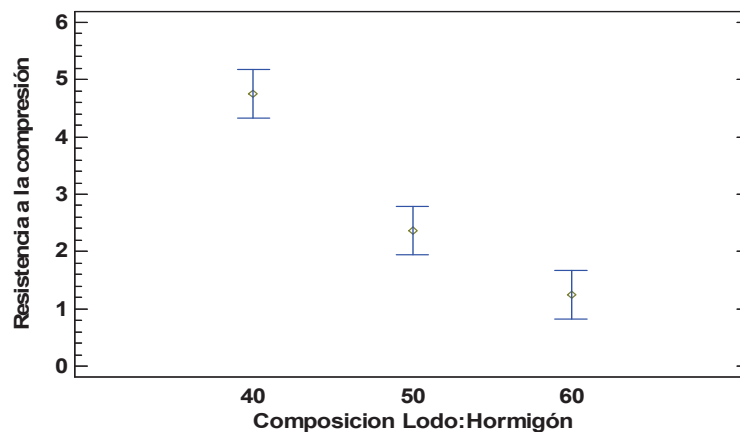
Se observa que se obtienen resistencias a la compresión que oscilan entre 4,37 y 6,91 MPa cuando se trabaja con 40% de relación en peso lodo:encapsulante; mientras que, cuando se incrementa la cantidad de lodo en la muestra, la resistencia disminuye hasta valores que oscilan entre los 2,17 y 0,95 MPa para una relación en peso de 60%.



**Figura 3. 18** Resistencia a la compresión en bloques (MPa) de diferente composición lodo:mortero

Por otro lado, se ha demostrado en estudios de estabilización, que mientras mayor sea la proporción residuo/cemento; se necesita mayor cantidad de agua para mantener la consistencia de la mezcla. Esta afirmación se pudo comprobar durante la elaboración experimental de los bloques donde la homogenización se

dificultó a medida que se incrementaba la relación lodo:encapsulante. (Malviya y Chaudhary, 2006, p. 79)



**Figura 3. 19** Resistencia a la compresión (MPa) en bloques de diferente composición lodo:hormigón

Este estudio contempló como única variable la relación en peso lodo:encapsulante para evaluar la resistencia a la compresión de los bloques. Para el efecto, se fijó la relación agua sólidos en 0,3; esto quiere decir que a medida que se incrementaba la proporción en peso lodo:encapsulante, la relación agua cemento se reducía.

El objetivo de este diseño experimental fue tratar de equilibrar la influencia del agua y del lodo en la resistencia a la compresión del bloque. No obstante, cómo se mencionó previamente, en el desarrollo experimental se presentaron dificultades en la homogenización de las mezclas con mayor cantidad de lodo, no se pudo compactar bien las muestras por lo que se observó la formación de grietas en los bloques, según se muestra en la Figura 3.20. Esta situación permite inferir que la cantidad de agua no fue suficiente para garantizar la homogenización de la mezcla.

Como conclusión, la disminución de la resistencia a la compresión en los bloques a medida que se incrementó la cantidad de lodo contaminado en los mismos, se explica por la disminución de cemento en las muestras y por la falta de agua

suficiente para una adecuada homogenización de las muestras. En estudios futuros sería recomendable variar la relación agua cemento utilizada para poder complementar la información reportada.



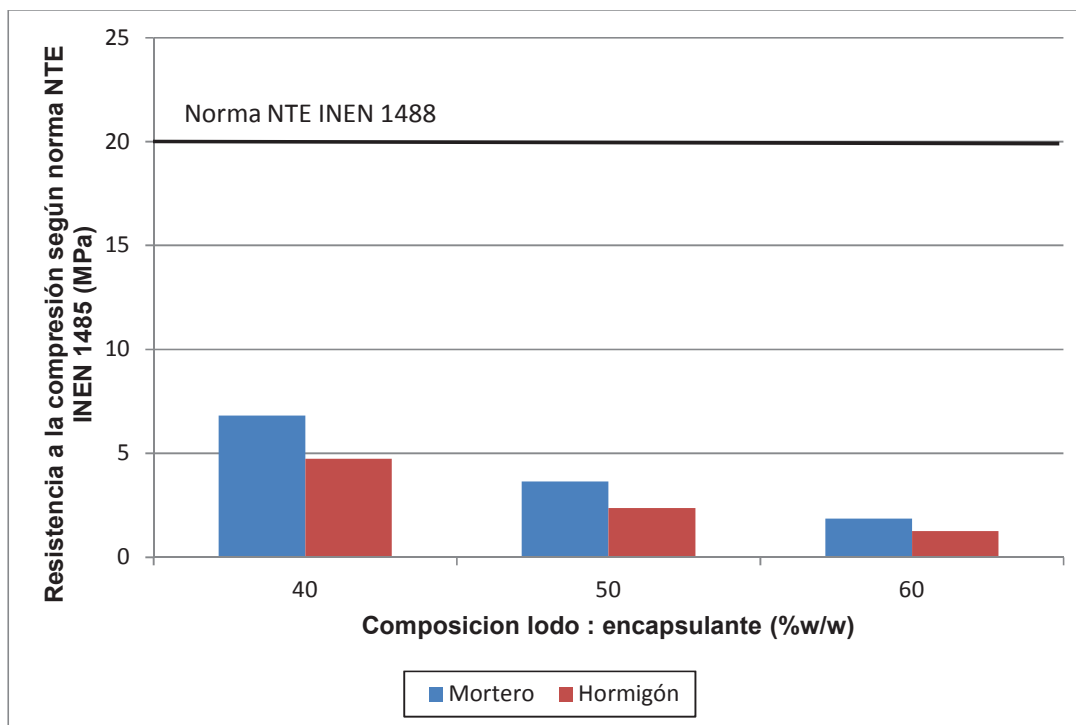
**Figura 3. 20** Grietas en bloques encapsulados.

La Figura 3.21 permite comparar el valor medio de resistencia a la compresión obtenido a los 25 días de curado (según lo especifica la norma INEN NTE 1488 Adoquines, Requisitos), en función de cada relación en peso lodo:encapsulante. Como resultado, se obtiene que los bloques elaborados con cemento sin aglomerado grueso (mortero) tienen una mayor resistencia a la compresión que aquellos formados con hormigón para una misma relación en peso lodo:encapsulante.

La muestra con una relación en peso lodo:mortero de 40% presenta una resistencia a la compresión de 6,81 MPa mientras que el bloque elaborado con la misma composición lodo:encapsulante tiene una resistencia de 4,75 MPa. La tendencia se repite en el caso de la composición 50% en la cual la resistencia a la compresión para la mezcla con mortero y con hormigón corresponde a 3,65 MPa y 2,77 MPa, respectivamente.

La resistencia a la compresión normal de un hormigón armado oscila entre los 40-50 MPa mientras que la de un mortero puede alcanzar los 30 MPa. En este

estudio se registran resistencias 10 veces menores a las nominales para un hormigón o un mortero. (INECYC, 2011, p. 1) La explicación radica nuevamente en el efecto debilitante que ejerce la adición de lodo al mortero o al hormigón.



**Figura 3. 21** Resistencia a la compresión según norma NTE INEN 1485 en función de la relación en peso lodo:encapsulante y comparación con norma NTE INEN 1488

Adicionalmente, se registra una tendencia inversa, es decir, se reportan resistencias a la compresión mayores para las mezclas elaboradas con mortero que para las correspondientes con hormigón, para una misma relación en peso lodo: encapsulante. Este comportamiento se explica por el proceso de elaboración de bloques. Este estudio fijó la cantidad de lodo a incorporar en la muestra encapsulada, como resultado, la proporción de cemento es menor para una misma relación lodo:encapsulante cuando se tiene hormigón, ya que se reemplazó por el aglomerado grueso.

Estos resultados no son correspondientes con estudios previos realizados por Gupta y Surwade (2007) quienes evaluaron la resistencia a la compresión de bloques elaborados con un 80% de lodo contaminado y un 20% de cemento. Sus

resultados reportaron un valor de 23 MPa para un bloque sometido a ensayo a los 25 días de curado. (p. 775)

Cómo se observa en la Figura 3.21, la mayor resistencia a la compresión se registra para la relación en peso lodo:mortero de 40% equivalente a 6,81 MPa, resultado 5 veces menor que el obtenido por Gupta y Surwade en su estudio con bloques de 20% de cemento.

Finalmente, los resultados de resistencia a la compresión obtenidos fueron comparados con los valores mínimos establecidos para poder utilizar el bloque como adoquín. Los resultados se evidencian en la Tabla 3.10

**Tabla 3. 10** Valores mínimos de resistencia a la compresión en adoquines por aplicación y comparación con el valor máximo obtenido

<b>Aplicación</b>	<b>Resistencia a la compresión (MPa)</b>	<b>Resistencia a la compresión máxima obtenida (MPa)</b>
Peatonal	20	6,81
Estacionamiento y calles residenciales	30	
Caminos secundarios y calles principales	40	

En el presente estudio, no se logró obtener una resistencia a la compresión suficiente para poder utilizar el bloque de residuo encapsulado como adoquín. La explicación se basa en la discusión previa acerca del efecto que tiene la agregación de lodo al cemento o al hormigón y la influencia del agua en las mezclas realizadas.

### **3.3 EVALUACIÓN DEL PROCESO DE ENCAPSULADO DE LODOS UTILIZANDO RESINA POLIÉSTER INSATURADA**

Los resultados obtenidos para evaluar la influencia de la cantidad de resina en el residuo encapsulado se presentan en la Tabla 3.11. En primera instancia, los resultados muestran que existen limitaciones por la sensibilidad del equipo para

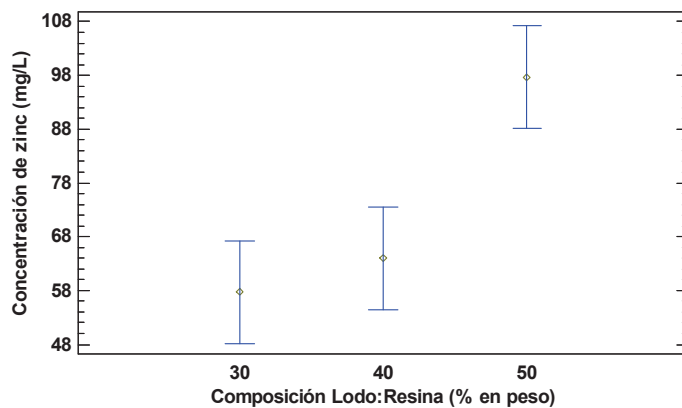
determinar la cantidad de níquel en lixiviados, ya que las concentraciones en su mayoría están por debajo del mínimo nivel de detección igual a 0,15 mg/L. Este problema no se reporta para los resultados de zinc y plomo, donde se registran valores puntuales de concentración en lixiviados.

**Tabla 3. 11** Concentración de metales pesados en función de la relación en peso lodo:resina

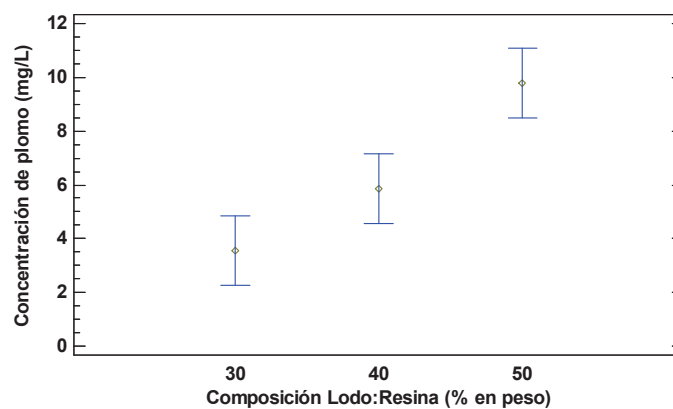
Contaminante	Número de réplica	Concentración de metales en lixiviado (mg/L)		
		30	40	50
<b>Composición lodo:resina</b>		<b>30</b>	<b>40</b>	<b>50</b>
<b>Zinc</b>	1	51,00	59,00	103,00
	2	48,00	71,00	98,00
	3	74,00	62,00	92,00
<b>Plomo</b>	1	4,03	6,91	9,25
	2	2,96	4,86	8,21
	3	3,66	5,83	11,95
<b>Níquel</b>	1	<0,15	0,30	<0,15
	2	<0,15	0,34	<0,15
	3	<0,15	<0,15	<0,15

Las Figuras 3.22, 3.23 y 3.24 muestran los resultados obtenidos a partir del análisis estadístico de las concentraciones en lixiviados de zinc, plomo y níquel, respectivamente, en función de la relación en peso lodo:resina. Como se evidencia, existe una influencia estadísticamente significativa de la variable composición lodo:resina sobre la concentración de metales pesados presentes en los lixiviados. A medida que se incrementa la cantidad de lodo en el residuo encapsulado, así también aumenta la concentración de níquel, plomo y zinc en el extracto TCLP.

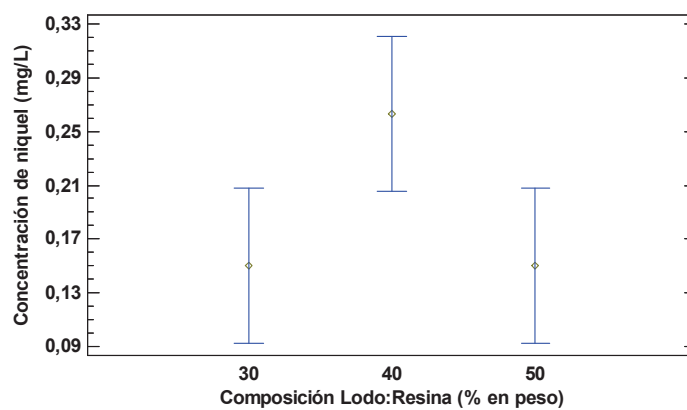
Existe un caso particular en la Figura 3.24 donde se observa que la media de concentración de níquel correspondiente a la relación lodo:resina de 50% es inferior a las mezcla de 40% donde se tiene un 10% más de resina. Esta diferencia es consecuencia de la sensibilidad del equipo. Los valores de concentración obtenidos para el níquel bordean el valor mínimo de detección en el equipo de absorción atómica.



**Figura 3. 22** Concentración de zinc presente en lixiviados (mg/L) en función de la composición lodo:resina



**Figura 3. 23** Concentración de plomo presente en lixiviados (mg/L) en función de la composición lodo:resina



**Figura 3. 24** Concentración de níquel presente en lixiviados en función de la composición lodo:resina

Los resultados obtenidos permiten validar la acción encapsulante de la resina para estabilizar metales pesados. En este estudio se logra disminuir la concentración de zinc en lixiviados desde 2 500,00 mg/L hasta 103,00 mg/L, desde 294,00 mg/L hasta 11,95 mg/L, para el caso del plomo, y desde 20,74 mg/L hasta 0,30 mg/L la cantidad de níquel en el extracto TCLP. Utilizando como ejemplo el peor de los casos presentado para cada metal.

Toda resina adquiere sus propiedades rígidas como resultado de una reacción de curado entre el monómero (éster en este caso particular) y un iniciador. La presencia de lodo en la resina retarda esta reacción debido a la interferencia que causa la adición de un componente inerte al proceso.

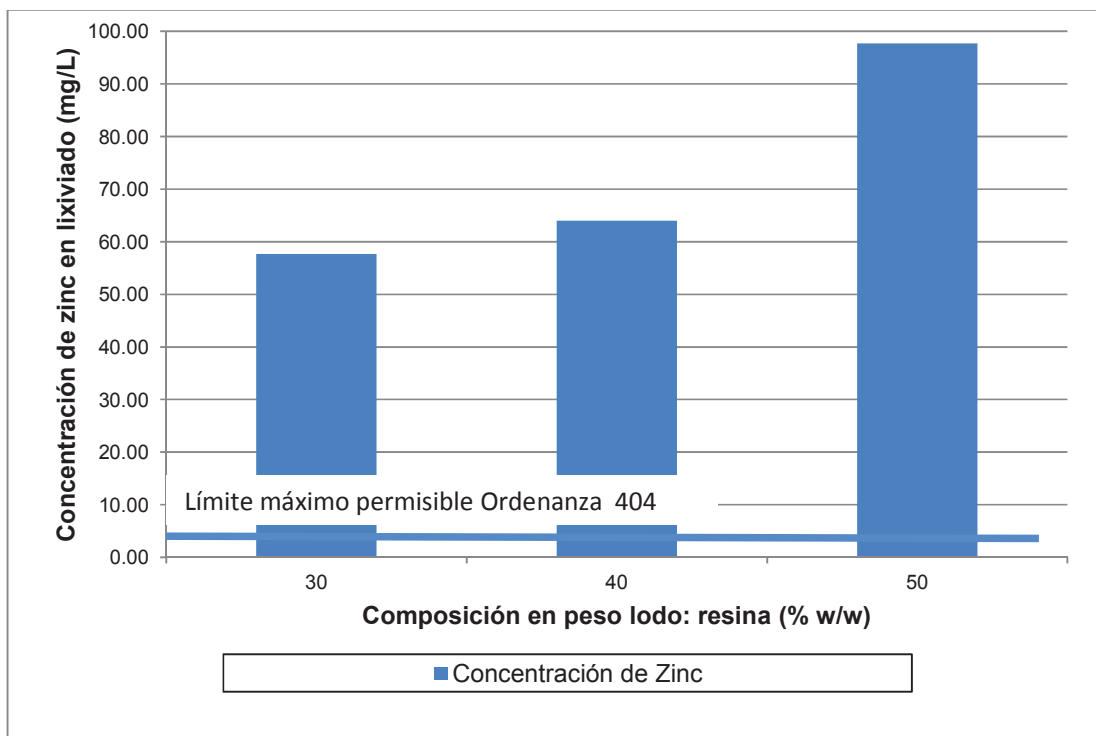
De existir una reacción entre el monómero o el agente de curado con alguno de los componentes de los lodos, no se produce la solidificación de la resina inhibiendo por completo el efecto del encapsulado. Así también, este tipo de reacciones no liberan ningún producto secundario que se pueda combinar con los metales presentes en el lodo. Como consecuencia, la naturaleza estabilizante de la resina proviene solo de la macro y la microencapsulación generadas por el estado de gel en el proceso de reacción.

Las Figuras 3.25, 3.26 y 3.27 permiten establecer una comparación entre las medias de las concentraciones de zinc, plomo y níquel obtenidas para cada una de las composiciones lodo:resina utilizadas y el nivel máximo de concentración aceptable especificado en norma técnica de la Ordenanza 404 para cada uno de los metales. Se aprecia de manera conjunta la influencia de la composición lodo:resina en la concentración de metales presente en los lixiviados. Al comparar cada una de las concentraciones medias con el valor máximo permisible regulado por la norma técnica de la Ordenanza 404, se encuentra que solo el níquel cumple con la norma para todo el rango de experimentación.

La concentración de zinc por su parte, excede la norma para todo el rango de experimentación. La menor cantidad de zinc en lixiviados se obtiene cuando se encapsula 30% de lodo con 60% de resina, cuya media es equivalente a 57,67



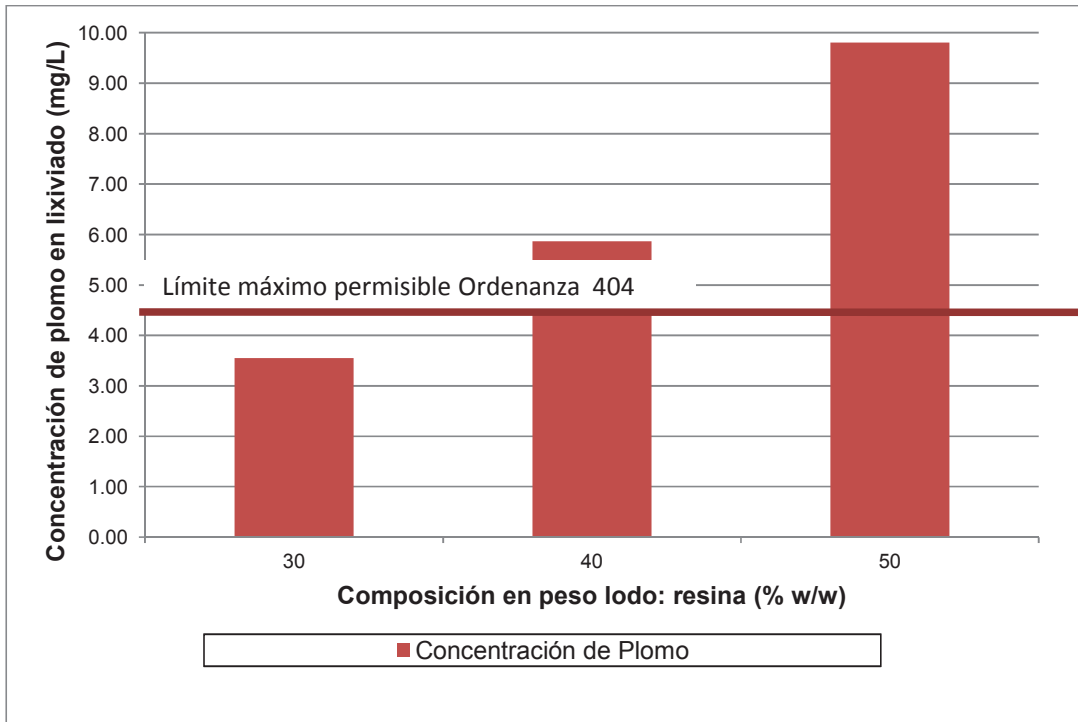
mg/L, 10 veces más que el máximo límite permitido. Para los siguientes dos tratamientos, 40% y 50% de relación en peso lodo resina, la concentración media de zinc asciende a 64 y 97,67 mg/L, respectivamente.



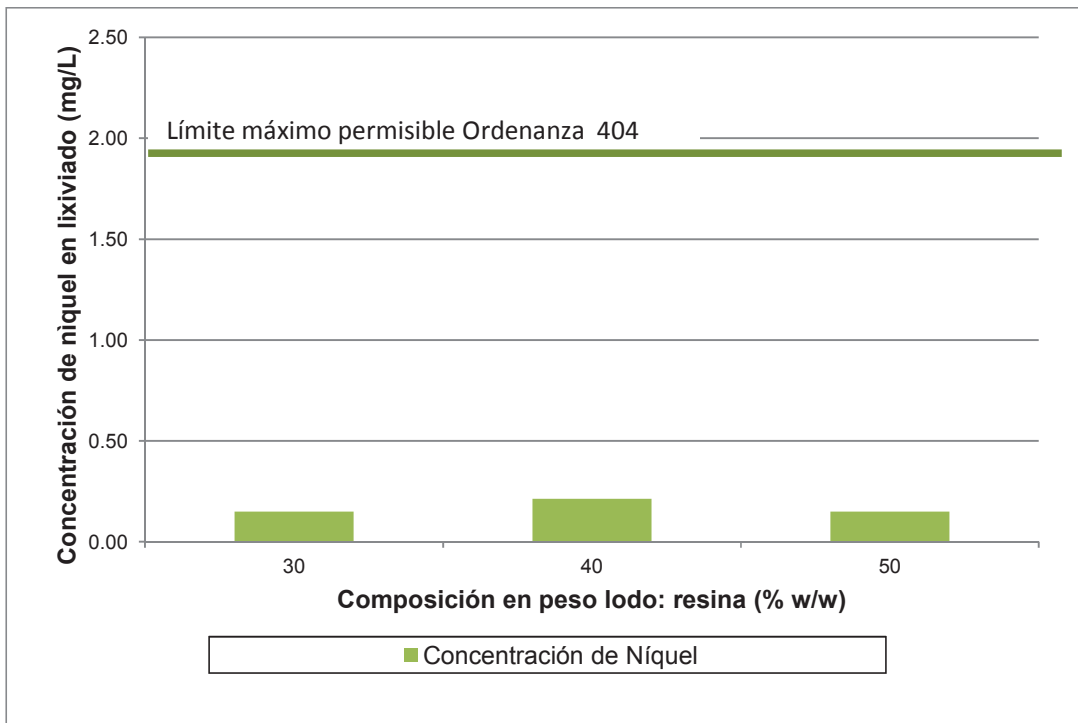
**Figura 3. 25** Concentración de zinc en lixiviados en función de relación en peso lodo:resina y comparación con Norma Técnica de la Ordenanza 404

La concentración de plomo en lixiviados logra mantenerse bajo la norma (5 mg/L) en el tratamiento correspondiente a 30% de relación en peso lodo:resina con 3,55 mg/L. A medida que se incrementa la cantidad de lodo en el residuo encapsulado, la concentración en lixiviados asciende a 5,87 y 9,89 mg/L, para los tratamientos de 40% y 50%, respectivamente.

La Figuras 3.25, 3.26 y 3.27 permiten observar que la concentración de zinc excede en casi 10 veces la de plomo en lixiviados y en casi 100 veces al níquel. Considerando que en la muestra contaminada inicial se tiene supremacía de zinc que supera en 8,5 veces la de plomo, se deduce que la resina tiene una mayor capacidad de retención de plomo con respecto al zinc.



**Figura 3. 26** Concentración de plomo en lixiviados en función de relación en peso lodo:resina y comparación con Norma Técnica de la Ordenanza 404.



**Figura 3. 27** Concentración de níquel en lixiviados en función de relación en peso lodo:resina y comparación con Norma Técnica de la Ordenanza 404.

No existe evidencia bibliográfica que soporte esta afirmación, ya que no se produce ningún tipo de reacción entre los metales y la matriz encapsulante. Una posible explicación para este comportamiento radicaría en el tamaño de partícula o aglomerado de lodo que se encapsula gracias a la resina cemento. Los resultados sugieren que los aglomerados del lodo de fostado (mayor contribuyente del zinc a los lixiviados) son más pequeños que las partículas del lodo de enfrió (mayor contribuyente de plomo en los lixiviados). El lodo de fosfato cuya densidad es mayor  $1,64 \text{ g/cm}^3$  se precipitó rápidamente durante la fase de mezcla y formó aglomerados que se debieron separar fácilmente en la molienda durante el ensayo TCLP beneficiando la migración de zinc a los lixiviados. La inferior concentración de níquel es causada principalmente por la baja cantidad inicial de este metal en los lixiviados de la muestra contaminada sin encapsular.

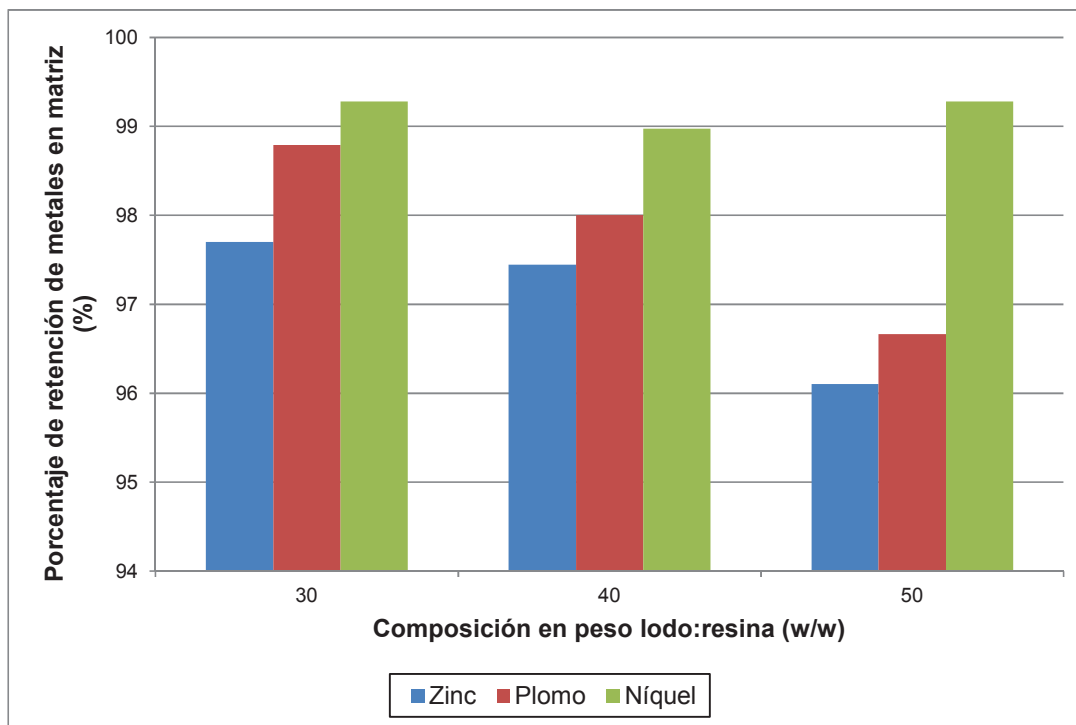
La Figura 3.28 muestra el porcentaje de retención de los metales en la matriz encapsulante después de que las muestras han sido sometidas al TCLP en función de la relación en peso lodo:resina; se evidencia que se obtuvo la mejor capacidad de retención de zinc equivalente a 97,69% para la relación en peso lodo:resina de 30%. A medida que se incrementó la cantidad de lodo en la muestra, la capacidad de retención disminuyó hasta un 96,10% para la relación de 50%.

En el caso del plomo, la capacidad de retención es mayor equivalente a 98,79% para la relación en peso 30% lodo:encapsulante mientras que la capacidad mínima se obtiene para la relación de 50% equivalente a 96,66%.

El níquel por su parte, no presenta la misma tendencia que el zinc y el plomo pero es el metal que reporta mayor capacidad de retención con una media de 99,28% para todo el rango de experimentación.

Cómo se discutió previamente esto implica que existe mejor capacidad de retención para el plomo que para el zinc; la explicación radicaría en el tamaño de aglomerados de cada uno de estos lodos. Por otro lado, la gran capacidad de

retención del níquel se explica de mejor manera por la menor cantidad de este metal en la muestra inicial contaminada.



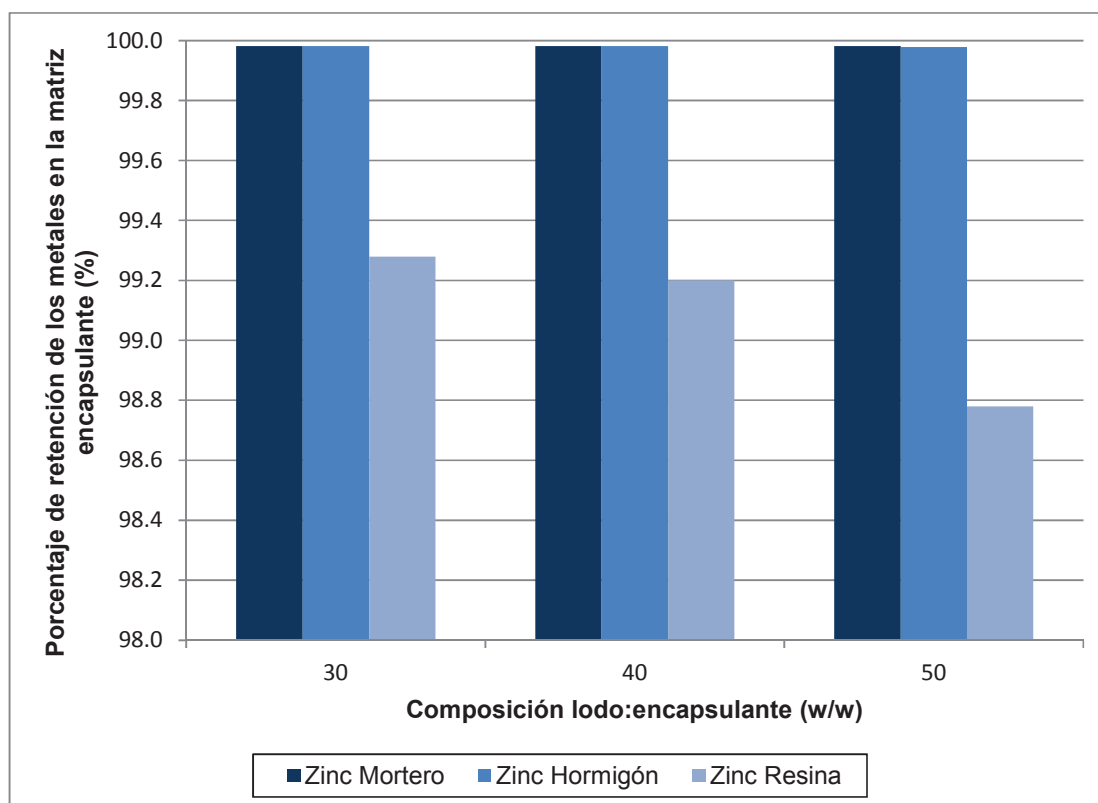
**Figura 3. 28** Porcentaje de retención de metales en matriz de resina en función de la relación en peso lodo:resina

Chattopadhyay y Condit (2002) pudieron demostrar en su estudio que se puede reducir hasta el 50% de contaminantes cuando se utiliza resina poliéster insaturada. (p.23). El presente estudio demuestra una capacidad de retención de la matriz superior al 95% para todos los metales pesados en todo el rango de experimentación con la resina; sin embargo, se desconoce la proporción en peso lodo:resina con la que trabajaron estos autores y por ende no se puede establecer una comparación definitiva. Lo que se puede afirmar es que la resina tiene propiedades encapsulantes que permiten reducir la toxicidad del residuo peligroso considerando que el rango de experimentación con el que se trabajó en este estudio tuvo como enfoque incorporar la máxima cantidad de residuo contaminado en la resina sin interferir su proceso de curado.

### 3.4 COMPARACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DEL PROCESO DE ENCAPSULADO

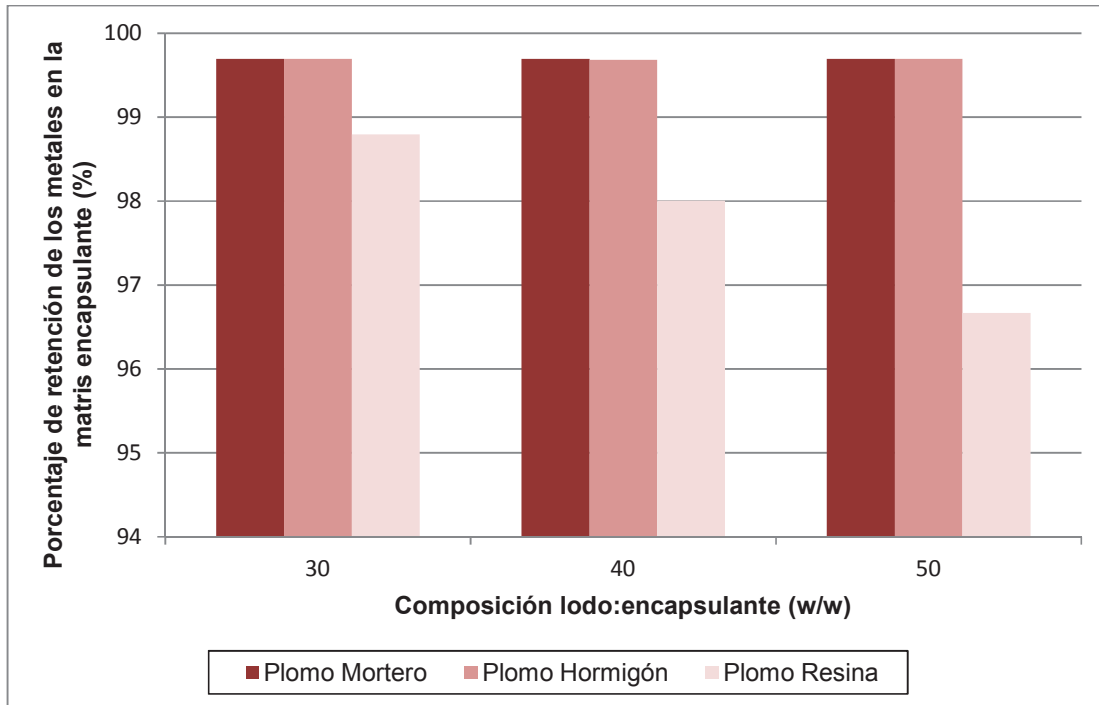
#### 3.4.1 PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DE LOS METALES PESADOS (ZINC, PLOMO Y NÍQUEL)

Las Figuras 3.29, 3.30 y 3.31 presentan la capacidad de retención en la matriz de zinc, plomo y níquel, para los dos tipos de encapsulantes, cemento y resina en el rango comprendido de 30% a 50% de composición en peso lodo:encapsulante calculados como se especificó en la ecuación 2.4.

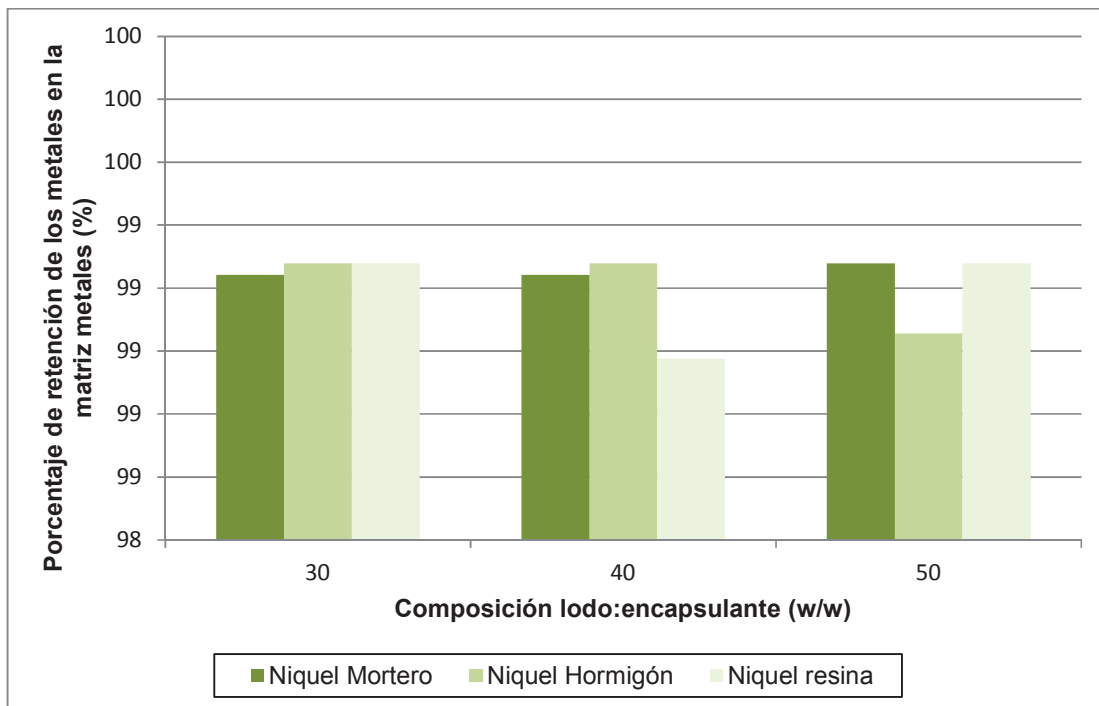


**Figura 3. 29** Porcentaje de retención de zinc en la matriz en función de la relación en peso lodo:encapsulante

En primera instancia, se puede ratificar la acción del cemento y de la resina como encapsulantes. Se observa que la capacidad de retención en la matriz para cualquiera supera el 95% independientemente de la relación lodo:encapsulante; sin embargo, se evidencia a su vez que existe una limitación para la resina.



**Figura 3. 30** Porcentaje de retención de metales en la matriz en función de la relación en peso lodo:encapsulante



**Figura 3. 31** Porcentaje de retención de metales en la matriz en función de la relación en peso lodo:encapsulante

No se tienen resultados en el rango de 60% a 70% de composición lodo:encapsulante porque una cantidad de lodo superior al 50% del peso total es la máxima cantidad que se puede añadir a la resina sin interferir su proceso de curado. Esta limitación no se presenta en la reacción de hidratación del cemento, al cual se puede adicionar hasta 90% de lodo en la muestra encapsulada sin interferir en el proceso de curado.

Adicionalmente, se observa que los porcentajes de retención son menores al comparar los resultados reportados para cemento contra los que se obtuvieron en la resina. En el caso del zinc, la máxima retención que se alcanza en la mezcla es 99,27% y 99,98% para la resina y el cemento, respectivamente. En el plomo se observa una mayor diferencia ya que la máxima retención se reporta para la relación en peso de 30% lodo:encapsulante con 99,69% para el cemento y 98,79 para la resina; en el caso del níquel la diferencia es menor reportándose un promedio de 99,28% de retención.

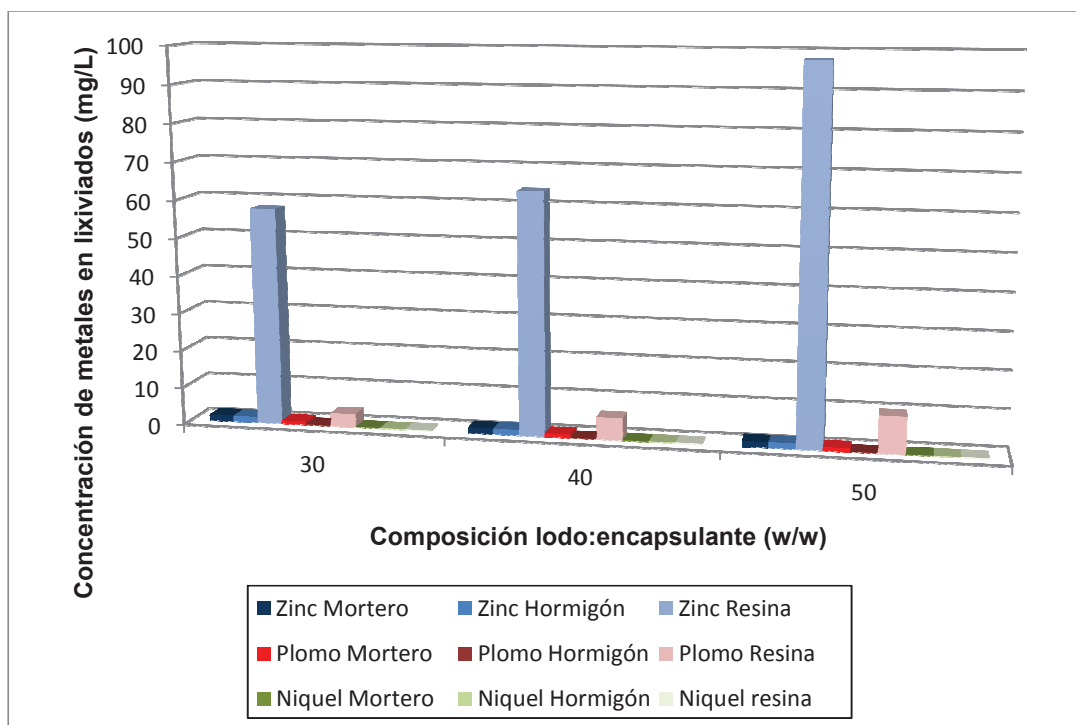
Cómo se discutió en las secciones 3.3 y 3.4, los resultados obtenidos permiten corroborar la acción del cemento y de la resina poliéster insaturada como estabilizantes. A pesar de que el cemento representa una ventaja con respecto a la resina, los dos son técnicamente factibles si se considera su capacidad de retención en la matriz.

#### **3.4.2 CUMPLIMIENTO DE LA NORMA TÉCNICA DE LA ORDENANZA 404 PARA LA CONCENTRACIÓN DE ZINC, PLOMO Y NÍQUEL EN EL LIXIVIADO DE LAS MUESTRAS ENCAPSULADAS.**

Con el objetivo de realizar una comparación, se presenta la Figura 3.32 donde se muestran la concentración media de zinc, plomo y níquel en lixiviados por encapsulante para el rango de 30% a 50% relación en peso: lodo encapsulante. Cómo se observa, la concentración de zinc en lixiviados de las muestras encapsuladas con resina superan en mínimo 40 veces los valores obtenidos cuando se utilizó cemento, sea en forma de mortero u hormigón. Para el plomo, la

tendencia se mantiene, aunque la diferencia es menor, las concentraciones en lixiviados superan solo por 10 veces aproximadamente los datos que se reportaron para cemento. El níquel no presenta diferencias significativas entre las muestras estabilizadas con cemento y aquellas con resina.

Con base en los resultados, se puede deducir que se obtuvo un mejor efecto de retención de metales en la matriz encapsulante de cemento; especialmente para el zinc y el plomo. En el níquel no se observa diferencia significativa; sin embargo hay que considerar que la concentración de este metal en los lixiviados de la muestra contaminada inicial también es muy inferior a las correspondientes de zinc y plomo, 20,78 mg/L versus 2 500,00 mg/L y 294 mg/L, respectivamente.



**Figura 3. 32** Concentración de metales en lixiviados (mg/L) en función de composición lodo:encapsulante

Las muestras encapsuladas con resina no permiten cumplir con la Norma Técnica de la Ordenanza 404, pues los valores de zinc están por encima del valor máximo permisible (2 mg/L) y las concentraciones de plomo en lixiviados superan los 5



mg/L normados. Así pues, la resina no resulta eficiente como encapsulante para la aplicación que se requiere.

Las razones que justifican la mayor capacidad de retención del cemento comparado con la resina; <1,50 mg/L versus 97,67 mg/L para el zinc, <0,9 mg/L versus 9,80 mg/L para el plomo y <0,15 mg/L versus 0,21 mg/L para el níquel, son los diferentes mecanismos de estabilización que utilizan ambos encapsulantes para fijar los contaminantes y el grado de homogenización de la mezcla lodo:encapsulante.

En el caso del existe una fijación física de los contaminantes en la matriz además de una estabilización química del zinc, plomo y níquel mediante reacción con el compuesto de gel silicato cálcico para obtener hidróxidos y carbonatos de los metales respectivos. La resina por otro lado, retiene los contaminantes por macro y micro encapsulación. El ensayo TCLP está diseñado para minimizar los efectos de la fijación física (microencapsulación) al trabajar con muestras de tamaños de partículas inferiores a los 9 mm; es decir, contrarresta el efecto de retención de la resina disminuyendo su capacidad. Aunque el efecto es idéntico en el caso del cemento, los metales que han sido estabilizados mediante reacción química no se liberan de la matriz tan fácilmente y por lo tanto, se registra una mayor capacidad de retención.

Para complementar, la homogenización resulta difícil en el proceso de preparación de las mezclas con resina debido a la alta viscosidad del encapsulante líquido. Se observó que el lodo se fue depositando paulatinamente en la parte inferior del residuo encapsulado en la etapa de gelificación durante el curado, como efecto de la alta densidad de sólido. Una vez que se obtuvo la resina curada, se distinguían claramente 2 fases, una parte inferior con aglomeración de sólidos (en la que se encontraba casi la totalidad del lodo) y otra superior transparente.

Como resultado, se observó la presencia de partículas libres en la superficie inferior del residuo encapsulado con resina al liberarlas de su molde. La molienda

en sinergia con la agitación mecánica a la cual se someten las muestras como requerimiento para el TCLP, liberó con facilidad los sólidos ubicados en la superficie del bloque conformado incrementando la concentración de metales en el lixiviado.



**Figura 3. 33** Observación de aglomeración de sólidos en la parte inferior del material encapsulado con resina

### 3.4.3 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

El ensayo de resistencia a la compresión se realizó únicamente a las muestras encapsuladas con cemento, debido a que la resina no logró cumplir con la Norma Técnica de la Ordenanza 404.

Para el efecto de esta comparación, se considera que solo los valores de resistencia a la compresión obtenidos para la relación en peso de 40% lodo:encapsulante están dentro del rango fijado por Félix, Fraaiji y Hendriks (2001) comprendido entre 5 y 50 MPa; considerados como valores aceptables de resistencia a la compresión para residuos estabilizados y solidificados con cemento. Además, equivalen a los valores de resistencia más altos obtenidos durante experimentación; es decir 6,81 y 4,75 MPa para las mezclas conformadas con mortero y hormigón, respectivamente. Por otro lado, también se toma en cuenta que según La Grega, Buckingham y Evans (1996), un valor de resistencia a la compresión libre aceptable para materiales estabilizados con cualquier encapsulante es 3,00 Mpa; condición con la que cumplen las muestras comprendidas dentro del rango de experimentación de 40% y 50% lodo:encapsulante. (pp. 788-789).

### 3.4.4 TIEMPO DE SECADO

Los resultados de tiempo de secado de la materia prima (lodos de fosfato y enfrió) calculados con la ecuación 2.5 se presentan en la Tabla 3.12.

**Tabla 3. 12** Tiempo de secado requerido para diferentes encapsulantes

Encapsulante	Lodo	Humedad inicial (kg agua/kg sólido seco)	Humedad final (kg agua/kg sólido seco)	Tiempo secado* (h)
Cemento	Fosfato	0,63	0,27	1,78
	Enfrió	4,50	3,50	1,50
Resina	Fosfato	0,63	0,015	10,35
	Enfrió	4,50	0,17	16,73

\*Considerado para 5 m<sup>2</sup> de superficie expuesta al secado

Para preparar las mezclas encapsuladas con cemento es suficiente reducir la humedad del lodo de fosfato en un 58%; es decir, una humedad residual de 0.27 kg agua/kg sólido seco. El lodo de enfrió requiere reducir su humedad en un 23%; es decir, 3,50 kg agua/kg sólido seco. Con esta humedad residual en los lodos, se completa el 80% de la cantidad total de agua prefijada en la muestra lodo:cemento, dejando un margen de 20% para añadir manualmente y homogenizar la mezcla de mejor manera. Los tiempos de secado requeridos para alcanzar las humedades especificadas son 1,78 h y 1,5 h para los lodos de fosfato y enfrió, respectivamente.

La resina por su parte, requiere la adición de lodo prácticamente seco; lo cual implica una humedad de 0,015 ,kg agua/kg sólido seco para el lodo de fosfato y 0,17 kg agua/kg sólido seco para el lodo de enfrió, con la finalidad de evitar el debilitamiento de la estructura y la formación de poros en la misma. Para poder alcanzar este grado de humedad, se debe secar 10,35 h el lodo de fosfato y 16,73 h el de enfrió. Cómo se observa, existen 8,57 h de diferencia en el tiempo de secado requerido para el lodo de fosfato si se quiere trabajar con resina en lugar de cemento. Así también, se tiene 14,95 h en el caso del lodo de enfrió si se encapsula la muestra con cemento en lugar de resina.

Las horas suplementarias que se necesitan para alcanzar la humedad que requiere la resina se explican al considerar que secar dentro del periodo de caída de velocidad de secado es más difícil porque se remueve agua ligada al sólido por mecanismos fisicoquímicos y toma mucho más tiempo. Como consecuencia, se necesita alrededor del 400% más de tiempo para obtener los requerimientos que se ajustan a la resina, reduciendo su factibilidad técnica. Adicionalmente, las secadoras de lodos industriales pueden reducir la humedad solamente hasta un 2 a 3 %.

### 3.4.5 PRECIO DEL ENCAPSULANTE

La Tabla 3.13 muestra el costo en dólares que representa encapsular 100 kg de muestra para las diferentes relaciones: lodo encapsulante en el rango total de experimentación para todos los estabilizantes estudiados. El mortero y el hormigón presentan una ventaja económica con respecto a la resina ya que, para una misma composición lodo:encapsulante, el costo de estabilización con resina supera por 15 veces el respectivo con mortero y/o hormigón.

**Tabla 3. 13** Precio estimado por 100 kg de muestra encapsulada

Tipo encapsulante	Precio (USD/100 kg)					
	30	40	50	60	75	90
<b>Composición lodo:encapsulante</b>						
<b>Mortero</b>	18,38	17,17	15,96	14,75	12,94	11,13
<b>Hormigón</b>	15,13	14,38	13,64	12,90	11,78	10,66
<b>Resina</b>	297,59	255,09	212,59	NA*	NA*	NA*

\*No aplica para la resina debido a la restricción presente en el proceso de curado con cantidades de lodo superiores al 50% de la mezcla

Los costos reportados en la Tabla 3.13 son consecuencia lógica de la diferencia de precios inicial que presentan los estabilizantes especificados en la Tabla 2.4. Para la relación en peso 30% lodo:encapsulante, en la cual se utiliza la mayor cantidad de material estabilizante, el costo de encapsular 100 kg de lodo contaminado es equivalente a 18,38 USD si se trabaja con mortero, 15,13 USD si se encapsula con hormigón y 297,59 USD si se utiliza resina. En el otro extremo,

si se trabaja con 90% de relación en peso lodo:encapsulante, el costo disminuye a 11,13 USD y 10,66 USD si se trabaja con mortero y hormigón, respectivamente. No se reporta un valor para la resina debido a la restricción que presenta el material en su proceso de curado cuando las cantidad de lodo supera el 50% de la mezcla lodo:encapsulante.

El precio de la resina es 4,15 USD/kg mientras que el cemento se compra en 0,16 USD/kg. El hormigón disminuye su precio debido a la adición del aglomerado grueso, el cual se encuentra en 0,01 USD/kg. Como consecuencia, encapsular con hormigón resulta menos costoso que con mortero y la inversión es mucho menor cuando se compara con la resina debido a que, el precio del aglomerado es bajo. Sin embargo, si se compara el precio de encapsulado entre el mortero y el hormigón la diferencia no supera los 3,00 USD/100 kg de material encapsulado para la composición de 30% lodo encapsulante, proporción en la cual se tiene la mayor discrepancia. La diferencia no es significativa por lo que desde el punto de vista económico trabajar con mortero o con hormigón resulta rentable. Adicionalmente, se observa que el precio disminuye al incrementar el porcentaje en peso lodo encapsulante en la mezcla realizada. Esto se explica al observar que la proporción de encapsulante utilizado disminuye a medida que aumenta la cantidad de lodo, por ende, la inversión resulta cada vez menor.

Así también, se observa que la diferencia de precio que existe entre el mortero y el hormigón es menor conforme se aumenta la cantidad de lodo añadido a la mezcla. Consecuencia lógica de la disminución de la cantidad de aglomerado grueso utilizado. En términos económicos, no existe una diferencia significativa entre el mortero y el hormigón, la mayor diferencia de precio se reporta para la composición 30% correspondiente a 3,00 USD aproximadamente mientras que la menor se registra para la proporción de 90% equivalente a 1,00 USD.

Para las composiciones en peso que se encuentra en el rango de 60% a 90% lodo:encapsulante no se reporta costos para la resina debido a la limitación en su proceso de curado. Como resultado, la resina presenta la desventaja de que se necesita un mínimo de 50% para poder lograr un efecto similar de encapsulado

que el cemento. Esta cantidad se ve reflejada en los costos del proceso y reduce la factibilidad económica de la resina. En conclusión, el cemento y el hormigón presentan una ventaja económica con respecto a la resina.

Con base en los resultados obtenidos en las secciones 3.4.1, 3.4.2, 3.4.3, 3.4.4 y 3.4.5, se determinó trabajar con mortero como estabilizante a 50% de relación en peso lodo:encapsulante considerando que permite el cumplimiento de la norma técnica de la Ordenanza 404 al disminuir los niveles de concentración en los lixiviados a valores inferiores a 1,5 mg/L para zinc, 0,9 mg/L para plomo y 0,15 m/L para níquel; esto implica un porcentaje de retención en la matriz equivalente a 99,94%, 99,68% y 99,28%, respectivamente para cada uno de los metales. Además, presenta el segundo valor más alto de resistencia a la compresión equivalente a 3.65 Mpa que es superior al valor determinado como aceptable por La Grega, Buckingham y Evans, (1996) equivalente a 3 MPa y su costo de encapsulado por cada 100 kg de lodo es 15,96 USD lo cual implica una diferencia no significativa de 3,00 USD con la misma proporción lodo:hormigón; lo que lo hace igual de factible desde el punto de vista económico. (p.788-789)

### **3.5 DIMENSIONAMIENTO DE LOS EQUIPOS QUE CONFORMAN EL PROCESO DE ENCAPSULADO.**

La planta de tratamiento de residuos sólidos se dimensionó para tratar una cantidad equivalente a 2 500 kg/mes de lodos provenientes del proceso de galvanizado, donde 2 000 kg son lodos de fosfatado y 500 kg son producto del enfrió. Esta capacidad se obtuvo a partir de los registros de producción reportados por la empresa de galvanizado por inmersión en caliente de alambre auspiciante del presente proyecto. En primera instancia, se explica la aplicación de cada una de las operaciones unitarias seleccionadas y su balance de masa para determinar la capacidad necesaria de los equipos y proceder a su dimensionamiento.

### 3.5.1 SELECCIÓN DE LAS OPERACIONES UNITARIAS

- Secado

El proceso de secado se realiza con la finalidad de disminuir el volumen de lodo producido y mejorar la mezcla con el encapsulante en la operación unitaria posterior de mezclado. De forma adicional permite reducir la cantidad de agua presente en los lodos ya que inicialmente se excede el contenido de agua que se añadirá para fraguar el cemento. Los lodos poseen una humedad correspondiente a 39,33% para el fosfato y 82,02% para el enfriamiento, que equivale a 786,6 kg/mes y 410,1 kg/mes de agua. Félix, Fraaiji y Hendriks (2001) afirmaron que este proceso es necesario cuando los residuos poseen más del 50% de su peso en agua. (p.121)

- Mezclado

La operación unitaria de mezclado tiene como finalidad crear la mezcla de 50% lodo:mortero que encapsulará los lodos restringiendo su potencial de lixiviación y permitiendo cumplir la Norma Técnica de Residuos Peligrosos y especiales de la Ordenanza 404.

- Vibroprensado

La mezcla sólido líquida obtenida en la operación de mezclado se ingresará a un vibroprensador manual para poder formar bloques macizos de 10 x 20 x 40 cm. Estas dimensiones han sido seleccionadas con base en los moldes estándar que están disponibles en el mercado para este tipo de aplicaciones. Aunque las pruebas experimentales desarrolladas en la presente investigación no proporcionaron los resultados esperados para poder valorizar el residuo enfocando su aplicación como adoquín, se decidió mantener la operación de vibroprensado para favorecer el curado de la mezcla lodo mortero ya que mayor área superficial facilita el proceso de curado; permitir un almacenamiento más ordenado durante el curado, reducir el volumen para abaratar los costos en el

transporte y evitar el desecho de recipientes metálicos que pueden tener un uso suplementario en la planta.

Los bloques formados serán destinados a un área de confinamiento exterior para cumplir su proceso de 25 días de curado. Este tiempo se mantiene en función de los datos experimentales disponibles en este estudio ya que todas las pruebas de toxicidad TCLP así como las de resistencia a la compresión fueron realizadas a los 25 días de curado. Concluido el tiempo, los bloques podrán ser desechados como residuos no peligrosos.

### **3.5.2 BALANCE DE MASA**

En el balance de masa se representó cada una de las corrientes presentes en los equipos que conforman la planta de tratamiento de desechos sólidos y se realizó tomando como base los 2500 kg/mes de lodos de fosfatado y enfrió. Para su elaboración se utilizó la ecuación [2.6].

La materia prima es el resultado de las tortas de los filtros de fosfatado y enfrió localizados actualmente en la planta de galvanizado por inmersión en caliente, los lodos producidos serán trasladados al lugar de ubicación de la planta de tratamiento de desechos sólidos en tanques metálicos de 55 gal conforme se vacíen los filtros de proceso. Las corrientes que ingresan y salen de cada uno de los equipos se detallan en la Figura 3.34.

### **3.5.3 DIAGRAMAS DE PROCESO**

Los diagramas BFD y PFD presentados a continuación en la Figuras 3.34, y 3.35, ilustran de manera gráfica el balance de masa del proceso de tratamiento de lodos contaminados, y las propiedades de las diferentes corrientes en proceso.



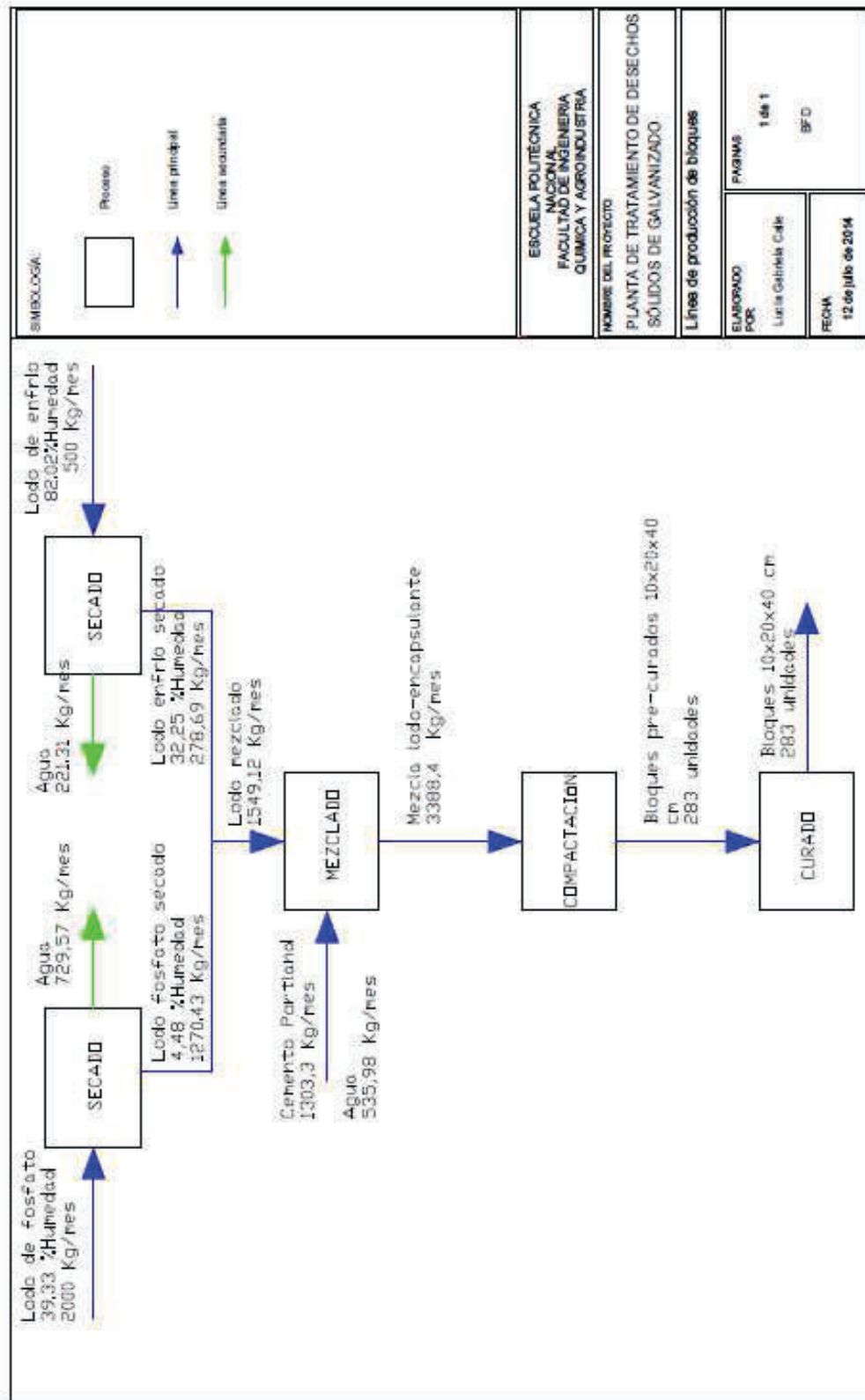


Figura 3. 34 Diagrama BFD de línea de producción de bloques

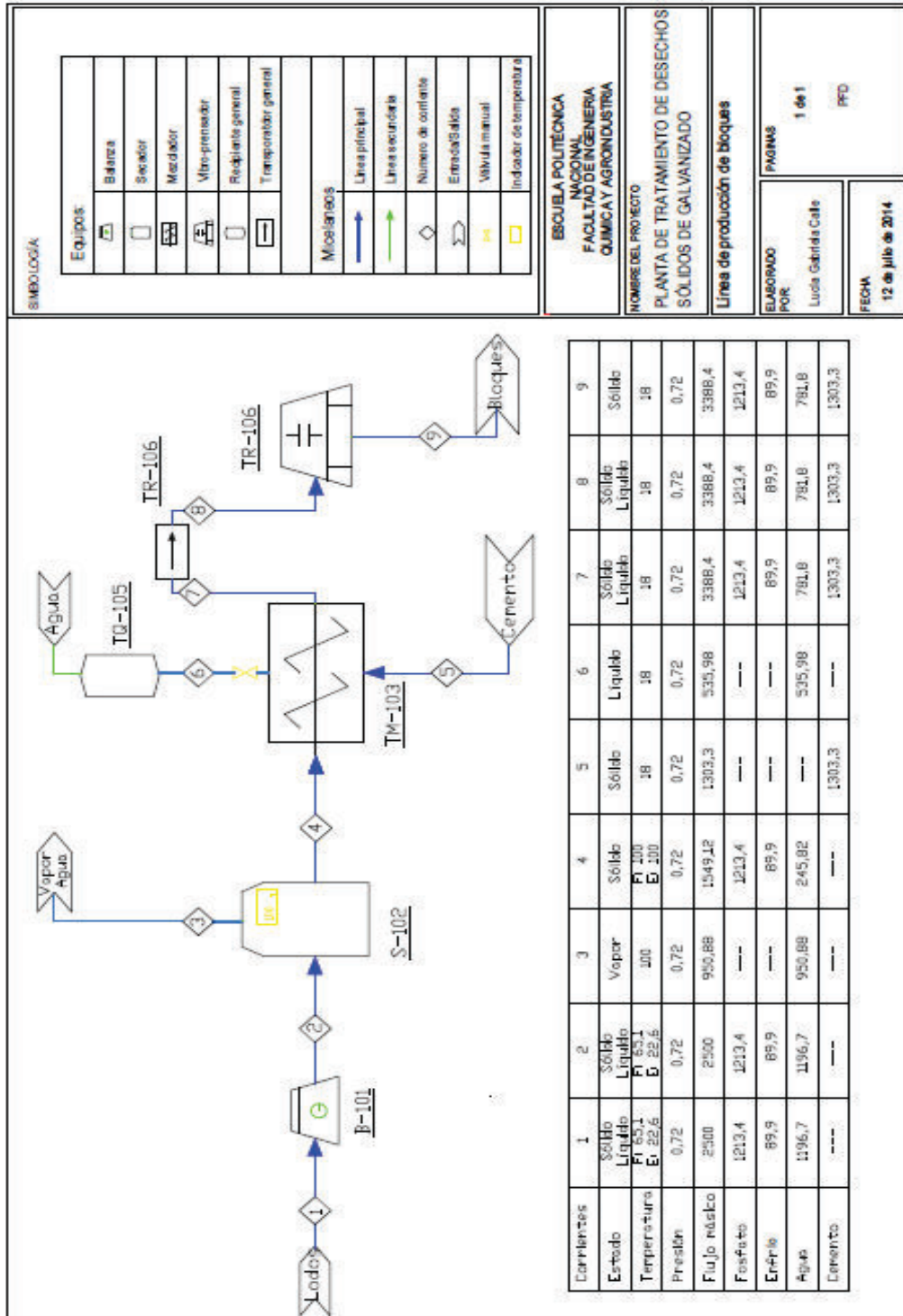


Figura 3. 35 Diagrama PFD de línea de producción de bloques encapsulados

### 3.5.4 DESCRIPCIÓN DETALLADA DEL PROCESO

El tratamiento de los lodos producto de los procesos de fosfatado y enfriamiento inicia cuando estos han sido removidos manualmente del filtro prensa respectivo, colocados en recipientes metálicos de 55 gal y trasladados al lugar físico donde se encuentran los equipos disponibles para el encapsulado.

En primer lugar, los lodos serán colocados individualmente en una parihuela tarada que se utilizará como recipiente para pesar los mismos. El operario deberá remover el contenido de los tanques metálicos y trasladarlos a la parihuela hasta obtener una cantidad de 100 kg de lodo de fosfato y 25 kg de lodo de enfriamiento. La producción está planificada para operar la planta 20 días al mes.

Una vez que se ha pesado la cantidad requerida de lodo de fosfato y enfriamiento, se ingresa el lote de lodo de fosfato al secador S-102 donde se trabajará a iguales condiciones de secado que las experimentales para poder replicar los resultados de la curva de velocidad de secado. Por lo tanto, se debe tener un secador discontinuo tipo batch, sin convección de aire, 100 °C de temperatura de secado, 0,72 atm de presión que corresponden a la presión ambiente en la ciudad de Quito y humedad relativa lo más cercana posible a 60% en el aire de Quito. Si se cumplen estas condiciones, se puede utilizar la curva de velocidad de secado para estimar el tiempo que se deberían secar los lodos para obtener una humedad de 0,047 kg agua/kg sólido seco.

Concluido el secado del lodo de fosfato, se procede al lodo de enfriamiento siguiendo la misma metodología señalada para obtener un lodo con una humedad base seca de 2,1 kg agua/kg sólido seco que equivale a 32,25% de humedad base húmeda. Durante el transcurso de tiempo que se opera el secador para remover la humedad del lodo de enfriamiento, el lodo de fosfato será colocado en la mezcladora TM 103 y recubierto por un film plástico para evitar una posible humidificación del mismo con el agua presente en el aire ambiente.

Una vez que se tiene el lodo de enfriamiento con menor cantidad de humedad, se procede a ingresarlo a la mezcladora TM 103 donde ya se encontraba el lodo de fosfato. Tanto el lodo de fosfato como el de enfriamiento resultante del proceso de secado serán trasladados a la mezcladora utilizando la misma parihuela de 33 L.

En la mezcladora TM 103 se añadirá el cemento y el agua necesarios para obtener la mezcla de 50% relación en peso lodo mortero. El agua requerida para el proceso estará almacenada en un tanque TQ 105 de 1000 L con salida inferior y válvula manual de tal manera que se le facilite al operario la adición de agua a la mezcladora. Para poder ingresar el contenido exacto de agua se tendrá en el sitio un recipiente plástico dosificador. El tiempo de mezcla se determinó mediante pruebas preliminares en planta estableciéndose que 0,15 h o 9 min es un tiempo suficiente para garantizar la homogenización de la mezcla.

Finalmente, la mezcla sólido líquida obtenida será llevada a los moldes de la vibroprensadora VP-104 por medio de una canaleta móvil TR-106 para poder formar los bloques macizos de 10 x 20 x 40 cm. Los bloques formados serán destinados a un área de confinamiento recubierta al aire libre para cumplir su proceso de 25 días de curado. Concluido el tiempo, podrán ser desechados como residuos no peligrosos.

### **3.5.5 DIAGRAMA DE FLUJO DE PRODUCTO**

Con el objetivo de comprender de una mejor manera la secuencia de operaciones unitarias y los tiempos respectivos de cada una, se presenta la Tabla 3.14 donde se representa el diagrama de recorrido de producto. Este diagrama muestra que la planta de tratamiento funciona bajo una modalidad batch como consecuencia de la baja capacidad de tratamiento de lodos requerida, 2 500 kg/mes, comparada con plantas industriales de tratamiento de desechos sólidos producto del tratamiento de aguas residuales donde la producción mensual puede superar las 50 000 kg/mes.

**Tabla 3. 14** Diagrama de recorrido de producto en la planta de tratamiento de residuos sólidos producto de galvanizado

<b>DIAGRAMA DE RECORRIDO DE PRODUCTO</b>							
<b>Nombre del proyecto:</b> Planta de tratamiento de residuos sólidos producto de galvanizado							
<b>Detalles de proceso</b>	<b>Operación</b>	<b>Transporte</b>	<b>Inspección</b>	<b>Espera</b>	<b>Almacen.</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Generación de residuos</b>
Cargar lodos fosfato a parihuela	○	⇨	□	D	▽		No
Enviar a la balanza	○	⇨	□	D	▽		No
Pesar	○	⇨	□	D	▽	0,08 h	No
Enviar a la secadora	○	⇨	□	D	▽		No
Secar	○	⇨	□	D	▽	NA*	No
Enviar a la mezcladora	○	⇨	□	D	▽		No
Cargar lodos enfriado a parihuela	○	⇨	□	D	▽		No
Enviar a la balanza	○	⇨	□	D	▽		No
Pesar	○	⇨	□	D	▽	0,08 h	No
Enviar a la secadora	○	⇨	□	D	▽		No
Secar	○	⇨	□	D	▽	NA*.	No
Enviar a la mezcladora	○	⇨	□	D	▽		No
Mezclar	○	⇨	□	D	▽	0,15 h	No
Enviar al vibrocompresor	○	⇨	□	D	▽		No
Formar los bloques	○	⇨	□	D	▽	0,25 h	No
Enviar los bloques a curado	○	⇨	□	D	▽		No
Curado	○	⇨	□	D	▽	25 días	No
Inspección de bloques	○	⇨	□	D	▽		No
Almacenamiento de bloques	○	⇨	□	D	▽		No

\*Los tiempos son función de área expuesta al secado disponible en el equipo seleccionado.

Se tienen 8 operaciones en total, 5 operaciones de transporte, una inspección una vez que los bloques han sido elaborados y una espera durante su proceso de curado. Los tiempos de operación del secador se calcularán conociendo el área expuesta al secado del equipo que se localizará en planta mientras que los tiempos de mezcla han sido determinados mediante pruebas preliminares en planta. El diagrama de recorrido de producto presentado permite evidenciar que el proceso propuesto es de fácil manejo y enteramente manual. El número de lotes al día serán definidos en función de la capacidad de los equipos disponibles en el mercado

### **3.5.6 SELECCIÓN DE LA CAPACIDAD DE LOS EQUIPOS INVOLUCRADOS EN EL PROCESO.**

Una vez establecidas las operaciones unitarias, los flujos correspondientes a cada una de ellas. Se procede a dimensionar los equipos necesarios para el proceso de formado de bloques encapsulados teniendo en cuenta los criterios señalados en la sección 2.5.

#### **3.5.6.1 Secador**

Para el dimensionamiento del secador se consideraron los siguientes factores.

- Condiciones de secado idénticas a las experimentales para utilizar los resultados obtenidos en la sección 3.1.4. La operación de secado debe trabajar a 100°C, a presión constante y atmosférica en la ciudad de Quito equivalente a 0,72 atm, sin convección de aire en la cámara de secado y con una humedad relativa del aire media de 60% que corresponde a las condiciones ambientales promedio en Quito.
- La humedad inicial de los lodos de fosfato y enfrió determinadas experimentalmente en el punto 2.1.4 equivalentes a 39,33% y 82,02% de humedad base húmeda para los lodos de fosfato y enfrió, respectivamente.

- La humedad crítica de los lodos de fosfato y enfrió equivalentes a 0,0047 kg agua/kg de sólido seco y 2,1 kg agua/ kg de sólido seco determinadas a partir de las curvas de velocidad de secado presentadas en las Figuras 3.3 y 3.4
- La velocidad de secado en el periodo de secado constante equivalente a  $7,2 \times 10^{-4}$  kg agua evaporada/m<sup>2</sup>s y  $5,4 \times 10^{-4}$  kg agua evaporada/m<sup>2</sup>s obtenidas a partir de las curvas de velocidad de secado presentadas en las Figuras 3.3 y 3.4 para el lodo de fosfato y enfrió, respectivamente.
- El flujo másico diario de lodo de fosfato y enfrió que se requiere para suplir la capacidad de producción mensual que se señalan en el diagrama BFD correspondiente a 100 kg/ día de lodo de fosfato y 25 kg/día de lodo de enfrió.
- Temperatura inicial de los lodos determinados experimentalmente en el punto 2.1.3 equivalentes a 65,1°C y 22,6 °C.
- El área expuesta al secado en el secador equivalente a 7 bandejas de 0,40 m<sup>2</sup>; es decir, 2,8 m<sup>2</sup>

En el mercado, se encuentra secadores con capacidades similares ya que se diseñan en función de cantidades normalizadas. Para la aplicación requerida, se ha seleccionado el secador más pequeño disponible en el mercado marca Watropur cuya capacidad y dimensiones se especifican en la Tabla 3. 15.

**Tabla 3. 15** Capacidad y dimensiones del secador seleccionado por catálogo

Capacidad máxima necesaria (kg lodo/día)	Capacidad máxima necesaria (m <sup>3</sup> /día)	Capacidad nominal equipo comercial (m <sup>3</sup> )	Capacidad real equipo comercial (m <sup>3</sup> )	Factor de Sobredimensionamiento (%)
200	0,121	0,150	0,130	6,92%

\*(Watropur, 2004, p. 1)

Las dimensiones del equipo seleccionado se presentan en la Figura 3.36.

Una vez que se ha seleccionado el secador, se tiene los datos necesarios para calcular el tiempo de secado con la ecuación 2.5. Para el efecto, se considera que

f

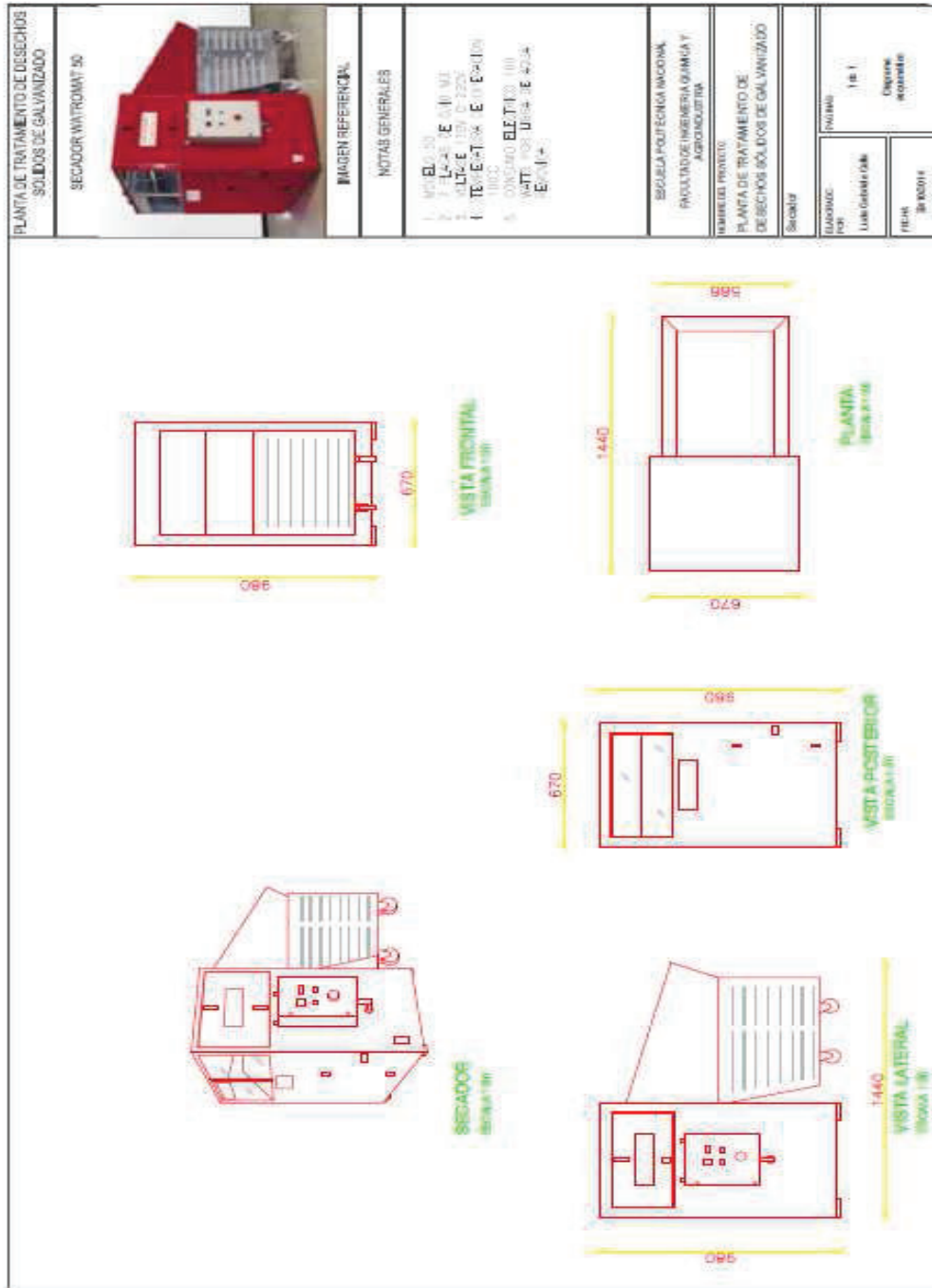


Figura 3. 36 Diagrama esquemático del secador batch WATROPUR 50



utilizará el secador 10 días al mes, lo cual requiere secar 200 kg/día de lodo de fosfato y 50 kg/día de lodo de enfrió; ambos hasta la humedad crítica. Para tener un mejor control del proceso se realizará 2 batch para secar 100 kg de lodo de fosfato y un batch para secar la cantidad total del lodo de enfrió. Bajo estas condiciones se requiere 4,87 h para reducir la humedad del lodo de fosfato desde 0,63 hasta 0,0047 kg agua/kg de sólido seco y 3,12 h para disminuir la humedad del lodo de enfrió desde 4,62 hasta 2,1 kg agua/kg de sólido seco. .

### 3.5.6.2 Tanque de mezcla

La capacidad y dimensiones del tanque de mezcla se determinaron considerando los siguientes factores.

- El flujo másico de lodo seco que sale del secador determinado a partir del balance de masa equivalente a 160,62 kg/día y la cantidad de insumos requeridos para elaborar la mezcla lodo:encapsulante, es decir, la cantidad de cemento y agua a añadir equivalentes a 130,3 kg/día y 53,54 kg/día respectivamente. En total se requiere una capacidad en la concretera de 343,86 kg/día.
- La densidad de los lodos de fosfato y enfrió equivalentes a 1,64 g/cm<sup>3</sup> y 1,58 g/cm<sup>3</sup> determinados experimentalmente en el punto 2.1.5.
- Tiempo de mezclado determinado de manera preliminar en planta que se muestra en la Tabla 3.14 equivalente a 0,15 h.

Para esta aplicación, se encontró una mezcladora tipo concretera disponible en planta marca Bagant cuya capacidad se muestra en la Tabla 3.16; se evidencia que el flujo volumétrico a procesar diariamente es 0,22 m<sup>3</sup>; sin embargo, el equipo disponible en planta presenta una capacidad efectiva de mezcla de 0,2 m<sup>3</sup> que resulta insuficiente para mezclar en un solo batch la cantidad requerida de procesamiento. Con este antecedente, se decide realizar 2 batch al día de 171,93 kg para poder optimizar la capacidad del equipo y evitar la adquisición de uno nuevo. La Figura 3.37 muestra las dimensiones del equipo destinado a la mezcla.

**Tabla 3. 16** Capacidad y dimensiones del tanque de mezclado seleccionado por catálogo

Capacidad requerida (kg /día)	Capacidad requerida (m <sup>3</sup> /día)	Capacidad nominal equipo disponible (m <sup>3</sup> )	Número de batch diarios a realizarse
343,86	0,22	0,2	2

\*(Bagant, 2014, prr. 1)

### 3.5.6.3 Equipo de vibrocompactación

El equipo de vibrocompactación o vibroprensado se seleccionó con base en:

- El flujo másico proveniente de mezclado determinado a partir del balance de masa equivalente a 3388,58 kg/mes o 338,86 kg/día
- La densidad de los lodos de fosfato y enfrío equivalentes a 1,64 g/cm<sup>3</sup> y 1,58 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente.
- La densidad promedio del cemento Portland equivalente a 1,5 g/cm<sup>3</sup>.
- Una composición de 50% lodo:mortero.

El mercado ofrece equipos de vibrocompactación manuales con elaboración de bloques de 10 x 20 x 40 cm equivalente a 0,008 m<sup>3</sup>; con base en este dato se seleccionó el vibrocompactador marca Manserco cuyas especificaciones se muestra en la Tabla 3.17. Se tomó en consideración el volumen total de mezclado que se trata y el número de bloques que permite elaborar el equipo.

**Tabla 3. 17** Capacidad necesaria del equipo de vibrocompactación

Volumen real a tratar (m <sup>3</sup> /día)	Capacidad para diseño (bloques /día)
0,22	28

El equipo que posee la capacidad mínima de elaboración manual es aquel cuyas características se especifican en la Tabla 3.18.



**Tabla 3. 18** Capacidad y dimensiones del vibrocompactador seleccionado por catálogo

Número de bloques por ciclo (unidades)	Capacidad* (bloques/día)
4	240

\*(Manserco, 2014, prr. 1)

Debido a la falta de disponibilidad de un equipo de menor capacidad, se trabajará durante 1 h al día para completar los 28 bloques diarios que se deben realizar. Las dimensiones del equipo seleccionado se especifican en la Figura 3.38.

### 3.5.7 DISTRIBUCIÓN DE EQUIPOS EN PLANTA

Una vez determinados el dimensionamiento de los principales equipos requeridos así como el diagrama de recorrido de producto, se estableció la ubicación de los equipos en el espacio físico especificado dentro de la planta de galvanizado. En la Figura 3.38 se presenta el plano de distribución de los equipos en la futura área de tratamiento de desechos sólidos. Como se puede observar, la distribución es lineal.

Físicamente la estructura donde se localizará la planta es un galpón abierto ubicado en la parte posterior de la misma. Actualmente, este espacio está destinado a almacenamiento de materiales de construcción e insumos energéticos (tanques de GLP) y residuos sólidos peligrosos. Por lo tanto, se han adecuado los equipos de tal manera que no interfieran en el uso actual del espacio.

En la Figura 3.39 se evidencia el espacio destinado para el almacenamiento de los tanques con lodos previo a su tratamiento así como el almacenamiento de materia prima (cemento) e insumos (agua) de tal manera que se encuentren cercanos a la línea de formación de bloques. Para tener una mejor visualización de la estructura y distribución de los equipos, así como sus dimensiones con respecto a un operario, se presenta de manera complementaria los cortes de la planta en la Figura 3.40

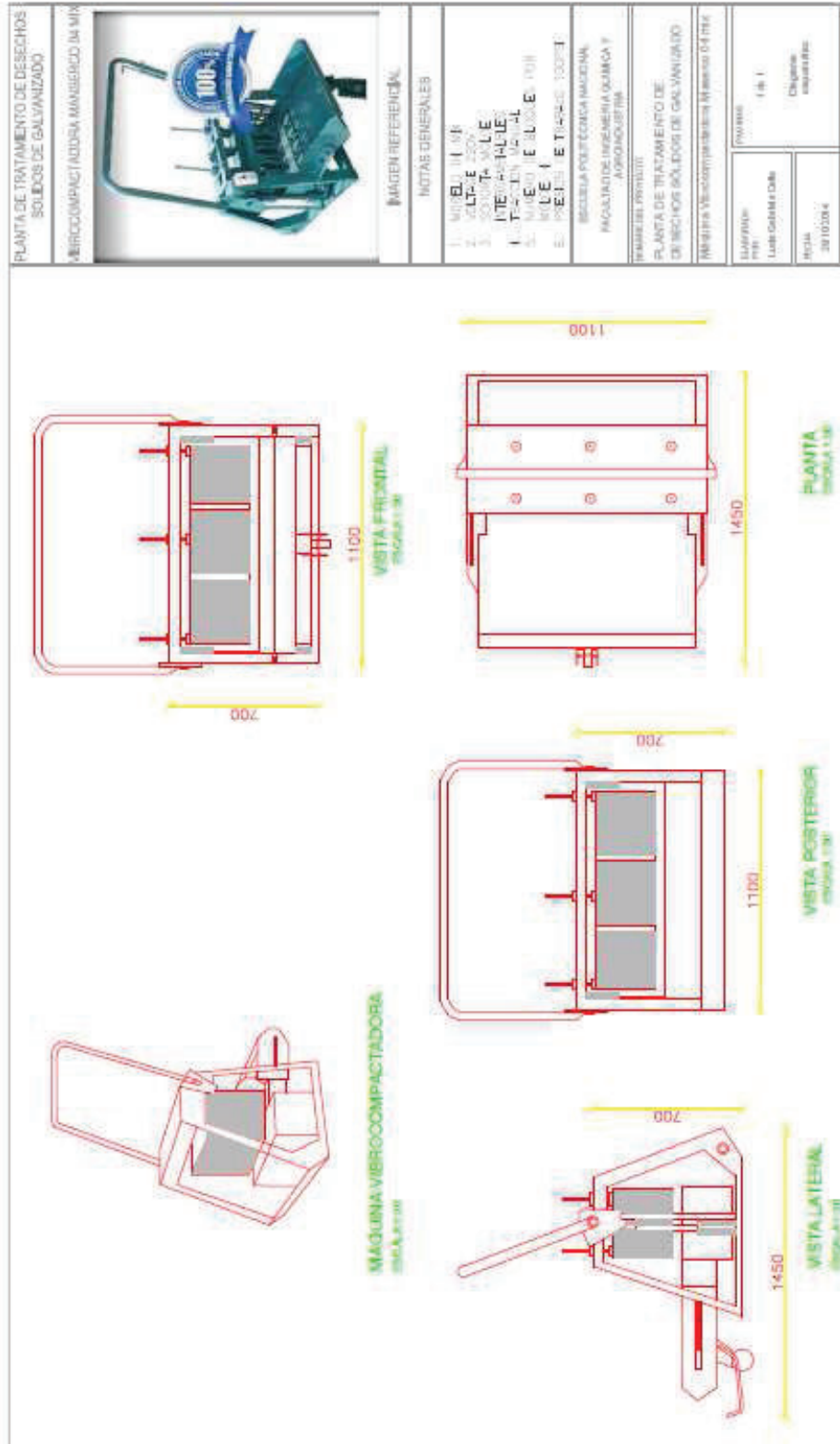


Figura 3. 38 Diagrama esquemático del vibrocompactador MANSERCO

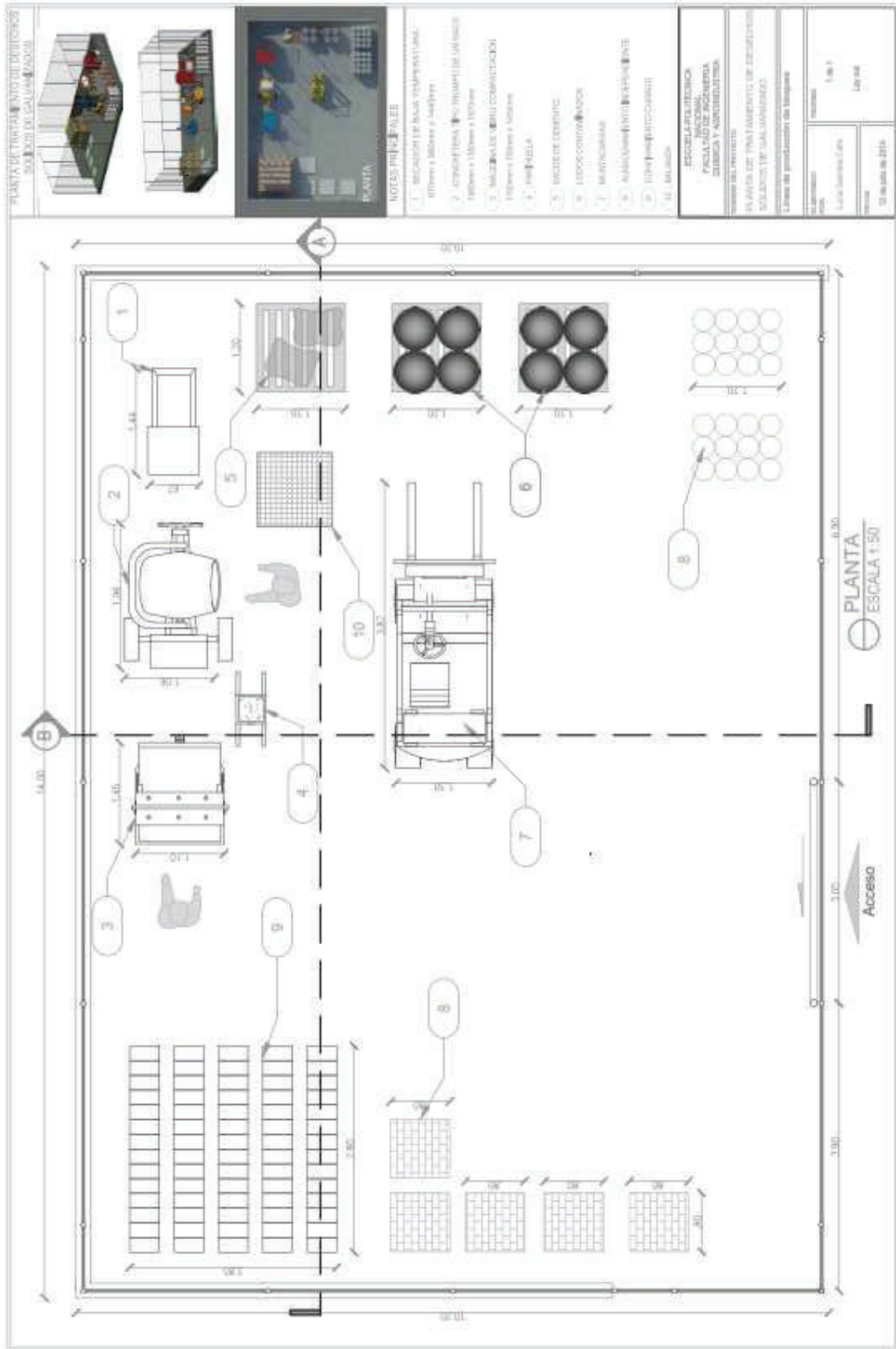


Figura 3. 39 Lay out de línea de producción de bloques encapsulados



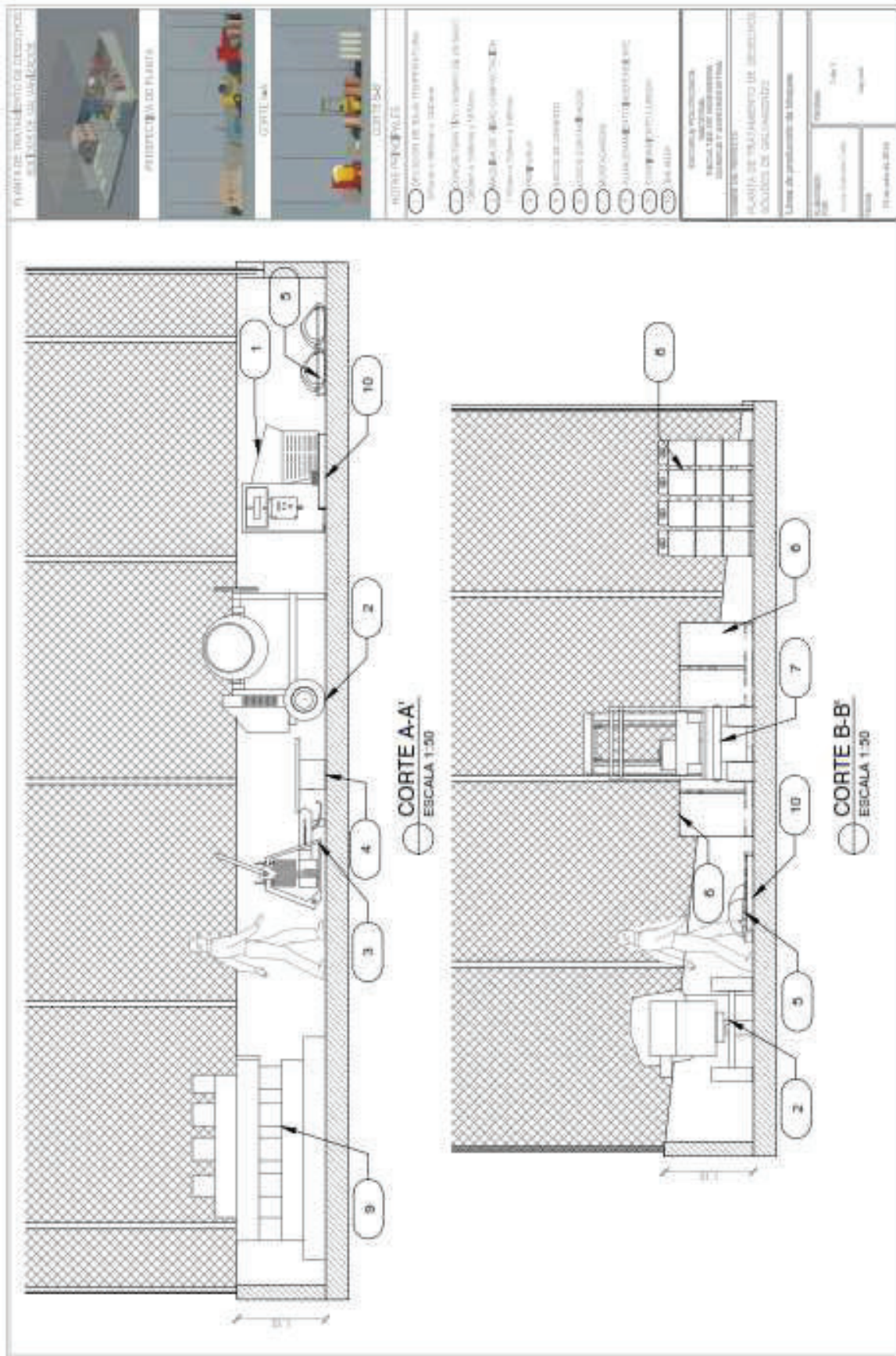


Figura 3. 40 Cortes transversales de la línea de producción de bloques encapsulados

## 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 CONCLUSIONES

- Los residuos sólidos generados en los procesos de fosfatado y enfriamiento de la industria de galvanizado de alambre se clasifican como residuos peligrosos según las normas técnicas de la Ordenanza 404 del Distrito Metropolitano de Quito considerando que los análisis de toxicidad TCLP realizados a los residuos sólidos iniciales presentan una liberación de metales al ambiente equivalente a 2500 mg/L de zinc y 20,78 mg/L de níquel para el lodo de fosfato y un total de 5,5 mg/L de zinc y 294 mg/L de plomo para el lodo de enfriamiento. Estos valores superan el límite máximo permisible para residuos sólidos establecido en 2,0 mg/L para zinc y níquel y 5,0 mg/L para plomo.
- El encapsulado de los residuos con cemento, en sus dos variantes: mortero y hormigón, demostró la acción estabilizante del mismo al reducir la concentración de metales en el lixiviado hasta un 99,94 % para zinc, 99,69% para plomo y 99,24%. Así también, se corroboró la acción estabilizante de la resina al permitir una máxima reducción de metales en el lixiviado equivalente a 97.69%, 98.79% y 99.28% para zinc, plomo y níquel, respectivamente.
- El cemento presentó una ventaja técnica con respecto a la resina al reportar concentraciones de zinc y níquel en lixiviados (equivalentes a 1,5 mg/L y 0,15 mg/L) inferiores a 5,0 mg/L que corresponde al máximo nivel permisible para estos metales; así como 0,9 mg/L de plomo, cuyo valor es menor al 2,0 mg/L regulado. Estos resultados fueron obtenidos para las muestras que oscilaban entre el 30% y el 60% de composición lodo encapsulante en ambas variantes.
- La resina no logró cumplir con la regulación, pues la mejor muestra encapsulada (30 lodo:70 resina) presentó una liberación de zinc al



ambiente equivalente a 57,67 mg/L y una concentración en lixiviados de plomo igual a 3,55 mg/L.

- La estabilización de los lodos de fosfato y enfrió en relación 3:1 utilizando mortero tuvo una mejor resistencia a la compresión comparada con el hormigón para una misma proporción lodo encapsulante. Paralelamente, se demostró que una mayor cantidad de residuo en la muestra, debilita el bloque formado. Así pues, la mayor resistencia a la compresión equivalente a 6.81 MPa se obtuvo para el bloque formado con 40% de lodo y 60% de mortero.
- En lo que concierne a factibilidad económica, el cemento presenta una ventaja competitiva con respecto a la resina considerando que la diferencia en costos bordea los 286,46 USD por cada 100 kg de material encapsulado.
- La mezcla de lodo: mortero al 50% se consideró como base para el diseño de la planta de tratamiento de lodos debido a que permite el cumplimiento de la norma técnica de la Ordenanza 404 al disminuir los niveles de concentración en los lixiviados a valores inferiores a 1,5 mg/L para zinc, 0,9 mg/L para plomo y 0,15 m/L para níquel; esto implica un porcentaje de retención en la matriz equivalente a 99,94%, 99,68% y 99,28%, respectivamente para cada uno de los metales. Además, presenta el segundo valor más alto de resistencia a la compresión equivalente a 3,65 MPa y su costo de encapsulado por cada 100 kg de lodo es 15,96 USD
- Se dimensionó una planta de tratamiento de desechos sólidos modalidad batch que puede suplir una capacidad de producción de 2 500 kg de lodos contaminados por mes. La planta contempla la implementación de un secador de 0,130 m<sup>3</sup> con 7 placas de secado cuya superficie promedio es 0,4 m<sup>2</sup>, una mezcladora cuya capacidad nominal es 0,2 m<sup>3</sup> y un

vibroprensador manual con 4 moldes de 10 x 20 x 40 cm que permite la elaboración de 240 bloques día.

## 4.2 RECOMENDACIONES

- Ampliar el estudio de la estabilización con cemento incluyendo como variable a la proporción de agua utilizada, puesto que podría tener influencia en la capacidad de homogenización de la mezcla y en la resistencia a la compresión alcanzada.
- Pese al resultado positivo obtenido en las dos variantes de estudios de estabilización con cemento, se podría introducir cal en la mezcla para neutralizar la acidez de los lodos y de esta manera reducir la cantidad de cemento necesaria para el encapsulado.
- A pesar de que se obtuvo un resultado parcialmente positivo para la resina, sería recomendable ampliar el rango de experimentación de manera que se introduzca mayor cantidad de resina en la mezcla encapsulada, poder cumplir la norma técnica de la Ordenanza 404 y encontrar algún beneficio adicional de valorización del residuo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Akovali, G. (2005). *Handbook of Polymers in Construction*. doi: 10236855
2. American Galvanizers Association. (2013). *Batch Hot Dip Galvanizing*. Recuperado de <http://www.galvanizeit.org/corrosion/corrosion-protection/zinc-coatings/batch-hot-dip-galvanizing/> (Noviembre, 2013)
3. Bagant, (2014). *Concreteras*. Recuperado de [http://www.bagant.com/115\\_concreteras/](http://www.bagant.com/115_concreteras/) (Julio, 2014)
4. Batchelor, A. (2011). *Materials Degradation and its Control by Surface Engineering*. Recuperado de <http://site.ebrary.com/bvirtual.epn.edu.ec/lib/epn/docDetail.action?docID=10493488&page=274> (Noviembre, 2013)
5. Bayar, S. y Tanlili, I. (2012). Solidification/stabilization of hazardous waste sludge obtained from a chemical industry. *Clean Tech Environ Policy*. 15(1), 157-165. doi: 10.1007/s10098-012-0494-1
6. Beunens, P. (2012). *Tecnología del alambre*. (1era ed.). Antwerpen, Bélgica: Bekaert.
7. Borges, P., Milestone, N., Costa J., Cyril, J., Panzera, T. y Christophoro, A. (2011). Carbonation durability of blended cement pastes used for waste encapsulation. *Materials and structures*, 45(1), 663-678. Recuperado de <http://link.springer.com/article/10.1617%2Fs11527-011-9788-8> (Febrero, 2014)
8. Burton, W., Show, I., Williams, L., Taylor, D., y Marsden P. (1998). Collaborative Study of the Toxicity Characteristic Leaching Procedure TCLP. *Waste Testing and Quality Assurance*. 14-61. doi: 10.1520/STP26430S

9. Casal, J., Dominguez, J. y Delvasto, P. (2011). Valorización de un residuo proveniente de la industria de galvanizado en caliente mediante síntesis hidrometaúrgica de sales de zinc. *Avances en Química*. 6(2), 47-54. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/933/93319737005.pdf>.
10. Chattopadhyay, S. y Condit, W. (2002). *Advances in Encapsulation Technologies for the Management of Mercury-Contaminated Hazardous Wastes*. Recuperado de <http://www.clu-in.org/download/contaminantfocus/mercury/advances-in-encapsulation-600r02081.pdf> (Febrero, 2014)
11. Chen, Q., Tyrer, M., Hills, C., Yang, X. y Carey, P. (2008) Immobilisation of heavy metal in cement-based solidification/stabilisation: A review. *Waste Management* 29(1). 390-403. doi: 10.1016/j.wasman.2008.01.019
12. CONAMA (2005). *Guía para el control y la prevención de la contaminación industrial: Galvanoplastia*. (2da ed.). Santiago, Chile: Conama.
13. Concejo de Distrito Metropolitano de Quito, (2014a). Ordenanza Metropolitana No 404. Quito. Ecuador
14. Concejo del Distrito Metropolitano de Quito, (2014b). Norma técnica de desechos peligrosos o especiales de la Ordenanza Metropolitana No 404. Quito. Ecuador.
15. Concejo del Distrito Metropolitano de Quito, (2014c). Norma técnica para el control de descargas líquidas de la Ordenanza Metropolitana No 404. Quito. Ecuador.
16. Crookes, R. (2007). *Picking and Passivating Stainless Steel*. Recuperado de [http://www.euro-inox.org/pdf/map/Passivating\\_Pickling\\_EN.pdf](http://www.euro-inox.org/pdf/map/Passivating_Pickling_EN.pdf). (Abril 2014)

17. Czurda, K. (2006). Encapsulation parameters in waste deposit technology: Geologic barriers and liner systems. *Geo Alp*, 3, 207-214.
18. Delvasto P., Casal J., González J., Durán N., Dominguez J. y Moncada P. (2012) Caracterización de residuos sólidos procedentes de dos procesos distintos de galvanizado en caliente por inmersión. *Revista de metalurgia*, 48(1), 33-44. doi: 10584494
19. EPA. (1992). Method 1311: Toxicity Characteristics Leaching Procedure, Recuperado de <http://www.epa.gov/osw/hazard/testmethods/sw846/pdfs/1311.pdf>. (Enero, 2014)
20. EPA. (1996). Stabilization/Solidification Processes for Mixed Waste. Recuperado de <http://www.epa.gov/radiation/docs/mixed-waste/402-r-96-014.pdf>. (Enero, 2014)
21. EPA (2002) *Permeation and Leaching*. Recuperado de [http://www.epa.gov/safewater/disinfection/tcr/pdfs/whitepaper\\_tcr\\_permation-leaching.pdf](http://www.epa.gov/safewater/disinfection/tcr/pdfs/whitepaper_tcr_permation-leaching.pdf) (Abril, 2014)
22. EPA (2003) *Manejando sus residuos peligrosos*. Recuperado de <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockey=P100014O.PDF> (Enero, 2014)
23. EPA (2005) *Introduction to hazardous waste identification*. Recuperado de <http://www.epa.gov/wastes/inforesources/pubs/training/hwid05.pdf> (Enero, 2014)
24. EPMMQ (2012) *Estudio de impacto ambiental de la primera línea del metro de quito: Línea Base*. Recuperado de [http://www.metrodequito.gob.ec/web/pdfs/06\\_Linea\\_Base.pdf?bcsi\\_scan\\_a306d6fb0a28ba95=0&bcsi\\_scan\\_filename=06\\_Linea\\_Base.pdf](http://www.metrodequito.gob.ec/web/pdfs/06_Linea_Base.pdf?bcsi_scan_a306d6fb0a28ba95=0&bcsi_scan_filename=06_Linea_Base.pdf). (Octubre 2014)
25. Félix F., Fraaiji A. y Hendriks Ch. (2001). Comparison of stabilization/solidification treatments of hazardous waste materials.

- Heron Journal*. 46(2). 119-133. Recuperado de <http://heronjournal.nl/46-2/5.pdf> (Enero, 2014)
26. Flores, J. (2006). Estabilización de cenizas producto de la incineración de residuos peligrosos. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Químico). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
  27. Freeman, D. (1986). *Phosphating and metal pre-treatment*. (1era ed.). Londres, Gran Bretaña: Industrial Press Inc.
  28. Frías, C., y Perez, O. (2001). Recuperación de ácidos y metales en baños agotados del decapado de aceros inoxidable. *Revista de metalurgia*. 34(1). 427-431. Recuperado de <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/viewFile/786/797> (Abril, 2014)
  29. Fundes. (2003). *Guía de buenas prácticas para el sector de galvanotecnia*. Recuperado de <file:///C:/Users/eccallel/Documents/Documentos%20de%20interes/Fundes%20Buenas%20Practicas.pdf>. (Julio, 2014)
  30. Galvanizers Association. (2012). *The coating*. Recuperado de <http://www.galvanizing.org.uk/technical/the-coating/>. (Noviembre, 2014)
  31. Gonzalez, M. (2012). *Protección de superficies*. Recuperado de <http://site.ebrary.com.bvirtual.epn.edu.ec/lib/epnsp/docDetail.action?docID=10693189&page=44> (Noviembre, 2013)
  32. Gomes, J. y Pinto, G. , (2006). Leaching of heavy metals from steelmaking slags. *Revista de Metalurgia*. 42(6). 409-416. Recuperado de [http://www.researchgate.net/publication/44200314\\_Leaching\\_of\\_heavy\\_metals\\_from\\_steelmaking\\_slags/file/79e4150c1f64f08d37.pdf](http://www.researchgate.net/publication/44200314_Leaching_of_heavy_metals_from_steelmaking_slags/file/79e4150c1f64f08d37.pdf) (Enero, 2014)

33. Gupta, S. y Surwade, M. (2007). *Inmobilization of heavy metals from steel plating industry sludge using cement as binder at different pH*. Recuperado de <http://www.bvsde.paho.org/bvsaar/cdlodos/pdf/immobilizationofheavy773.pdf> (Junio, 2014)
34. 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). 119-127. Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389411013057> (Febrero 2014)
35. 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>. (Febrero, 2014)
36. IHOBE. (2001). *Libro blanco para la minimización de residuos y emisiones: Galvanizado en caliente*. (1era ed.). Valencia, España: Eusko Jaularitza.
37. INECYC. (2011). Notas técnicas hormigón de alto desempeño. Recuperado de [http://inecyc.org.ec/documentos/notas\\_tecnicas/ALTO\\_DESEMPENO .pdf](http://inecyc.org.ec/documentos/notas_tecnicas/ALTO_DESEMPENO.pdf) (Junio, 2013)
38. INEN 1485. (1987a). Norma Técnica Ecuatoriana: Adoquines. Determinación de la Resistencia a la compresión. Recuperado de <https://law.resource.org/pub/ec/ibr/ec.nte.1485.1987.pdf>. (Septiembre, 2013)
39. INEN 1488. (1987b). Norma Técnica Ecuatoriana: Adoquines. Requisitos. Recuperado de <https://law.resource.org/pub/ec/ibr/ec.nte.1488.1987.pdf>. (Septiembre, 2013)

40. Infante, O. (2013). *Galvanizado en caliente y en frío*. Recuperado de <http://www.asimet.cl/galvanizado.htm> (Diciembre, 2013)
41. Junta de Andalucía, (2013) *Guía de apoyo para la notificación de las emisiones procedentes del tratamiento superficial de piezas metálicas y plásticos*. Recuperado de [http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal\\_web/administracion\\_electronica/Tramites/Vigilancia\\_Preencion/Modelos/EPRTR/Modelos/Guias\\_apoyo/Guia\\_Ep2ciiii\\_2f\\_Tratamiento\\_Superficial\\_Piezas\\_Metalicas\\_Plasticos.pdf](http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal_web/administracion_electronica/Tramites/Vigilancia_Preencion/Modelos/EPRTR/Modelos/Guias_apoyo/Guia_Ep2ciiii_2f_Tratamiento_Superficial_Piezas_Metalicas_Plasticos.pdf) (Abril, 2014)
42. La Grega, M., Buckingham, P., Evans, J. (1996) *Gestión de Residuos Tóxicos, tratamiento, eliminación y recuperación de suelos*, (1era. ed.) Mexico: McGraw Hill.
43. LATIZA. (2007). *Galvanizado Continuo por Inmersión en Caliente comparado con el Galvanizado General (por Lotes)*. Recuperado de [http://latiza.com/archivos\\_publicar/galvinfo/GalvInfoNote2\\_3.pdf](http://latiza.com/archivos_publicar/galvinfo/GalvInfoNote2_3.pdf). (Septiembre, 2014)
44. Lieu, D. y Lipták, B. (2000) *Hazardous Waste and Solid*. (1era. ed.) Estados Unidos de América: Lewis Publishers.
45. Luque, J. (2011). *Operaciones básicas y procesos automáticos de fabricación mecánica: operaciones auxiliares de fabricación mecánica (UF0442)*. Recuperado de <http://site.ebrary.com.bvirtual.epn.edu.ec/lib/epnsp/docDetail.action?docID=10721617&p00=trefilado> (Diciembre, 2013)
46. Maaß, P. y Peißker, P. (2011). *Handbook of Hot Dip Galvanization*. doi: 10.1002/9783527636884
47. Malviya, R. y Chaudhary, R. (2006). Evaluation of leaching characteristics and environmental compatibility of solidified/stabilized industrial waste. *Journal of Mater Cycles Waste Management*. 8(1). 78-87. Recuperado



- de <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10163-005-0139-0>.  
(Febrero, 2014)
48. Manserco. (2014). Maquinas vibrocompactadoras. Recuperado de [http://www.manserco.com.ve/index.php?seccion=maquinas\\_vibrocompactadoras\\_1](http://www.manserco.com.ve/index.php?seccion=maquinas_vibrocompactadoras_1). (julio, 2014)
  49. Martínez, J. (2005). *Guía para la gestión integral de residuos peligrosos: Fundamentos*. Recuperado de [http://www.ccbasilea-crestocolmo.org.uy/wp-content/uploads/2010/11/gestion\\_r01\\_fundamentos.pdf](http://www.ccbasilea-crestocolmo.org.uy/wp-content/uploads/2010/11/gestion_r01_fundamentos.pdf). (Julio, 2014)
  50. McCabe, W., Smith, J. y Harriot, P. (2007). Operaciones de Ingeniería Química. (7ma ed.). México DF: Mc Graw Hill.
  51. Ministerio de ambiente del Ecuador. (2012). Prestadores de servicio (gestores) para el manejo de materiales peligrosos (sustancias químicas peligrosas y/o desechos peligrosos). Recuperado de <file:///E:/Documentos%20de%20interes/Gestores%20autorizados.pdf>. (Septiembre, 2014)
  52. Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, (2007), *Gestión integral de residuos o desechos peligrosos, Bogotá DC, Colombia*. Recuperado de <http://preparativosyrespuesta.cridlac.org/XML/spa/doc18932/doc18932-contenido.pdf> (Enero, 2014)
  53. Molera, P. (2009). *Tratamientos térmicos de los metales*. doi: 10316635
  54. Narayanan, S. (2005). Surface pretreatment by phosphate conversion coatings. *National Metallurgy*. 9(1), 130-177. Recuperado de [http://www.ipme.ru/e-journals/RAMS/no\\_2905/narayanan.pdf](http://www.ipme.ru/e-journals/RAMS/no_2905/narayanan.pdf) (Abril, 2014)
  55. Newel, J. (2010). *Ciencia de materiales aplicaciones en ingeniería*. doi: 10740901

56. Palacio, L., Tapia H., Saldarriaga, C. (2005) *Métodos y algoritmos de diseño en ingeniería química*. Recuperado de [http://books.google.com/books?id=elxZGIxhek4C&dq=dise%C3%B1o+de+plantas+industriales+dimensionamiento+de+equipos&source=gb\\_s\\_navlinks\\_s](http://books.google.com/books?id=elxZGIxhek4C&dq=dise%C3%B1o+de+plantas+industriales+dimensionamiento+de+equipos&source=gb_s_navlinks_s). (Noviembre, 2014)
57. PNUMA, Distrito Metropolitano de Quito y FLACSO, (2011) *Perspectivas del ambiente y cambio climático en el medio urbano*. ECCO Quito. Recuperado de [http://www.unep.org/dewa/Portals/67/pdf/ECCO\\_DM\\_Quito.pdf?bcsi\\_scan\\_a306d6fb0a28ba95=0&bcsi\\_scan\\_filename=ECCO\\_DM\\_Quito.pdf](http://www.unep.org/dewa/Portals/67/pdf/ECCO_DM_Quito.pdf?bcsi_scan_a306d6fb0a28ba95=0&bcsi_scan_filename=ECCO_DM_Quito.pdf). (Agosto, 2014)
58. Ragam, W. (2013). Utilization of polymer stabilization for improvement of clay microstructures. *Applied clay science*. 93(1). 94-101. doi: 10.1016/j.clay.2014.03.006
59. Regel, M. (2010). A review on methods of regeneration of spent pickling solutions from steel processing. *Journal of Hazardous Materials*. 177(1). 57-69. doi:10.1016/j.jhazmat.2009.12.043
60. Rihm, A., Arellano, J. y Sancha, A. (2002) *Uso del test de lixiviación para caracterización de residuos del área minera y reflexiones sobre gestión de residuos en América Latina*. Recuperado de <file:///C:/Users/eccallel/Documents/Documentos%20de%20interes/USO%20de%20TCLP%20y%20reflesiones%20en%20America%20Latina.pdf>. (Agosto, 2014)
61. Secretaria Distrital de Ambiente de Bogotá y Universidad Distrital Francisco José de Caldas. (2010) *Guía para la gestión y manejo integral de residuos: Industria Metalmeccánica*. (1era ed.). Bogotá, Colombia: Editorial
62. Sinha, P. y Feser, R. (2002). Phosphate coating on steel surfaces by an electrochemical method. *Surface and coating technology*. 161(1). 158-

168. Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/sci-hub.org/science/article/pii/S0257897202005212> (Abril, 2014)
63. Silveira, R., Cassel, E., Ferreira, C. y Schermman, D. (2013) Black wattle tanin as a zinc phosphating coating selaer. *Surface and Interface Analysis*. 46(1), 1-6. doi: 10.1002/sia.5345
64. Tsai, L., Hwang, M. (2011). *Materials Science and Technologies: Thermoplastic and Thermosetting Polymers and Composites*. doi: 10683060
65. Van der Sloot, H., de Groot, G. y Wijkstra, J. (1989). Leaching Characteristics of Construction Materials and Stabilization Products Containing Waste Materials. *Environmental Aspects of Stabilization and Solidification of Hazardous and Radioactive Wastes*. 125-149. doi: 10.1520/STP22875S
66. Vásquez, A., Damborenea, J. (2001). *Ciencia e Ingeniería de Superficie de los materiales metálicos*. (1era ed.). Madrid. España: CSIC
67. Ucaroglu S. y Talinli L. (2012). Recovery and safer disposal of phosphate coating sludge by solidification/stabilization. *Journal of Environmental Management*. 105(1). 131-137. doi: 10.1016/j.jenvman.2012.03.029
68. Watropur. (2004). Watromat® Low temperature batch and continuous drying systems. Recuperado de [http://www.watropur.com/fileadmin/media/contact/1\\_england.pdf](http://www.watropur.com/fileadmin/media/contact/1_england.pdf). (Julio, 2014)
69. Wilk, C. (2008). *Applying Solidification/Stabilization for Sustainable Redevelopment of Contaminated Property*. Recuperado de [http://www.pollutionengineering.com/ext/resources/PE/Home/Files/PDFs/PCA\\_S-S005FWhitepaper.pdf?1354286601](http://www.pollutionengineering.com/ext/resources/PE/Home/Files/PDFs/PCA_S-S005FWhitepaper.pdf?1354286601) (Enero, 2014)
70. Woods, R. y Cole, J. (1996). *Galvanizing Handbook*. Recuperado de [http://www.zaclon.com/pdf/zaclon\\_galvanizing\\_handbook.pdf](http://www.zaclon.com/pdf/zaclon_galvanizing_handbook.pdf) (Diciembre, 2013)

71. 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 Environmental Sciences*. 27(1), 201-212. Recuperado de <http://journals.tubitak.gov.tr/engineering/issues/muh-03-27-3/muh-27-3-7-0209-2.pdf> (Enero, 2014)
  
72. Zaki, A. (2006). *Principles of corrosion engineering and corrosion control*. Recuperado de <http://site.ebrary.com.bvirtual.epn.edu.ec/lib/epn/docDetail.action?docID=10186267&page=424> (Noviembre, 2013)

## **ANEXOS**

## ANEXO I

### RESUMEN DE TEST ESTÁNDAR PARA LA DETERMINACIÓN NIVEL LABORATORIO DE AGUA (HUMEDAD) CONTENIDA EN SÓLIDOS Y ROCAS MEDIANTE DIFERENCIA DE MASA.

#### ASTM Internacional Designación D2216-10

#### 1. Resumen del método

Un espécimen para prueba es secado en horno a una temperatura de  $110 \pm 5$  °C hasta una masa constante. La pérdida de agua durante el secado es considerada agua. El contenido de agua se calcula utilizando la masa de agua y la masa de espécimen seco.

#### 2. Procedimiento

- 2.1 Determine y registre la masa de un recipiente seco y su tapa.
- 2.2 Seleccione una muestra representativa del espécimen de acuerdo a la Tabla AI.1

**Tabla AI. 1** Requerimiento mínimo de masa para un espécimen de prueba

Máximo tamaño de partícula	Sensibilidad de la balanza	Método B	
		Contenido de Agua registrado al $\pm 0,1\%$	
75,00 mm	3 in.	50 kg	10
37,50 mm	1 ½ in	10 kg	10
19,00 mm	¾ in	2,5 kg	1
9,50 mm	3/8 in	500 g	0,1
4,75 mm	No 4	200 g	0,1
2,00 mm	No. 10	20 g	0,1

- 2.3 Ponga la muestra en el recipiente y, si utiliza, asegure la tapa en posición. Determine la masa del contenedor y el espécimen húmedo utilizando la

balanza seleccionada con base en la masa del espécimen requerida así como sus cifras significativas.

- 2.4 Remueva la tapa, si existe, y coloque el contenedor con la muestra en el horno secador. Mantenga la temperatura del horno en  $110 \pm 5$  °C a menos que se especifique lo contrario. El tiempo requerido para obtener una masa seca constante va a depender del tipo de material, tamaño del espécimen, tipo de horno y capacidad. En muchos casos, secar un espécimen por toda la noche es necesario, especialmente cuando se utiliza horno con convección de aire.
- 2.5 Cuando se ha alcanzado una masa constante seca, remover el contenedor del horno. Deje secar el recipiente a temperatura ambiente y determine la masa del contenedor junto con la muestra seca. Registre este valor.

### 3. Cálculos

Calcule el contenido de agua del material como sigue:

$$w = \left[ \frac{(M_{cms} - M_{cds})}{(M_{cms} - M_c)} \right] \times 100 = \left( \frac{M_w}{M_s} \right) \times 100 \quad [AI.1]$$

Donde.

$w$ : contenido de agua, %

$M_{cms}$ : masa del recipiente y la mezcla húmeda, g

$M_{cds}$ : masa del recipiente y la mezcla seca, g

$M_c$ : masa del recipiente, g

$M_w$ : masa de agua, g

$M_s$ : masa de la mezcla seca, g

## ANEXO II

### SECUENCIA DE CÁLCULO PARA ELABORACIÓN DE CURVA DE SECADO

Para la elaboración de la curva de secado se efectuó 3 réplicas del experimento especificado en la sección 2.1.4. Los resultados obtenidos correspondientes a la masa del recipiente cerámico con la muestra húmeda  $M_{cms}$  para cada tiempo se muestran en la Tabla II.1 para el lodo de fosfato y enfrió.

**Tabla II. 1** Resultados de la masa de recipiente cerámico por réplica para los lodos de fosfato

Tiempo (min)	Fosfato			Enfrió		
	Masa Réplica 1 (g)	Masa Réplica 2 (g)	Masa Réplica 3 (g)	Masa Réplica 1 (g)	Masa Réplica 2 (g)	Masa Réplica 3 (g)
0	468,79	448,34	419,77	390,55	411,74	405,93
30	466,37	445,31	416,41	388,66	410,37	403,38
60	457,45	433,53	406,25	380,25	403,14	393,52
90	443,56	417,29	393,89	366,88	389,79	380,32
120	429,76	403,58	382,4	353,92	376,39	366,45
150	417,39	391,70	371,22	341,29	363,44	354,15
180	406,65	382,94	363,12	328,71	352,26	342,22
210	400,86	379,76	359,49	318,21	341,43	331,70
240	398,71	378,69	357,10	307,44	330,30	322,24
270	397,84	378,05	355,80	298,65	322,30	314,93
300	397,19	377,57	355,03	290,17	312,66	307,33
330	396,87	377,34	354,03	283,95	305,55	302,45
360	396,60	377,16	354,17	278,29	300,33	298,66
390	396,35	376,89	353,77	275,19	297,21	296,53
420	396,18	376,76	353,56	274,27	296,28	295,65
450	396,02	376,57	353,32	273,99	296,03	295,28
480	395,91	376,44	353,12	273,87	295,89	295,08
510	395,75	376,32	352,99	273,80	295,78	294,97
<b>Tara</b>	281,99	262,37	252,89	250,91	272,03	266,14

A partir de la masa del recipiente con la muestra húmeda determinada para cada tiempo  $t$ , y el valor del recipiente vacío (tara) se calculó el porcentaje de humedad en base húmeda con la ecuación 2.1.



*Ejemplo de cálculo:*

Para el tiempo 0 de la réplica 1 del lodo de fosfato

$$w = \left[ \frac{(M_{cms} - M_{cds})}{(M_{cms} - M_c)} \right] \times 100 = \left[ \frac{(468,79 - 395,76)}{(468,79 - 281,99)} \right] \times 100 = \left( \frac{73,03}{186,6} \right) \times 100 = 39,15 \%$$

Los resultados se muestran en la Tabla II.2.

**Tabla II. 2** Humedades base húmeda por réplica de los lodos de fosfatado y enfrió

Tiempo (min)	Fosfato			Enfrió		
	Humedad base húmeda Réplica 1 (%)	Humedad base húmeda Réplica 2 (%)	Humedad base húmeda Réplica 3 (%)	Humedad base húmeda Réplica 1 (%)	Humedad base húmeda Réplica 2 (%)	Humedad base húmeda Réplica 3 (%)
0	39,15	38,75	40,08	83,67	83,03	79,38
30	38,35	37,73	38,85	83,44	82,86	78,99
60	35,22	33,45	34,80	82,36	81,92	77,37
90	29,65	26,47	29,09	80,33	79,87	74,75
120	23,08	19,33	22,79	77,86	77,28	71,26
150	16,05	11,92	15,50	74,76	74,06	67,24
180	8,82	5,52	9,29	70,68	70,45	62,11
210	4,37	2,96	6,20	66,11	65,84	56,03
240	2,61	2,07	4,05	59,65	59,31	48,61
270	1,88	1,53	2,84	52,22	52,83	40,91
300	1,33	1,12	2,10	41,90	41,64	30,01
330	1,05	0,92	1,14	30,96	29,27	20,60
360	0,82	0,77	1,27	16,69	16,22	11,35
390	0,60	0,53	0,88	6,05	5,84	5,13
420	0,46	0,42	0,68	2,35	2,23	2,30
450	0,32	0,25	0,44	1,17	1,21	1,06
480	0,22	0,14	0,24	0,65	0,63	0,38
510	0,08	0,04	0,11	0,35	0,17	0,12

Para poder elaborar la curva de contenido de humedad en función del tiempo se calculó la humedad en base seca correspondiente a cada humedad en base húmeda para cada tiempo t. Para el efecto, se utilizó la ecuación 2.2.

*Ejemplo de cálculo:*

Para el tiempo 0 de la réplica 1 del lodo de fosfato

$$X_t = \frac{1}{1 - \frac{39,15}{100}} = 0,643$$

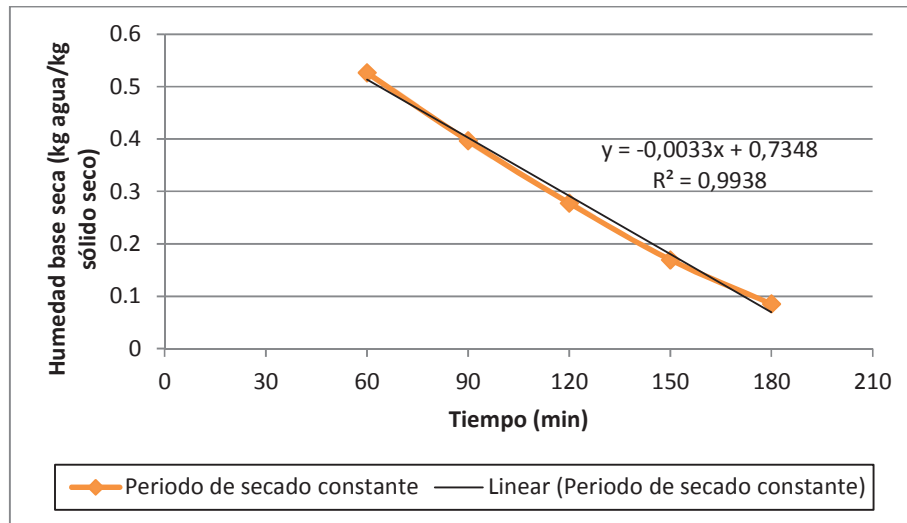
Los resultados se presentan en la Tabla II.3.

**Tabla II. 3** Humedades base seca por réplica de los lodos de fosfatado y enfrió

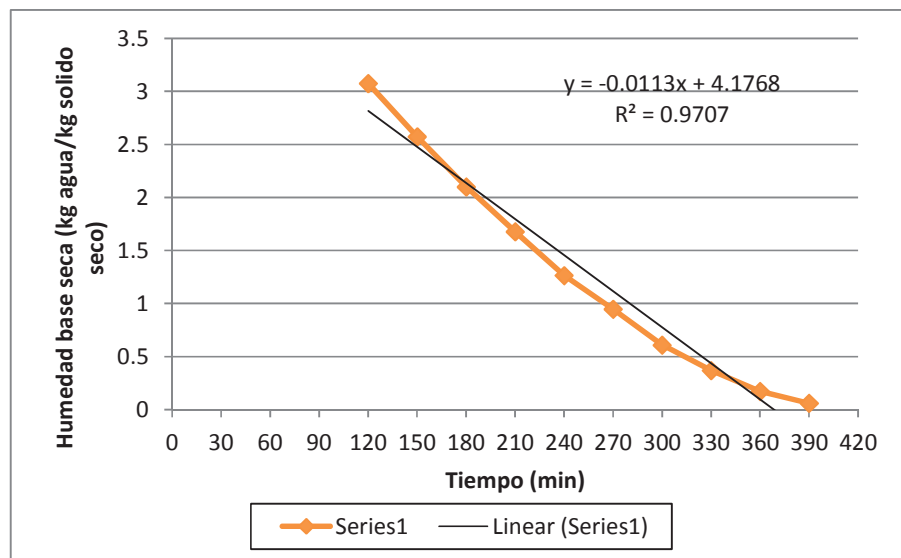
Tiempo (min)	Fosfato			Enfrió		
	Humedad base seca Réplica 1 (%)	Humedad base seca Réplica 2 (%)	Humedad base seca Réplica 3 (%)	Humedad base seca Réplica 1 (%)	Humedad base seca Réplica 2 (%)	Humedad base seca Réplica 3 (%)
0	0,643	0,633	0,669	5,122	4,892	3,849
30	0,622	0,606	0,635	5,039	4,835	3,760
60	0,544	0,503	0,534	4,670	4,530	3,418
90	0,421	0,360	0,410	4,084	3,967	2,960
120	0,300	0,240	0,295	3,516	3,402	2,479
150	0,191	0,135	0,183	2,962	2,855	2,053
180	0,097	0,058	0,102	2,411	2,384	1,639
210	0,046	0,031	0,066	1,950	1,927	1,274
240	0,027	0,021	0,042	1,478	1,458	0,946
270	0,019	0,016	0,029	1,093	1,120	0,692
300	0,013	0,011	0,022	0,721	0,714	0,429
330	0,011	0,009	0,012	0,448	0,414	0,259
360	0,008	0,008	0,013	0,200	0,194	0,128
390	0,006	0,005	0,009	0,064	0,062	0,054
420	0,005	0,004	0,007	0,024	0,023	0,024
450	0,003	0,003	0,004	0,012	0,012	0,011
480	0,002	0,001	0,002	0,007	0,006	0,004
510	0,001	0,000	0,001	0,004	0,002	0,001

Con estos datos se elaboró las Figuras 3.1 y 3.2 que se encuentran en sección 3.1.4 de la discusión de resultados. Para poder determinar las pendientes de las tangentes en cada punto, se elaboro una gráfica de humedad en base seca media en función del tiempo para ambos lodos. A continuación, se determinó el valor de la derivada de la humedad en función del tiempo, con este objetivo, se dividió a cada gráfica en 3 secciones y se realizó una regresión mediante el software MS

Excel para determinar la ecuación que satisface a cada porción de las Figura 3.1 y 3.2, respectivamente. A manera de ejemplo, se muestra la regresión elaborada para los periodos de secado constante en la curva de contenido de humedad en función del tiempo del lodo de fosfato y el lodo de enfrió.



**Figura II. 1** Regresión del periodo de secado constante lodo de fosfato



**Figura II. 2** Regresión del periodo de secado constante lodo de enfrió

Utilizando el valor de la pendiente que resulta de la regresión, se calculó la velocidad de secado utilizando la ecuación 2.3.

*Ejemplo de cálculo:*

Para la humedad en base seca media equivalente a 0,277, correspondiente a los 120 min de secado experimental.

$$R = -\frac{M_s}{A} \left( \frac{dX}{dt} \right) = \frac{113,34 \text{ g solido seco}}{86,59 \text{ cm}^2} \left( 0,0033 \frac{\text{g agua. min}}{\text{g solido seco}} \right) = 0,0043 \frac{\text{g agua}}{\text{min. cm}^2}$$

$$= 0,0071 \frac{\text{kg agua}}{\text{s. m}^2}$$

La masa de sólido seco  $M_s$  se determinó restando la masa del recipiente cerámico con la muestra seca menos la masa del recipiente cerámico tarado.

$$M_s = 468,79 - 281,99 = 113,34 \text{ g}$$

El área expuesta al secado  $A$  se calculó conociendo las medidas del recipiente cerámico donde se realizó el ensayo experimental y asumiendo que tiene la forma de una circunferencia.

Diámetro del recipiente cerámico = 10,5 cm

$$A = \pi \times \left( \frac{d}{2} \right)^2 = \pi \times \left( \frac{10,5 \text{ cm}}{2} \right)^2 = 86,59 \text{ cm}^2$$

La pendiente de la tangente  $\frac{dX}{dt}$  se determinó a partir de la Figura II.1 equivalente a 0,0033 g agua. min/g solido seco.

De esta manera se determinó las velocidades de secado para ambos lodos en función de la humedad en base seca media. Los resultados se muestran en las Tablas II.4 y son los que se utilizaron para elaborar las Figuras 3.3 y 3.4 presentadas como resultado en el capítulo 3.

**Tabla II. 4** Velocidades de secado y humedades en base seca para los lodos de fosfato y enfrió

Fosfato		Enfrió	
Humedad base seca Media (%)	Velocidad de secado (kg agua/m <sup>2</sup> s)	Humedad base seca Media (%)	Velocidad de secado (kg agua/m <sup>2</sup> s)
0,278	7,20E-04	2,574	5,47E-04
0,169	7,20E-04	2,100	5,47E-04
0,085	7,20E-04	1,678	5,47E-04
0,047	7,20E-04	1,265	5,47E-04
0,030	1,26E-04	0,948	5,47E-04
0,021	6,34E-05	0,609	5,47E-04
0,015	4,26E-05	0,369	3,16E-04
0,010	3,58E-05	0,173	1,82E-04
0,010	6,23E-06	0,060	5,91E-05
0,007	2,08E-05	0,023	1,92E-05
0,005	1,15E-05	0,012	9,73E-06
0,003	1,33E-05	0,006	6,19E-06
0,002	9,96E-06	0,002	2,79E-06

## ANEXO III

# RESUMEN DE TEST ESTÁNDAR PARA LA DETERMINACIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA DE SÓLIDOS POR PICNÓMETRO DE AGUA

### ASTM Internacional Designación D854-10

#### 1. Aparatos

- 1.1 Picnómetro- El picnómetro de agua puede ser un frasco tapado, un frasco con tapa de yodo o un matraz aforado con una capacidad mínima de 250 mL. El volumen del picnómetro debe ser 2 a 3 veces más grande que el volumen de mezcla agua-sólido.
- 1.2 Balanza-La balanza debe cumplir con los requerimientos de la guía D4753 para una balanza de 0,01 g de sensibilidad. Cuando se utiliza picnómetros de 250 mL, la capacidad de la balanza debe ser de 500 g.
- 1.3 Horno secador-Horno con control de temperatura, capaz de mantener una temperatura uniforme de  $110 \pm 5$  °C en toda la cámara.
- 1.4 Termómetro- capaz de medir temperaturas dentro del rango en el cual será aplicado en ensayo teniendo una sensibilidad de 0,1 °C y un error máximo permisible de 0,5 °C. Debe ser capaz de ser sumergido en la muestra entre 25 y 80 mm.
- 1.5 Desecador- Un gabinete desecador o un desecador grande que contenga silica gel o sulfato de calcio anhidro.
- 1.6 Removedor de aire atrapado- para remover aire atrapado de la siguiente manera
  - 1.6.1 Plancha de calentamiento o mechero bunsen
  - 1.6.2 Sistema de vacío-una bomba de vacío o aspirador de agua capaz de provocar un vacío de 100 mm de mercurio.

#### 2. Reactivos

- 2.1 Agua pura- Destilada debe ser utilizada en este método.

### 3. Espécimen de ensayo

El espécimen de ensayo debe ser sólido secado en horno y debe ser representativo de los sólidos que pasan la malla 4.75 mm (no 4). La Tabla 1 provee directrices de las cantidades recomendadas en el ensayo en función del tipo de sólidos y tamaño del picnómetro.

**Tabla AII. 1 Masa recomendada para espécimen**

<b>Tipo de sólido</b>	<b>Masa seca de espécimen (g) Para picnómetro de 250 mL</b>	<b>Masa seca de espécimen (g) Para picnómetro de 500 mL</b>
<b>SP, SP-SM</b>	60 ± 10	100 ± 10
<b>SP-SC, SM, SC</b>	45 ± 10	75 ± 10
<b>Limo o arcilla</b>	35 ± 10	50 ± 10

### 4. Calibración del picnómetro

- 4.1 Determinar la masa de un picnómetro con sensibilidad de 0,01 g. Repetir este procedimiento 5 veces con una misma balanza. Registre la desviación estándar que debe ser menor a 0,02 g. Caso contrario cambie de balanza.
- 4.2 Llene el picnómetro con agua desaireada hasta un volumen menor o mayor a la marca de calibración dependiendo del tipo de picnómetro y la preferencia del laboratorio de añadir o retirar agua.
- 4.3 calibre 6 picnómetros diferentes. Ponga el picnómetro en el contenedor aislante con el termómetro hasta que llegue a equilibrio térmico. La temperatura de equilibrio del agua debe ser entre 4 °C mayor o menor a la temperatura ambiente entre 15 y 3 °C.
- 4.4 Ajuste el volumen hasta la marca de calibración, si se debe añadir agua utilice la del contenedor. Si se debe remover agua, hágalo con una toalla de papel. Mide la masa del picnómetro.
- 4.5 Mida y registre la temperatura del agua utilizando el termómetro. Repita para todos los picnómetros.
- 4.6 Repita el procedimiento hasta tener un total de 5 medidas diferentes de los picnómetros llenos y su temperatura.
- 4.7 Utilizando los datos, calcule el volumen del picnómetro de la siguiente manera.

$$V_p = -\frac{(M_{pw,c} - M_p)}{\rho_{w,c}} \quad [\text{AII.1}]$$

Dónde.

$M_{pw,c}$ : Masa del picnómetro lleno de agua a la temperatura de calibración

$M_p$ : Masa promedio del picnómetro seco calibrado

$\rho_{w,c}$ : Densidad del agua a la temperatura de calibración

## 5. Procedimiento

5.1 Masa picnómetro- Utilizando la misma balanza que se usó para calibrar el picnómetro, verifique que la masa del picnómetro están dentro de 0,06 g de la masa calibrada.

5.2 *Método B*- Procedimiento para especímenes secados en horno

5.2.1 Seque el espécimen hasta una masa constante a  $110 \pm 5$  °C. Rompa cualquier grumo presente en el sólido con un mortero y un pistilo. Si el sólido no se dispersa fácilmente utilice el método A.

5.2.2 Ponga un embudo en el picnómetro. La boca debe estar en una posición más abajo que la marca de calibración del mismo. Ponga los sólidos directo en el embudo. Enjuague cualquier partícula residual con agua.

5.3 *Formación del lodo*- Añada agua hasta que el agua este a 1/3 o 1/2 de la profundidad del picnómetro. Agite el agua hasta que se forme lodo. Si se forma una pasta viscosa utilice un picnómetro con mayor volumen.

5.4 Desaireado del lodo- El aire atrapado en el lodo puede ser removido por calor o aplicación de vacío.

5.4.1 Si se utiliza calor, colocar el picnómetro en una plancha calefactora durante mínimo 1 h después de que hierva el agua contenida en el picnómetro. Durante este proceso el lodo debe ser agitado en caso de ser necesario.



5.5 Llenado del picnómetro con agua- Si se utiliza un matraz aforado, llene el frasco hasta que la base esté sumergida en agua. Deje que el picnómetro se enfríe hasta temperatura ambiente.

5.5.1 Coloque el termómetro en el picnómetro dentro de un recipiente aislante. Déjelos por un tiempo hasta que alcancen el equilibrio térmico.

5.6 Determinación de la masa del picnómetro- Si se utiliza un matraz aforado, llene con agua hasta la marca de calibración.

5.6.1 Mida y registre la masa del picnómetro en la balanza.

5.7 Determinación de la temperatura en el picnómetro- Registre la temperatura del lodo con el real más cercano a 0,1 °C utilizando el termómetro.

6. Cálculos

6.1 Calcule la masa del picnómetro y el agua a la temperatura del ensayo de la siguiente manera.

$$M_{\rho w,t} = M_{\rho} + (V_p \cdot \rho_{w,t}) \quad [\text{AII.2}]$$

Donde:

$M_{\rho w,t}$ : masa del picnómetro y agua a la temperatura del ensayo

$M_{\rho}$ : el promedio de la masa del picnómetro seco

6.2 Calcule la gravedad específica del sólido a la temperatura del ensayo así:

$$G_t = \frac{\rho_s}{\rho_{w,t}} = \frac{M_s}{M_{\rho w,t} - (M_{\rho ws,t} - M_s)} \quad [\text{AII.3}]$$

Dónde.

$\rho_s$ : densidad del sólido seco  $\text{mg/m}^3$

$\rho_{w,t}$ : densidad del agua a la temperatura del ensayo que se obtuvo de la tabla

AII.2

$M_s$ : masa del sólido seco (g)

$M_{\rho ws,t}$ : masa del picnómetro, agua y sólidos a la temperatura del ensayo

## ANEXO IV

### RESUMEN DE MÉTODO 1311 CARACTERÍSTICAS DE TOXICIDAD, PROCEDIMIENTO DE LIXIVIACIÓN

#### 1. Resumen del método

- 1.1 Para desechos líquidos (aquellos que contienen menos de 0,5% de sólido seco), el desecho, después de filtración por un filtro de fibra de vidrio de 0.6 a 0.8  $\mu\text{m}$  es el extracto TCLP.
- 1.2 Para desechos que contienen sólido seco mayor o igual a 0,5%, el líquido, si existe es separado de la fase sólida y almacenado para análisis posterior. Se reduce el tamaño de partícula, si necesario. La fase sólida es extraída con un fluido igual a 2 veces el peso de la fase sólida. El fluido de extracción es función de la alcalinidad del residuo. Un extractor especial es necesario para analitos volátiles. Después de la extracción, el extracto líquido es separado de la fase sólida por filtración a través de un filtro de fibra de vidrio de 0,6 a 0,8  $\mu\text{m}$ .
- 1.3 Si compatibles (fases múltiples no forman una combinación) la fase líquida inicial se añade al extracto líquido para ser analizadas juntas.

#### 2. Aparatos y materiales

- 2.1 Aparato de agitación: Debe ser capaz de agitar el recipiente de extracción de manera vertical a  $30 \pm 2$  rpm.
- 2.2 Recipientes de extracción-
  - 2.2.1 Recipiente de extracción sin espacio para aire (ZHE). Utilizado para analizar la movilidad de analitos volátiles.
  - 2.2.2 Recipiente de extracción en botella. Cuando se evalúa analitos no volátiles, un tarro con capacidad suficiente para contener la muestra y el fluido de extracción son suficientes.
- 2.3 Dispositivos de filtración. Para no volátiles, cualquier soporte de filtro capaz de contener un filtro de fibra de vidrio y capaz de soportar la presión

necesaria para lograr la separación. Tamaño mínimo del soporte de filtro debe ser 47 mm.

- 2.4 Filtros. Deben ser de fibra de vidrio borosilicato, no debe contener materiales adicionales y debe tener un tamaño de poro efectivo de 0,6 a 0,8  $\mu\text{m}$  o equivalente. Cuando se evalúa la movilidad de metales, los filtros deben ser lavados con ácido previo a su uso.
- 2.5 pH metros: Este medidor debe tener una sensibilidad de 0,05 unidades a 25 °C.
- 2.6 Balanza de laboratorio
- 2.7 Agitador magnético.

### **3. Reactivos**

- 3.1 Agua
- 3.2 Ácido acético glacial ACS grado analítico

### **4. Fluidos de extracción**

Fluido de extracción # 2. Añadir 5,7 mL de ácido acético glacial a 1 L de agua destilada. Preparada correctamente el pH de este fluido debe ser 2,88  $\pm$  0,05.

### **5. Recolección de la muestra**

- 5.1 Todas las muestras deben ser recolectadas con un plan de muestreo.
- 5.2 No se debe añadir preservantes.
- 5.3 Muestras pueden ser refrigeradas a menos que su refrigeración implique modificaciones en sus propiedades.
- 5.4 TCLP debe hacerse a penas se tome la muestra.

### **6. Procedimiento**

- 6.1 Evaluación preliminar. Realice esta evaluación en mínimo 100 g de desecho. Esta fracción no será sometida a extracción TCLP.
  - 6.1.1 *Determinación preliminar de porcentaje de sólidos:* Si el desecho obviamente no produce líquidos cuando se somete a presión de filtración, proceda a sección 7.1.2

- 6.1.2 *Determinación de si el desecho necesita reducción de tamaño de partícula.* Usando la fracción sólida del desecho, realice una evaluación del tamaño de partícula del sólido. Reducción de partículas se requiere a menos que el sólido tenga un área superficial de 3,1 cm<sup>2</sup> por gramo de material o es capaz de pasar a través de una malla de 9,5 mm.
- 6.1.3 *Determinación del correcto fluido de extracción:* Si el contenido de sólidos en el desecho es superior o igual a 0,5 % y si la muestra será analizada por constituyentes no volátiles, utilice el fluido # 2.

## 6.2 Procedimiento cuando volátiles no están involucrados

Un mínimo de 100 g de muestra es recomendada. Si el desecho contiene 100 % de sólidos realice el siguiente procedimiento.

- 6.2.1 Transfiera el contenido de sólidos a un recipiente de extracción.
- 6.2.2 Determine la cantidad de fluido de extracción que se debe añadir al recipiente como sigue:

$$\text{Peso fluido de extracción} = \frac{20 \times \% \text{ de sólidos} \times \text{peso del desecho filtrado}}{100} \quad [\text{AIII.1}]$$

Lentamente añada esta cantidad de reactivo a la botella o recipiente de extracción. Ciérrela herméticamente y asegúrelo en el dispositivo de rotación, hágalo rotar por 18 ± 2 h a 30 ± 2 rpm. La temperatura ambiente debe ser mantenida en 23 ± 2 °C durante el periodo de extracción.

- 6.2.3 Después de las 18 ± 2 h de extracción, separe el material sólido del material líquido contenido en el recipiente mediante filtración con un filtro de fibra de vidrio. Filtro debe ser lavado con ácido según se especifica en la sección 4.
- 6.2.4 Prepare el extracto TCLP como sigue:
- 6.2.4.1 Si el desecho contaminado no contiene inicialmente líquido, el material filtrado obtenido en la sección 7.2.3 es el extracto TCLP.
- 6.2.5 El extracto TCLP debe ser analizado por métodos analíticos apropiados. El extracto TCLP cuyo análisis será dedicado a metales debe ser acidificado excepto en instancias en las que la acidificación cause pérdida

de los analitos metálicos. Si el análisis del extracto muestra que la concentración de cualquier metal regulado excede la especificada por el nivel máximo permisible, entonces el desecho es peligroso.

7. Compare los valores de concentración obtenidos en el análisis con los niveles regulatorios.

## ANEXO V

### INEN 1 485. ADOQUINES. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA LA COMPRESIÓN

#### 1. OBJETO

1.1 Esta norma establece el método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión en adoquines.

#### 2. ALCANCE

2.1 Esta norma es aplicable a cualquier tipo o forma de adoquín utilizados para tránsito peatonal y tráfico vehicular ligero o pesado.

#### 3. RESUMEN

3.1 El procedimiento que se describe en esta norma se basa en someter un adoquín a la aplicación de una carga creciente de compresión, hasta provocar su falla (se considerará que esta ocurre cuando la muestra no puede soportar más carga).

#### 4. APARATOS DE ENSAYO

4.1 *Máquina de ensayo.* Podrá ser de cualquier tipo confiable, con la capacidad suficiente para efectuar el ensayo y que sea también capaz de aplicar la carga de rotura.

4.2 La máquina de ensayo debe estar equipada con dos placas de acero de dureza mínima Rockwell C 55. La placa superior debe estar provista de una rótula esférica. Las caras de apoyo de las placas deben ser planas dentro de una tolerancia de 0,15 por mil. Las superficies de contacto de las placas deben tener grabadas circunferencias concéntricas de 1 mm de profundidad y de 1 mm de ancho, aproximadamente, para facilitar el centrado de las probetas. El centro de la rótula debe coincidir con el centro de la cara de apoyo. Si el radio de la rótula es

más pequeño que el radio o longitud de la probeta que va a ensayarse, la porción de superficie de apoyo extendida más allá de la rótula tendrá un espesor no menor que la diferencia entre el radio de la rótula y el lado de la probeta. La menor dimensión de la superficie de apoyo será al menos como el diámetro mayor de la rótula, y la superficie de apoyo del bloque tendrá como dimensión mínima lo más cerca + 3% a la mayor dimensión de la probeta que va a ensayarse.

4.3 La parte móvil de la placa superior de apoyo debe permanecer unida a la rótula y tener un movimiento de rotación de 4° en cualquier dirección. La carga de la máquina de ensayo se registra sobre un indicador, que debe estar provisto con una escala graduada en la cual se pueda leer por lo menos con una aproximación de 1 000 N. El indicador debe permitir lecturas con aproximación de 1% para cualquier valor situado dentro del intervalo de carga de la máquina. La aguja indicadora debe tener la longitud suficiente para alcanzar las líneas de graduación. El espesor de la aguja no debe exceder el espacio entre las graduaciones mínimas. Cada indicador debe estar equipado con un cero de ajuste y con dispositivo que registre la carga máxima.

## **5. PREPARACION DE LA MUESTRA**

5.1 Debe elaborarse de conformidad con la Norma INEN 1 484.

## **6. PROCEDIMIENTO**

6.1 Las muestras deben someterse a prueba en condiciones húmedas, después de haber estado almacenadas por lo menos durante 24 horas en agua, a una temperatura de  $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ . Antes de sumergir los adoquines en el agua, será preciso determinar el área suficiente, de acuerdo al método descrito en la Norma INEN 1 486. Las placas de la máquina se limpiarán con un paño y se debe quitar cualquier residuo de arenilla suelto u otro material que se encuentre en las caras de contacto del adoquín. Por otra parte, se refrentará las probetas con capping o triplay de 4 mm de espesor como empaque, el cual se colocará en las caras superiores e inferiores de la muestra, y entre las placas de la máquina y la muestra se colocará una plancha de acero de aproximadamente 25 mm de

espesor, que cubra toda la superficie de la muestra y sea capaz de distribuir uniformemente las cargas.

El adoquín se debe colocar en la máquina con la superficie de desgaste hacia arriba, de manera que los ejes longitudinales y transversales del mismo queden alineados con los ejes de las placas de la máquina. La aplicación de la carga debe ser continua y no intermitente, a una velocidad aproximada de 15MPa por minuto, hasta que no se pueda soportar una carga mayor, debiendo registrarse la carga máxima aplicada. La resistencia a la compresión de cada muestra deberá calcularse, dividiendo la carga máxima para el área total de la cara de contacto del adoquín, representado por  $A_s$ , y multiplicando el resultado por el factor correspondiente, tomado de la Tabla 2 de la Norma INEN 1 488. Dicha resistencia se expresará con una precisión de 1 M Pa.

## 7. CALCULOS

7.1 La resistencia característica se calculará tomando como base los valores propios de las diez unidades que conforman la muestra, como fueron determinadas en el numeral 6. Procedimiento. A su vez la desviación estándar se determinará a partir de la muestra de diez adoquines, utilizando la fórmula:

$$\text{Fórmula 1. } S = \sqrt{\frac{\sum(f_i - f_m)^2}{9}} \quad [\text{AV.1}]$$

$$\text{Fórmula 2. } S = \sqrt{\frac{\sum(f_i)^2 - \frac{(\sum f_i)^2}{10}}{9}} \quad [\text{AV.2}]$$



## ANEXO VI

### INEN 1 488. ADOQUINES. REQUISITOS

#### 1. OBJETO

1.1 Esta norma establece los requisitos necesarios para la fabricación de los adoquines de hormigón, ya sean patentados o rectangulares, empleados en la pavimentación de áreas transitadas por vehículos y peatones.

#### 2. REQUISITOS

2.1 Cemento. El cemento utilizado en la fabricación de adoquines para pavimentación, cumplirá con las especificaciones de la Norma INEN 152.

2.2 Áridos. El árido fino (es decir aquel material que pasa por una malla de 5 mm) no debe contener más de 25% por masa de material soluble en ácidos, ya sea en la fracción retenida, o en la fracción que pasa por una malla de 600  $\mu\text{m}$ . El material soluble en ácidos se define como material que se disuelve en una solución estándar de ácido clorhídrico según la cantidad señalada en la Norma INEN 1 487. Los áridos deben cumplir con las especificaciones de la Norma INEN 872. El tamaño máximo nominal del árido no deberá ser mayor a 1/4 del espesor del adoquín.

2.3 Cenizas volantes. Cuando se haga uso de cenizas volantes, éstas deberán satisfacer las especificaciones de la Norma INEN 1 501. El contenido total de sulfato de la mezcla de hormigón, expresada como  $\text{SO}_4$  deberá exceder del 4% por masa del cemento. El contenido de sulfato se calculará de acuerdo al contenido de aquel elemento en el cemento, en los áridos (donde existe la posibilidad de aplicarlos) y en las cenizas volantes.

2.4 Pigmentos. Cualquier pigmento en la coloración de adoquines deberá cumplir con la Norma BS 1 014 o similar, mientras no exista Norma INEN equivalente.

2.5 Aditivos. Los aditivos no deberán tener ningún efecto nocivo en el hormigón.

2.6 Acabados. El vendedor y el comprador o sus representantes, podrán llegar a un acuerdo en cuanto a acabados de superficies especiales; ahora bien, cualquier capa especial de la superficie se deberá fundir como parte integral del adoquín. Por otra parte, todas las aristas deberán ser uniformes y estar limpias. Al hacer un pedido de productos coloreados, las personas antes referidas, acordarán el color deseado. A su vez, indicarán si el producto estará coloreado total o parcialmente.

2.7 Fabricación. La temperatura del hormigón deberá mantenerse siempre sobre 0°C, bajo las siguientes condiciones:

- a) Ningún material que haya estado a temperaturas menores de 0°C, se podrá usar hasta que esté completamente descongelado;
- b) La temperatura del molde deberá ser mayor de 0°C;
- c) La temperatura del hormigón, al momento de vertido, deberá ser por lo menos de 5°C.

2.8 Almacenamiento. Los adoquines deberán almacenarse, a fin de evitar la excesiva pérdida de humedad, y deberán protegerse de algunos daños, especialmente de aquellos causados por las heladas, durante las primeras etapas de curado.

## 2.9 Dimensiones y tolerancias

2.9.1 Dimensiones. En cuanto al tamaño del adoquín se recomienda que la relación longitud / ancho en el plano no sea mayor de 2,0 y el espesor no deberá ser menor de 60 mm ni mayor de 100 mm. El espesor mínimo para tránsito peatonal será de 60 mm y para tránsito vehicular 80 mm.

### 2.9.2 Tolerancias

2.9.2.1 Tolerancias de espesor. El espesor de cada uno de los 10 adoquines de muestra deberá comprender el valor de  $\pm 3$  mm del espesor nominal.

2.9.2.2 Tolerancia de longitud. La longitud real de cada uno de los diez adoquines de muestra puede tener una tolerancia de  $\pm 2$  mm de la longitud nominal.

2.9.2.3 Tolerancia de ancho. El ancho de cada uno de los diez adoquines de muestra puede tener una tolerancia de  $\pm 2$  mm del ancho nominal.

2.9.2.4 Escudaría. Cada lado deberá ser normal, tanto en la cara superior como la inferior, tomando en cuenta que la diferencia entre las dos lecturas medidas, descritas en la Norma INEN 1 486; (numeral 4. Procedimiento), no exceda de 2 mm. Hay que tener en cuenta que cuando el diseño de un tipo especial de adoquín incluye lados perfilados, su perfil no se desviará más de 2 mm de lo especificado por el fabricante.

2.9.2.5 Superficie de rodamiento. La superficie de rodamiento no deberá ser menor del 70% del área total del plano, cuando aquella sea el área limitada por un radio específico.

## 2.10 Resistencia del adoquín

2.10.1 La resistencia a la compresión característica de los adoquines de la muestra cumplirá con la Tabla AV.1.

**Tabla AV. 1 Valores mínimos de resistencia a la compresión**

Aplicación	Resistencia a la compresión (MPa)*
Peatonal	20
Estacionamiento y calles residenciales	30
Caminos secundarios y calles principales	40

\*Ensayo de compresión a los 28 días (INEN 1488, 1987b, p. 3)