

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**PROPUESTA DE MANEJO DE RESIDUOS QUÍMICOS
GENERADOS EN PROCESOS ELECTROLÍTICOS DE
NIQUELADO Y CROMADO**

PRESENTADO POR:

NÉSTOR EDUARDO DARDÓN ORELLANA

MARCOS DE JESÚS GONZÁLEZ RUBIO

ANTONIO JOSÉ RIVERA CALDERÓN

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, MARZO 2016

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR INTERINO :

LIC. JOSÉ LUIS ARGUETA ANTILLÓN

SECRETARIA GENERAL :

DRA. ANA LETICIA ZAVALETA DE AMAYA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO :

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

SECRETARIO :

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

DIRECTOR :

ING. RIGOBERTO VELÁSQUEZ PAZ

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO MECÁNICO

Título :

**PROPUESTA DE MANEJO DE RESIDUOS QUÍMICOS
GENERADOS EN PROCESOS ELECTROLÍTICOS DE
NIQUELADO Y CROMADO**

Presentado por :

NÉSTOR EDUARDO DARDÓN ORELLANA

MARCOS DE JESÚS GONZÁLEZ RUBIO

ANTONIO JOSÉ RIVERA CALDERÓN

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

Dr. Y M.Sc. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ

San Salvador, Marzo 2016

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

Dr. Y M.Sc. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ

DEDICATORIA

A Dios por guiarme y permitirme haber concluido esta etapa en mi formación académica, a mi mamá Mirna del Carmen Orellana de Dardón y papá Néstor Raúl Dardón Burgos, por brindarme su apoyo incondicional, paciencia, consejos y creer en mis ideas y proyectos, por todo gracias, a mi esposa Alix Marielos Echevoyén de Dardón, por todo su apoyo, paciencia, comprensión, amor y por haber creído que era un largo y difícil camino pero no imposible, a mi hija Alix Michelle Dardón Echevoyén por ser mi principal motivación para concluir estos años de esfuerzo y desvelos estudiando, por el tiempo que he dejado de compartir con ella por estudiar por eso te dedico mi esfuerzo, a mis hermanos Mirna, Rafael y Verónica su esposo e hija. A mis suegros José Darío Echevoyen Ruiz Y Alix Priscila Rivas Moreira, por sus palabras de motivación y brindarme su apoyo para concluir con esta etapa. A todos aquellos amigos compañeros, docentes y familia, en general porque es muy larga la lista para nombrar a todos los que han influido con palabras y consejos.

Néstor Eduardo Dardón Orellana.

DEDICATORIA

A Dios por ser mi guía protegiéndome bajo sus alas e iluminar mi mente en mis momentos difíciles llenándome de fortaleza, depositando en mí una pequeña parte de su inmensa sabiduría, logrando de esa manera mi anhelada meta.

A mis Padres, Marcos González Flores y Santos Camila Rubio de González por su amor, sacrificio y todo su apoyo incondicional que me han brindado durante toda mi vida; es el triunfo de ellos, sin ellos no lo hubiera logrado, gracias.

A mi esposa Jancy Vanessa Trejo Montiel de González por su apoyo, cariño, amor y paciencia brindada a lo largo de mi carrera, quien me supo comprender compartiendo conmigo angustia en los momentos difíciles.

A mis hermanas Camila Guadalupe González Rubio y Ruth Nohemy González Rubio por su apoyo, comprensión y amor que han sabido compartir conmigo en todo momento, gracias a todos por soportarme y comprenderme en aquellos momentos de mal ánimo.

A mis compañeros de tesis Antonio José Rivera Calderón y Néstor Eduardo Dardón Orellana por haber escalado este peldaño juntos en nuestra carrera, por su esfuerzo y paciencia.

A mis amigos por su sinceridad, confianza y amor quienes me dieron aliento y ayuda en los momentos difíciles de mi carrera, especialmente a Geremías Ezequiel Sánchez, Francisco Romero Romero y José Porfirio Alvarado Quijada.

Marcos de Jesús González Rubio.

DEDICATORIA

Al final este Trabajo de Graduación no queda más que agradecer y dedicar este logro a todas las personas que me han acompañado y apoyado en el camino para llegar aquí, la culminación de mi carrera universitaria y el inicio de una nueva etapa. Por todo el tiempo, esfuerzo, consejos, tazas de café y más, muchas gracias a ustedes lleguen a leer esto o no, siempre estarán presentes en mi mente por estar ahí cuando los necesitaba.

A mi madre Maritza Jeannette de Rivera, por todas sus palabras de amor y sabiduría, por su apoyo incondicional, por su esfuerzo y sacrificio invertido en mi formación personal y profesional para convertirme en una persona de bien.

A mi padre José Antonio Rivera (Q.E.P.D.) Por su amor, consejo, enseñanzas y ejemplo a lo largo de sus años conmigo, demostrándome que los hombres de buena voluntad siempre siguen adelante ante cualquier adversidad. ¡Lo logre papá!

A la memoria de mis abuelos Betina Rivera, Andrés Rivera, Josefa Herrera, y de mi tía Nuria Rivera por su amor y sueños para mi futuro.

A toda mi familia por su compañía, buenos deseos y apoyo en mi proceso de formación personal y profesional.

A mis amigos y amigas que son tantos y muy preciados por compartir su camino conmigo desde los tiempos de infancia y a aquellos que se han incorporado con el pasar del tiempo, por tantos buenos momentos, su apoyo incondicional y consejos oportunos. Esperando compartir más éxito y deseándoles superación en sus carreras profesionales.

A la Asociación de Estudiantes de Ingeniería Mecánica ASEIM. sus integrantes y compañeros a lo largo de mis estudios universitarios, por brindarnos a todos un espacio para el estudio, la convivencia y la integración, y por promover actividades en pro del desarrollo de los estudiantes de Ingeniería Mecánica y carreras afines.

Antonio José Rivera Calderón

AGRADECIMIENTOS

A nuestra preciada Alma Mater por brindarnos la oportunidad de formarnos como profesionales dentro de ella.

Nuestros más grandes agradecimientos al Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz por asesorar este trabajo de graduación, dedicándonos su tiempo y conocimiento para la elaboración de este y por apoyo como docente y tutor en nuestras carreras.

A la Escuela de Ingeniería Mecánica y sus docentes que con paciencia y esmero compartieron con nosotros su tiempo, experiencia y conocimientos para prepararnos como profesionales de éxito, como también por brindarnos las instalaciones y equipo necesario para completar con satisfacción nuestros estudios.

A todos los profesores, asesores, auxiliares, ingenieros, licenciados y compañeros que nos han acompañado y han sido parte de nuestra formación profesional durante nuestra carrera, apoyándonos con conocimientos, enseñanzas y consejos en su momento oportuno.

A mis compañeros de trabajo de graduación por su esfuerzo inagotable y perseverancia en el desarrollo de esta investigación a pesar de las diferentes adversidades encontradas en el camino.

Néstor, Marcos y Antonio

PROPUESTA DE MANEJO DE RESIDUOS QUÍMICOS GENERADOS EN PROCESOS ELECTROLÍTICOS DE NIQUELADO Y CROMADO

Estudiantes: Brs. Néstor Eduardo Dardón Orellana¹, Marcos De Jesús González
Rubio² & Antonio José Rivera Calderón³

Docente asesor: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz⁴
Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería y Arquitectura,
Universidad de El Salvador

RESUMEN

Se ha realizado una investigación sobre el manejo de residuos químicos generados en procesos electrolíticos de niquelado y cromado, incluyendo los procesos que los preceden como el desengrase y decapado, incluyendo el impacto ambiental que estos residuos generan. Se evaluó entre las diferentes fórmulas químicas para cada uno de los procesos y se seleccionaron como objeto de análisis las dos más utilizadas en cada proceso, considerando las leyes nacionales e internacionales actualmente en rigor. Además, de esto se ha llevado a cabo un estudio de los residuos generados en cada proceso, evaluando los diferentes métodos y técnicas para reducir estos residuos, como también, un estudio de los diferentes análisis y tratamientos que se deben de realizar a las soluciones y a los residuos para un correcto manejo, con el fin de mejorar su calidad y duración, reduciendo la cantidad de residuos generados, su correcto almacenamiento y tratamiento final.

1 e-mail: n_dardon@hotmail.com

2 e-mail: Markkusgoru@hotmail.com

3 e-mail: antonymechanics@outlook.com

4 e-mail: jaberriosortiz@gmail.com

CHEMICAL WASTE MANAGEMENT PROPOSAL FOR NICKEL AND CHROME ELECTROPLATING PROCESS.

Students: Néstor Eduardo Dardón Orellana¹, Marcos De Jesús González Rubio² &
Antonio José Rivera Calderón³
Faculty advisor: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz⁴
Mechanical Engineering School, Engineering and Architecture Faculty, University
of El Salvador.

ABSTRACT

It has been conducted a research on the management for chemical residues from nickel and chrome electroplating process, including processes that precede them as degreasing and pickling, including the environmental impact generated by these waste. It was evaluated from different chemical formulas and selected two of the most commonly used formulas for each of the processes as analysis object, considering actual national and international laws. In addition, it has been conducted an investigation of the residues generated in each process, evaluating the different methods and techniques for the reduction of this waste, as well as a study of the different analyzes and treatment that must be applied to the solutions and waste for its proper management, in order to improve its quality and durability, reducing the waste generation volume, its proper storage and final disposal.

1 e-mail: n_dardon@hotmail.com

2 e-mail: markkusgoru@hotmail.com

3 e-mail: antonymechanics@outlook.com

4 e-mail: jaberriosortiz@gmail.com

ÍNDICE

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	1
1. MARCO TEÓRICO.....	4
1.1. Normativas de manejo de químicos y residuos.....	4
1.1.1. Normativa nacional de manejo de químicos y residuos.....	4
1.2. Convenios internacionales	10
1.2.1. Convenio de Basilea	11
1.2.2. Convenio de Estocolmo.....	13
1.2.3. Convenio de Rotterdam.....	14
1.2.4. La sinergia entre los convenios.....	15
1.3. Leyes y normativas europeas.....	16
1.3.1. Sistema REACH.....	16
1.3.2. Prevención y control integrados de la contaminación (Ley IPPC).....	22
1.4. Impacto ambiental de residuos químicos.....	23
1.4.1. Fuentes y caracterización de los residuos líquidos.....	24
1.4.2. Fuentes y caracterización de los residuos sólidos.....	24
1.4.3. Fuentes y caracterización de emisiones atmosféricas.....	25
1.4.4. Principales impactos ambientales generados por el sector.....	26
2. DETERMINACIÓN DE LAS PRINCIPALES ETAPAS DEL PROCESO.....	30
2.1. Desengrase.....	30
2.1.1. Desengrase químico	31
2.1.2. Desengrase electrolítico.....	32
2.1.3. Residuos de la etapa de desengrase.....	32
2.2. Decapado.....	33
2.2.1. Decapado por ácido sulfúrico.....	35
2.2.2. Decapado por ácido clorhídrico.....	38
2.2.3. Residuos de la etapa de decapado.....	39
2.3. Niquelado	40
2.3.1. Recubrimiento de níquel en caliente sin agitación (Watts).....	42
2.3.2. Recubrimiento de níquel duro.....	43
2.3.3. Residuos de la etapa de niquelado.....	44

2.4. Cromado.....	45
2.4.1. Recubrimiento de cromo hexavalente autorregulable.....	46
2.4.2. Recubrimiento decorativo de cromo trivalente microporoso.....	48
2.4.3. Residuos de la etapa de cromado	50
3. DESARROLLO DE PROPUESTA DE MANEJO DE RESIDUOS.....	52
3.1. Análisis de calidad de baños de recubrimiento.....	52
3.1.1. Análisis en celda de Hull.....	54
3.1.2. Pruebas de espesor por metro coulométrico.....	58
3.1.3 Pruebas cualitativas de adhesión.....	60
3.1.4. Pruebas analíticas del baño.....	62
3.2. Mantenimiento y regeneración de los baños.....	64
3.2.1. Soluciones de proceso.....	64
3.2.2. Soluciones de desengrase.....	66
3.2.3. Soluciones de decapado	68
3.3. Reducción de residuos	69
3.3.1. Medidas de minimización referente a los procesos.....	70
3.3.2. Medidas para la reducción del arrastre de sustancias contenidas en los baños.....	70
3.3.3. Determinación del volumen arrastrado.....	73
3.3.4. Optimización de las técnicas de lavado/ enjuague.....	74
3.4. Métodos de gestión de residuos.....	77
3.4.1. Empresas autorizadas para la gestión de residuos.....	78
3.4.2. Tratamiento de residuos para su entrega.....	79
3.4.3. Identificación y análisis de residuos.....	80
3.4.4. Pretratamiento de lodos.....	80
3.4.5. Tratamiento de aguas residuales.....	82
3.5. Normativas de seguridad.....	86
3.5.1. Sistema de clasificación de riesgos locales.....	88
3.5.2. Condiciones de almacenamiento de materia prima y producto terminado.....	91
3.5.3. Señalización.....	93
3.5.4. Equipo de protección personal.....	96
3.5.5. Tipos de envase para almacenamiento.....	98
4. CONSIDERACIÓN Y VALORACIÓN PARA IMPLEMENTACIÓN DE PROPUESTA DE MANEJO DE RESIDUOS.....	100
4.1. De la información y su accesibilidad.....	100
4.2. De la importancia de un estudio experimental.....	101

4.3. De la importancia de este estudio y su seguimiento.....	102
CONCLUSIONES.....	104
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	105

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1. Residuos de recubrimientos electrolíticos.....	26
Tabla 1.2. Efecto de ciertos contaminantes en la salud.....	27
Tabla 1.3. Efecto de ciertos contaminantes sobre los sistemas o instalaciones de recolección de agua.....	28
Tabla 1.4. Efectos de ciertos contaminantes descargados en mantos acuíferos.....	28
Tabla 2.1. Fórmula utilizada en el desengrase químico.....	31
Tabla 2.2. Fórmula utilizada en el desengrase electrolítico.....	32
Tabla 2.3. Solubilidad del hierro y sus óxidos en el ácido sulfúrico.....	36
Tabla 2.4. Efecto de la temperatura en el tiempo de decapado.....	36
Tabla 2.5. Fórmula para decapado por ácido sulfúrico.....	37
Tabla 2.6. Solubilidad del hierro y sus óxidos en ácido clorhídrico.....	38
Tabla 2.7. Fórmula para decapado por ácido clorhídrico.....	39
Tabla 2.8. Fórmula para recubrimiento de níquel en caliente sin agitación.....	43
Tabla 2.9. Fórmula para recubrimiento de níquel duro.....	44
Tabla 2.10. Fórmula para recubrimiento de cromo hexavalente autorregulable.....	48
Tabla 2.11. Fórmula para recubrimiento decorativo de cromo trivalente microporoso.....	49
Tabla 3.1. Análisis de recubrimiento de níquel en celda de Hull, 10 min a 60 °C y 2 A.....	56
Tabla 3.2. Análisis de recubrimiento de cromo en celda de Hull, 3 min a 45 °C y 5 A.....	58
Tabla 3.3. Métodos de prueba de adhesión para recubrimientos de níquel, cromo y níquel más cromo.....	61
Tabla 3.4. Arrastres típicos para superficies planas y curvas. (Chusher 1981, a partir de los trabajos de G.B. Hogaboom 1936. Techniques for reducing or eliminating releases of toxic chemicals in electroplating, US EPA).....	74
Tabla 3.5. Instituciones nacionales y su función en la gestión de sustancias químicas en El Salvador.....	78

Tabla 3.6.	Valores máximos permisibles en afluentes.....	85
Tabla 3.7.	Frecuencia mínima de muestreo y análisis para aguas residuales de tipo especial.....	85

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Fig. 2.1. Diagrama E/S del proceso de desengrase.....	33
Fig. 2.2. Diagrama E/S del proceso de decapado.....	40
Fig. 2.3. Diagrama E/S del proceso de niquelado electrolítico.....	45
Fig. 2.4. Diagrama E/S del proceso de cromado electrolítico.....	51
Fig. 3.1. Dimensiones de una celda Hull 276 m/.....	54
Fig. 3.2. Escala de Hull. En el eje de ordenadas se presentan los valores de corriente total seleccionados para el ensayo y en el eje de las abscisas los diferentes valores de densidad de corriente presentados a lo ancho de la placa de Hull.....	55
Fig. 3.3. Equipo de medición de espesores y potencial electroquímico de recubrimientos (couloscopio).....	59
Fig. 3.4. Representación esquemática del proceso de eliminación de la capa de recubrimiento.....	60
Fig. 3.5. Esquema de separación de grasa y aceite.....	67
Fig. 3.6. Arrastres de electrolito, en $m^3 \cdot m^{-2}$, para piezas en bastidor en diferentes posiciones.....	71
Fig. 3.7. Sistema de clasificación de riesgos locales basado en el rombo.....	89
Fig. 3.8. Portar protección en los ojos.....	93
Fig. 3.9. Portar guantes protectores.....	94
Fig. 3.10. Portar protección respiratoria.....	94
Fig. 3.11. Portar calzado protector.....	95
Fig. 3.12. Portar protección auditiva.....	95
Fig. 3.13. Portar protección de la cabeza.....	95
Fig. 3.14. De izquierda a derecha: protección de la cara, uniforme, protección de la cara y vías respiratorias.....	96

SÍMBOLOS Y SIGLAS

Art.	Artículo
ASTM	Sociedad Americana para Ensayos y Materiales (por sus siglas en inglés, American Standards for Testing and Materials)
AAI	Autorización Ambiental Integrada
BAF	Factores de bioacumulación (por sus siglas en inglés, <i>Bioaccumulation Factor</i>)
BCF	Factor de bioconcentración (por sus siglas en inglés, <i>Bioconcentration Factor</i>)
CL	Criterio de lavado
CMR	Sustancias carcinógenas, mutágenas o tóxicas para la reproducción
CONACYT	Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
COP/POP	Contaminantes orgánicos persistentes (por sus siglas en inglés, <i>Persistent Organic Pollutants</i>)
Cr [VI]	Cromo hexavalente
DIN	Instituto Alemán de normalización (por sus siglas en alemán, Deutsches Institut für Normung)
EPER	Registro Europeo de Emisiones de Sustancias Contaminantes (por sus siglas del inglés, The European Pollutant Emission Register)
FGR	Fiscalía General de la República
FUSADES	Fundación Salvadoreña para el Desarrollo Económico y Social
IPPC	Directiva de Prevención y Control Integrados de la Contaminación (por sus siglas en inglés, Integrated Pollution Prevention and Control)
ISO	Organización internacional de normalización (por sus siglas en inglés, International Organization for standardization)
K _{ow}	Coeficiente de partición octanol-agua
MARN	Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales
MH	Ministerio de Hacienda
MIDES S.E.M. de C.V	Manejo Integral de Desechos Sólidos S.E.M. de C.V
MINEC	Ministerio de Economía
MINREX	Ministerio de Relaciones Exteriores
MINTRAB	Ministerio de Trabajo y Previsión Social
MS	Nivel de materia seca
MSPAS	Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social
MTD	Mejores Técnicas Disponibles
PBT	Sustancias persistentes, bioacumulables y tóxicas
pH	Medida de acidez o alcalinidad (por sus siglas, potencial de hidrógeno)

PNC	Policía Nacional Civil
PNUMA	Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente
PRTR	Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes (por sus siglas en inglés pollutant Release and Transfer Register)
REACH	Registro, Evaluación, Autorización y restricción de sustancias Químicas (por sus siglas en inglés, Registration, Evaluation, Authorisation and restriction of CHemicals)
S.A. de C.V	Sociedad Anónima de Capital Variable
SGA	Sistema Globalmente Armonizado
UE	Unión Europea
V	Arrastres
VLE	Valores Límites de Emisión
VMT	Viceministerio de Transporte
vPvB	Sustancias muy persistentes y muy bioacumulables

INTRODUCCIÓN

Los procesos electrolíticos juegan un papel importante en la producción de joyería, equipo médico, muebles y piezas de ingeniería, estos procesos tienen como base, la electrodeposición, método de cubrir objetos con una película fina de otro metal. El principio que rige este fenómeno es la electrólisis, cuyo nombre procede de dos radicales, electro que hace referencia a electricidad y lisis que significa ruptura. El proceso electrolítico consiste en hacer pasar una corriente eléctrica a través de un electrolito, entre dos electrodos conductores denominados ánodo y cátodo. Esto implica la reducción (disminución del estado de oxidación; ganancia de electrones) de un compuesto metálico disuelto en un electrolito y una deposición del metal resultante sobre una superficie conductora.

Desde el inicio del desarrollo de la industria de procesos de recubrimientos electrolíticos estos han sufrido una constante evolución en base a los fundamentos teóricos, experiencias empíricas, innovación y búsqueda de procesos más limpios y eficientes, debido a esto existe una gran cantidad de fórmulas y parámetros para establecer una línea de producción de recubrimientos, la selección de un proceso específico para la aplicación de estos dependerá de los conocimientos de electroquímica, mecánica, metalurgia, ingeniería, consideraciones económicas y ambientales del responsable, lo cual genera variedades en los diferentes procesos y productos en diferentes empresas. Cada una de estas variaciones en el proceso implica la generación de subproductos o residuos diferentes según las técnicas, químicos y concentraciones utilizados en el proceso para la obtención de las propiedades deseadas en el recubrimiento.

En base al problema medioambiental existente a nivel mundial y considerando que estos procesos tienen un alto potencial de contaminación por el tipo de materia prima, sus reacciones durante el proceso y los residuos generados, se plantea una propuesta para reducir la generación de residuos y aumentar el rendimiento de estos baños, enfocada para las empresas que actualmente se dedican a la aplicación de recubrimientos electrolíticos especialmente al cromado electrolítico. Esperando mediante esta propuesta establecer las bases para futuras

investigaciones en este tema y la formulación de una normativa que pueda ser adoptada a nivel nacional superando el vacío concerniente a leyes específicas y normativas en comparación con algunos estándares internacionales para la gestión y control en esta industria en materia de sus procesos y residuos, como además una guía para toda persona u organización interesada en la industria de recubrimientos electrolíticos y en un manejo adecuado de sus residuos.

El presente trabajo de graduación cita las leyes y tratados que actualmente rigen este proceso a nivel nacional, así como de convenios internacionales para el manejo de residuos peligrosos; debido a la amplia variedad de formulaciones desarrolladas para su aplicación en las diferentes etapas del proceso de niquelado y cromado se seleccionan dos fórmulas por cada etapa del proceso y bajo estas fórmulas se hace el estudio de los residuos generados durante el proceso, se da a conocer los estudios que se necesitan para establecer la cantidad de contaminantes que tiene dichos residuos y aguas residuales, pruebas para establecer la calidad del baño y los métodos a seguir para el mantenimiento de los baños, la reducción de residuos, y el tratamiento y disposición final de estos .

Se establecen medidas para el tratamiento de estos residuos, las cuales se recomiendan a las empresas que actualmente efectúan estos procesos, la propuesta de manejo de estos residuos está basada en normativas y metodologías aplicadas en la industria a nivel internacional, se incluyen pruebas para la determinación de la calidad de las soluciones con el fin de mantener la eficiencia operativa de los baños y por ende los costos de operación del proceso, recomendaciones para el mantenimiento de los baños y la optimización de su vida operativa reduciendo los residuos generados por la sustitución de la solución, se propone además medidas para un adecuado manejo del proceso de recubrimiento estableciendo en ellos tiempo de escurrimientos mantenimiento de tanques y demás componentes utilizados.

Posteriormente se presentan medidas para el tratamiento de las aguas residuales procedentes de los enjuagues o lavados, se presentan los métodos utilizados para la gestión de residuos; las empresas nacionales y su función en la gestión de residuos a nivel nacional, incluyendo aquellas con la tecnología y

permisos para llevar a cabo el tratamiento final de residuos y el procedimiento para la preparación y entrega de los residuos para que sean eliminados en éstas.

Finalmente, se presentan observaciones obtenidas a lo largo del proceso de investigación, así como recomendaciones establecidas con la finalidad de que este trabajo de graduación sea un antecedente y guía para futuras investigaciones, estableciendo las bases necesarias para su seguimiento, para ello se han considerado las limitaciones y dificultades presentadas durante el desarrollo de éste, con el fin de facilitar a los interesados las herramientas para la formulación de un plan de trabajo que sea capaz de superar estas dificultades, además de la valoración que los autores hacen de la importancia del seguimiento y desarrollo de más investigaciones y estudios en el área de los recubrimientos electrolíticos por los estudiantes de Ingeniería Mecánica de la Universidad de El Salvador.

1. MARCO TEÓRICO

En el presente marco teórico del trabajo de graduación titulado “Propuesta para el manejo de residuos químicos generados en procesos electrolíticos de níquel y cromo en aceros” se presenta un resumen de las normativas aplicadas a nivel nacional e internacional para el manejo de residuos químicos generados en todo tipo de industria y finalmente se enumeran los residuos generados en este tipo de procesos y el impacto ambiental que éstos suponen.

1.1. NORMATIVAS DE MANEJO DE QUÍMICOS Y RESIDUOS

En cada país existen diferentes reglamentos o normativas que se deben de cumplir en cuanto a manejo de químicos o residuos de diferentes tipos, teniendo éstos una marcada diferencia respecto a su nivel de especificaciones y alcances en base al nivel de desarrollo del país. A continuación se presenta un resumen de las normativas referentes al manejo de químicos y residuos establecidas tanto a nivel nacional como internacional.

1.1.1. NORMATIVA NACIONAL DE MANEJO DE QUÍMICOS Y RESIDUOS

En El Salvador actualmente el “Decreto N° 41: Reglamento especial en materia sustancias, residuos y desechos peligrosos” establece disposiciones generales sobre el manejo, almacenamiento y transporte. Así como, deberes de quien genera, transporta o almacena estos químicos. Siendo el decreto aplicado de manera general a toda actividad comercial o personal que necesite el uso de químicos no especificando el ámbito de trabajo o uso que se le dará.

La utilización, traslado e importación de sustancias peligrosas está regido por la Ley de Medio Ambiente, en los artículos 21, 57, 59 y 60 entre otros.

En la creación del Decreto N° 41 se hizo uso del “Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación” como principal apoyo para la redacción de sus lineamientos.

El decreto contiene las responsabilidades de cada uno de los agentes involucrados en la cadena de procesos donde existan químicos involucrados y sus respectivas obligaciones, tal como se presentan a continuación:

- Responsabilidad del generador y demás agentes del proceso: Según el Art. 17 de esta ley “Los generadores de residuos peligrosos, así como las personas naturales o jurídicas que usen, generen, recolecten, almacenen, reutilicen, reciclen, comercialicen, transporten o realicen tratamiento de dicho tipo de residuos, serán responsables del cumplimiento de las disposiciones de la ley, de este reglamento y de las reglas técnicas que de éste se deriven, estando obligados a determinar su peligrosidad y a registrarse en el consejo, así como a mantenerse actualizados en dicho registro”.

Este registro será solicitado y presentado al Consejo Superior de Salud Pública (CSSP) y este consiste en una declaración jurada en la que manifieste lo siguiente:

- A) Nombre completo, razón social o denominación;
- B) Lugar de ubicación de la planta o sitio generador de residuos peligrosos;
- C) Características físicas, químicas y/o biológicas de cada uno de los residuos que se generen;
- D) Descripción de procesos generadores de residuos peligrosos;
- E) Listado de sustancias peligrosas utilizadas;
- F) Método y lugar de tratamiento y/o disposición ambientalmente adecuado;
- G) Forma de transporte según residuo que se genere;
- H) Cantidad anual estimada de cada uno de los residuos que se generen;
- I) Método de evaluación de características de residuos peligrosos;
- J) Procedimiento de extracción de muestras;
- K) Método de análisis de lixiviado y estándares para su evaluación; y

L) Listado de personal expuesto a los efectos producidos por las actividades de generación de residuos peligrosos, procedimientos precautorios y correspondiente diagnóstico médico.

Estos datos deberán actualizarse anualmente mediante declaración jurada; para lo cual se deberá llevar un libro de Registro donde conste cronológicamente la totalidad de las operaciones realizadas. Dichos libros tendrán que ser rubricados y foliados y estar a disposición del Ministerio cuando éste así lo requiera.

➤ Del transporte: Toda persona natural o jurídica, responsable del transporte de sustancias, residuos o desechos peligrosos, deberá estar debidamente registrada ante dicho Ministerio, para lo cual deberá proporcionar, entre otras, la información de los medios y medidas utilizadas para el transporte de sustancias peligrosas, considerando medidas de contingencia y equipo de emergencia en caso de accidentes, de las actividades y de los residuos transportados y el riesgo que estos suponen. Dicho registro contara con toda la información enlistada a continuación:

- A) Nombre de la persona responsable y domicilio legal;
- B) Cantidad y tipo de sustancia, residuo o desecho que se ha de transportar, con especificación de riesgo;
- C) Listado de vehículos y contenedores que serán utilizados;
- D) Equipos que se utilizarán, en caso de peligro causado por accidente o contingencia; y
- E) Plan Institucional de Prevención y Contingencia, establecido en el Artículo 55 de la Ley.

Además, todo transportista de sustancias, residuos o desechos peligrosos deberán cumplir con las responsabilidades siguientes [1]:

- A) Verificar que los materiales que le entregue la persona o el generador, se encuentren correctamente envasados e identificados en cumplimiento con los términos de los instrumentos internacionales en la materia;

- B) Contar con el Plan Institucional de Prevención y Contingencia y procedimientos de operación, en el caso de derrames accidentales o contingencias;
- C) Sujetarse a las disposiciones sobre seguridad e higiene, que sean aplicables en materias de tránsito y de transporte;
- D) Obtener la Licencia de conducir, que sea adecuada para las operaciones que el conductor realice.

Todo transportista y destinatario tiene la responsabilidad de elaborar y entregar al Ministerio y a las autoridades competentes un informe semestral sobre las sustancias, residuos o desechos peligrosos, que hubiesen recibido para su transporte, almacenamiento o disposición final, durante ese periodo, dichos documentos deberán ser archivados por el transportista durante un periodo de cinco años; por el generador y el almacenador, durante diez años; y para el destinatario, en caso que sea este el encargado de la disposición final, veinticinco años.

Los vehículos destinados al transporte deberán estar previamente registrados y controlados por el Ministerio. Los controles requeridos serán entre otros, los de la velocidad, tiempo de paradas, distancia recorrida, relevos en la conducción y registro de origen y destino del transporte, debiendo además, cumplir con su normativa correspondiente.

Se regula la normativa que deben de cumplir los medios de transporte que serán utilizados, además de las normativas a cumplir para transporte tanto nacional como fronterizo basados en el Convenio internacional de Basilea. Además, también las normas mínimas que debe de cumplir el envase y embalaje de los químicos o residuos a transportar [1].

- Tratamiento y disposición final de desechos peligrosos: El tratamiento previo, necesario para algunos desechos peligrosos, se orientará a reducir su volumen, aumentando su concentración, o a disminuir su grado de peligrosidad, por solidificación, por procesos físicos, químicos, bioquímicos o biotecnológicos, o la combinación de los anteriores.

El tratamiento destructivo de desechos peligrosos como la pirolisis, la incineración u otro método debe ser realizado en lugares autorizados para tal efecto, y así evitar contaminación.

Los sistemas actuales de disposición final, aplicables a los desechos peligrosos son los confinamientos controlados diferenciando entre ellos desechos agroquímicos que tienen confinamientos más específicos según su normativa. Además, también los lugares donde no pueden ser ubicados y su respectiva señalización.

Los lugares destinados al confinamiento controlado de desechos peligrosos deben ser debidamente señalizados, evidenciando a la población la peligrosidad o riesgo del área y no podrán ser ubicados en zonas o lugares cercanos a ríos, lagunas, capas freáticas, zonas residenciales o habitacionales. La selección del sitio de confinamiento, así como el diseño y la construcción de confinamientos controlados, de receptores de agroquímicos u otros desechos, deberán de cumplir características de seguridad establecidas en el Permiso Ambiental. Además, se deben incluir medidas preventivas de recolección y tratamiento de los posibles lixiviados o derrames que pudieran generarse.

Para obtener un mejor control en el manejo de desechos químicos, las autoridades exigen a los encargados de su disposición final un informe trimestral que contenga la información detallada de la naturaleza y volumen de residuos confinados, fecha de confinamiento, sitio y método de disposición final para cada tipo de desecho.

Sí el ministerio establece que los desechos peligrosos no se deben confinar, el titular de la generación se debe responsabilizar de su tratamiento o eliminación adecuada, en un plazo de tiempo definido.

- Envase y embalaje: Se entiende el concepto de envase como recipiente en que se depositan, conservan o transportan sustancias, residuos o desechos peligrosos y embalaje como aquella envoltura exterior protectora que cubre, o en donde se deposita para su manejo, los envases de sustancias, desechos y/o residuos peligrosos.

Las sustancias, residuos y desechos peligrosos sólo se deben contener en envases y embalajes que tengan la resistencia suficiente para soportar la presión interna que se pueda desarrollar en condiciones normales de transporte, tránsito y almacenamiento.

Todo envase y embalaje que haya contenido sustancias, residuos o desechos peligrosos y sea descartado, deberá ser considerado residuo o desecho peligroso y ser tratado como tal siguiendo las normativas establecidas.

Todo envase y embalaje destinado a transportar sustancias, residuos o desechos peligrosos, deberá contar con la etiqueta correspondiente cumpliendo las disposiciones del reglamento general de la ley, así como la reglamentación emitida por las organizaciones nacionales e internacionales en la materia, que sean ratificados por El Salvador, toda etiqueta deberá ser:

- A) Presentada de forma que llame la atención del usuario y contenga la información que se desea comunicar en términos precisos y concretos, con expresiones y símbolos normativos de tipo internacional, evitando el uso de declaraciones ambiguas;
 - B) Completa, de manera que no se omita información o indicaciones importantes;
 - C) Concordante con las normas y reglamentaciones nacionales e internacionales en la materia;
 - D) Consistente, lo cual se obtiene normando sus componentes, como sería la información sobre su seguridad y confinamiento u otra forma de eliminación; y de material resistente a las condiciones atmosféricas y normales de manejo.
- Almacenamiento: Las áreas de almacenamiento de sustancias, residuos y desechos peligrosos deberán reunir, entre otras, las siguientes condiciones:
- A) Encontrarse separadas de las áreas de producción, servicios y oficinas, debiendo estar ubicadas en zonas donde se reduzcan los riesgos por posibles emisiones, fugas, incendios o explosiones, entre otros;
 - B) Contar con muros de contención y sistema de retención para captación de derrames;

- C) Para las sustancias, residuos o desechos líquidos, los pisos deberán contar con canaletas que conduzcan los derrames a las fosas de retención, con capacidad de contener lo almacenado;
 - D) Contar con pasillos lo suficientemente amplios que permitan el tránsito de montacargas mecánicas, electrónicas o manuales, así como el movimiento de los equipos de seguridad;
 - E) Las paredes y el piso deberán estar cubiertos con material impermeable, tal como poliureas, respecto de las sustancias almacenadas, con ventilación e iluminación adecuadas; y
 - F) Contar con los sistemas de prevención contra incendios [1].
- Control de transporte: El transporte y los movimientos dentro del territorio nacional de sustancias, residuos y desechos peligrosos, deberán ser controlados, de acuerdo con las normas jurídicas nacionales, y tomando como base los procedimientos internacionales mencionados en el presente Reglamento y en instrumentos internacionales en la materia. Cuando una sustancia, residuo o desecho sea trasladado a través de una frontera nacional, quien efectúa el traslado, deberá dar la información detallada acerca de su composición, rutas de desplazamiento, y seguro de daños y perjuicios a terceros. En el caso de los residuos peligrosos se deberán cumplir las obligaciones derivadas del Convenio de Basilea.

1.2. CONVENIOS INTERNACIONALES

En los últimos 30 años la producción, la generación y el comercio de productos químicos y residuos ha tenido un crecimiento exponencial. Dado los riesgos que se plantean cuando los mismos van a ser transportados, manejados o dispuestos finalmente, se ha generado una preocupación creciente por parte de los gobiernos y público en general. En atención a esta problemática el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), en la última década y media, ha dado un tratamiento especial a las sustancias químicas y a los residuos

peligrosos. En este marco se señalan tres acuerdos multilaterales actualmente en vigor, que plantean medidas globales para proteger la salud humana y el medio ambiente considerando algunos de los aspectos del ciclo de vida de estos productos químicos y residuos. Estos acuerdos son el Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de residuos peligrosos y su eliminación, el Convenio de Rotterdam sobre el procedimiento de consentimiento fundamentado previo aplicable a ciertos plaguicidas y productos químicos peligrosos objeto del comercio internacional y el Convenio de Estocolmo sobre contaminantes orgánicos persistentes [2].

Los objetivos del convenio es en primer lugar promover la responsabilidad compartida y los esfuerzos conjuntos de las partes en la esfera del comercio internacional de ciertos productos químicos peligrosos a fin de proteger la salud humana y el medio ambiente frente a posibles daños; y en segundo lugar, contribuir a su utilización ambientalmente racional, facilitando el intercambio de información acerca de sus características, estableciendo un proceso nacional de adopción de decisiones sobre su importación y exportación y difundiendo esas decisiones a las partes [2].

1.2.1. CONVENIO DE BASILEA

El Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de residuos peligrosos y su eliminación fue firmado en Basilea, Suiza en 1989 y entró en vigor el 5 de mayo de 1992, pasando a ser un compromiso internacional de los países que lo ratificaron. El mismo se ha convertido en el acuerdo multilateral sobre residuos más importante, estableciendo un régimen normativo global para la minimización de la generación, el manejo ambientalmente adecuado de los residuos peligrosos y el control de sus movimientos transfronterizos. El principal objetivo del convenio es lograr un manejo ambientalmente adecuado de los residuos peligrosos y otros residuos. Esto significa proteger la salud humana y el medio ambiente de los efectos nocivos que puedan derivar de la generación, transporte y manejo de

residuos peligrosos y otros residuos. Para ello, se han establecido los siguientes objetivos específicos:

- A) Reducir al mínimo la generación de residuos tanto en cantidad como en peligrosidad, teniendo en cuenta aspectos sociales, técnicos y económicos.
- B) Tratar y eliminar los residuos peligrosos y otros residuos lo más cerca posible de la fuente de su generación.
- C) Asegurar instalaciones adecuadas de eliminación, cualquiera sea el lugar donde se efectúe.
- D) Velar por las personas que participan en el manejo de los residuos y que se adopten las medidas necesarias para impedir que ese manejo de lugar a contaminación.
- E) Reducir los movimientos transfronterizos de residuos peligrosos y otros residuos a un mínimo compatible con su manejo ambientalmente adecuado y eficiente.
- F) Controlar los movimientos transfronterizos de residuos peligrosos, monitorear y prevenir el tráfico ilícito [3].

El alcance de este convenio es amplio y contiene listas que permiten a los países clasificar los residuos en base a características de peligrosidad, incluyendo además listas específicas de los residuos que caen en su ámbito de aplicación. El convenio también prevé y permite que cada país parte elabore su propia lista de residuos peligrosos, la notifique a la secretaría y ésta comunique a las partes. Una vez realizada dicha comunicación los países partes se deben regir por la lista de los países involucrados en el movimiento transfronterizo para hacer las notificaciones que correspondan. Hasta agosto del 2005, la cantidad de países partes de este convenio ascendía a 166.

A nivel de los países, la autoridad competente es la repartición gubernamental responsable de gestionar las notificaciones de los movimientos transfronterizos, brindar el asesoramiento necesario a los interesados y dar cumplimiento al conjunto de los deberes que asume el país como signatario del convenio. En este sentido el convenio les exige a los países partes, adoptar las medidas jurídicas y administrativas necesarias para aplicar y hacer cumplir las obligaciones del convenio [3].

1.2.2. CONVENIO DE ESTOCOLMO

El Convenio de Estocolmo entró en vigor en mayo de 2001, siendo considerado un logro muy importante dado que su meta es reducir y con el tiempo eliminar totalmente 12 contaminantes orgánicos persistentes (COP o POP, por sus siglas en inglés, *Persistent Organic Pollutants*) particularmente tóxicos, 9 de estos son plaguicidas, dos son productos químicos de uso industrial y los otros 2 constituyen dos familias de productos químicos generados sin intención; es decir, que no tienen utilidad comercial pero se producen en procesos de combustión y en algunos procesos industriales [2].

Por contaminantes orgánicos persistentes se conoce al grupo de sustancias o familias de sustancias (dentro del gran conjunto de sustancias orgánicas) que presentan en forma combinada características de toxicidad, persistencia, bioacumulación y capacidad de transportarse a largas distancias desde donde se emitieron o utilizaron, así [2 y 4]:

- Toxicidad: Una sustancia o compuesto es tóxico si es capaz de producir efectos adversos a un organismo vivo. La toxicidad se evalúa en función de la magnitud y tipo de efectos que ocasiona, de las dosis necesarias para producir esos efectos y de las vías y tiempo de exposición.
- Persistencia: Una sustancia o compuesto se considera persistente, a la degradación química y biológica, en función de su capacidad de permanencia en el ambiente por períodos prolongados. El criterio utilizado por el convenio para considerar una sustancia como persistente es que su tiempo de vida media en agua sea mayor a 2 meses o que su tiempo de vida media en suelo o sedimentos sea mayor a 6 meses. El tiempo de vida media es el tiempo en que una sustancia disminuye a la mitad su concentración inicial.
- Bioacumulación: La bioacumulación evalúa la afinidad de una sustancia a concentrarse en los tejidos de los organismos vivos. La bioacumulación se cuantifica en función de los factores de bioacumulación (BAF por sus siglas en inglés *Bioaccumulation Factor*) o bioconcentración (BCF por sus siglas en inglés *Bioconcentration Factor*) o en el caso de no contar con estos valores se estima

en función del coeficiente de partición octanol-agua (K_{ow}). El criterio utilizado por el convenio establece que se tomarán como bioacumulables aquellas sustancias con un BAF/BCF -en especies acuáticas- mayor a 5.000 o $\log K_{ow}$ mayor a 5.

- Transporte a largas distancias: Esta característica también denominada "efecto saltamontes", atiende a la capacidad de una sustancia de poder ser transportada por vía del agua, aire o especies migratorias a áreas remotas con relación a donde es utilizada o emitida. El criterio utilizado por el convenio para evaluar esta característica es en función del tiempo medio en aire de la sustancia, el cual debe ser mayor a 2 días o en su defecto que la sustancia haya sido detectada en áreas remotas a las fuentes de emisión o uso.
- Lista Inicial: En función de los criterios establecidos por el Convenio de Estocolmo, del conocimiento científico y de las negociaciones que involucró dicho instrumento, se estableció una lista inicial de doce compuestos, comúnmente conocida como la "docena sucia", conjunto de sustancias que representan la mayor preocupación de la comunidad global. Adicionalmente, en el convenio se estableció el mecanismo por el cual la lista podrá ser ampliada a otras sustancias o grupos de sustancias teniendo en cuenta los criterios mencionados. En el convenio se establece la adopción de medidas para:
 - A) La prohibición de producción y uso, así como importación y exportación, salvo exenciones establecidas;
 - B) La reducción o eliminación de las liberaciones derivadas de la producción no intencional; y
 - C) La reducción o eliminación de las liberaciones derivadas de las existencias y residuos [2 y 4].

1.2.3. CONVENIO DE ROTTERDAM

El Convenio de Rotterdam sobre el procedimiento de consentimiento fundamentado previo aplicable a ciertos plaguicidas y productos químicos peligrosos objeto del comercio internacional, surgió de un programa voluntario de

intercambio de información en la década de 1980. Entró en vigor el 24 de febrero de 2004 y en agosto del 2005 lo han ratificado 98 países. Tiene como objetivo promover la responsabilidad compartida entre los países exportadores e importadores para el manejo de los productos químicos que generan riesgos y de esa manera proteger la salud humana y el medio ambiente. Procura, además de las notificaciones de los exportadores a los importadores durante el comercio y la difusión de las medidas regulatorias adoptadas por los países respecto a los productos, facilitar especialmente el intercambio de información precisa sobre las características de los químicos. Actualmente incluye 24 productos químicos de uso plaguicida, 6 formulaciones de plaguicidas severamente peligrosas y 11 productos de uso industrial, y se prevé que esta lista se expanda [2 y 5].

1.2.4. LA SINERGIA ENTRE LOS CONVENIOS

Los tres convenios tienen puntos comunes y se superponen en algunos aspectos de su alcance y en los productos químicos y residuos que constituyen las listas de cada uno. Particularmente el Convenio de Basilea y el Convenio de Estocolmo están vinculados en varios aspectos. En primera instancia las sustancias químicas y sus residuos incluidos en el Convenio de Estocolmo están contemplados en el de Basilea desde la perspectiva de residuos. Sin embargo, como estos convenios se refieren a ciertas etapas del ciclo de vida de los productos, se producen intersecciones en sus alcances, por lo que los países utilizan herramientas derivadas de ambos instrumentos al momento de manejar dichos residuos [2].

Los tres convenios nombrados reflejan la preocupación de la comunidad internacional para abordar y minimizar/evitar los riesgos que un manejo inadecuado de los productos químicos y residuos peligrosos pueden ocasionar. Sin embargo, a pesar que actualmente los tres convenios cuentan con un creciente número de países partes, comprometidos en cumplir los objetivos de cada uno de ellos y conscientes tanto del problema como de las medidas a tomar, muchos no cuentan con la infraestructura, la capacidad o los recursos necesarios para poder abordar

en forma integrada el manejo de las sustancias y residuos peligrosos. De todos modos, cada uno de estos convenios presenta desafíos y da oportunidades de avanzar, partiendo en muchas ocasiones con herramientas muy básicas que simplemente se reducen a una sensibilización inicial. En otros casos abren las puertas a diálogos locales, nacionales y regionales, a propuestas coordinadas para resolver situaciones y finalmente a normativas que regulan los distintos aspectos del ciclo de vida de los productos químicos y residuos peligrosos, permitiendo lograr el objetivo de protección de la salud humana y del medio ambiente [2].

1.3. LEYES Y NORMATIVAS EUROPEAS

La investigación en países más desarrollados ha llevado a la creación de leyes y normativas las cuales pueden ser usadas como guía de parte de empresas o industrias para mejorar la calidad de la vida humana reduciendo los riesgos de daños causados por químicos.

Entre éstas se pueden mencionar algunas relevantes como lo es el reglamento de Registro, Evaluación, Autorización y restricción de sustancias Químicas (por sus siglas del inglés, Registration, Evaluation, Authorisation and restriction of CHemicals, REACH) y la directiva de Prevención y Control Integrados de la Contaminación (por sus siglas del inglés, Integrated Pollution Prevention and Control, IPPC).

1.3.1. SISTEMA REACH

La Unión Europea (UE) ha puesto en marcha el sistema REACH y crea la Agencia Europea de Sustancias y Preparados Químicos. REACH obliga a las empresas que fabrican e importan sustancias y preparados químicos a evaluar los riesgos derivados de su utilización y a adoptar las medidas necesarias para gestionar cualquier riesgo identificado. La carga de la prueba de la seguridad de las

sustancias y preparados químicos fabricados o comercializados recae en la industria [6].

El Reglamento pretende garantizar un nivel elevado de protección de la salud humana y el medio ambiente, así como fomentar la competitividad y la innovación en el sector de las sustancias y preparados químicos [6].

➤ **Ámbito de aplicación:** El ámbito de aplicación del Reglamento abarca todas las sustancias fabricadas, importadas, comercializadas o utilizadas, como tales o en forma de mezclas. Quedan excluidas del ámbito de aplicación del Reglamento:

- A) Las sustancias radioactivas (cubiertas por la Directiva 96/29/Euratom);
- B) Las sustancias que se encuentran sometidas a supervisión aduanera y que están en depósito temporal, en una zona franca o en un depósito franco con el fin de volverse a exportar, o en tránsito;
- C) Las sustancias intermedias no aisladas;
- D) El transporte de sustancias peligrosas y
- E) Los residuos [6].

➤ **Registro:** El registro constituye el elemento fundamental del sistema REACH. Las sustancias químicas fabricadas o importadas en cantidades de una tonelada anual o superiores deben registrarse obligatoriamente en una base de datos central gestionada por la Agencia Europea de Sustancias y Preparados Químicos. No podrá fabricarse ni comercializarse en Europa ninguna sustancia que no esté registrada.

No obstante, algunos grupos de sustancias (enumerados en el Reglamento) están exentos de la obligación de registro, como por ejemplo:

- A) Los polímeros (no obstante, sí deben registrarse los monómeros que componen los polímeros);
- B) Determinadas sustancias cuyo riesgo estimado es mínimo (agua, glucosa, etc.);
- C) Determinadas sustancias que existen en la naturaleza y cuya composición química no se ha modificado; y

D) Las sustancias utilizadas en el ámbito de la investigación y el desarrollo, en determinadas condiciones.

El registro exige que la industria (fabricantes e importadores) proporcione información relativa a las propiedades, utilizaciones y precauciones de uso de las sustancias químicas (expediente técnico). Los datos requeridos son proporcionales a los volúmenes de producción y a los riesgos presentados por la sustancia (por ejemplo, pruebas amplias de toxicidad relativas a las sustancias fabricadas o importadas en cantidades superiores a 1000 toneladas). Por otra parte, las solicitudes de registro referentes a sustancias importadas o fabricadas en cantidades de 10 toneladas anuales o superiores deben enumerar los riesgos vinculados a estas sustancias.

La Agencia Europea de Sustancias y Preparados Químicos se encarga de administrar la base de datos, recibir los expedientes de registro y elaborar guías técnicas dirigidas a ayudar a los fabricantes e importadores, así como a las autoridades competentes, en la aplicación de estas disposiciones.

- Puesta en común de datos: El Reglamento contiene una serie de normas relativas a la puesta en común de datos, destinadas a reducir los ensayos realizados con animales vertebrados así como los costos sufragados por la industria. Está previsto, en particular, que los declarantes compartan los datos pertinentes a cambio de una contrapartida financiera.

Con el mismo fin, el Reglamento exige que todos los declarantes de una misma sustancia presenten conjuntamente su solicitud de registro, salvo en los casos en que pueda alegarse una justificación en nombre de la protección de datos confidenciales, en caso de desacuerdo con los otros declarantes, o cuando la presentación conjunta de la solicitud de registro implique unos costos desproporcionados [6].

- Información en la cadena de suministro: Los datos de seguridad se transmitirán a lo largo de la cadena de suministro, de modo que quienes usen las sustancias químicas en su proceso de producción para fabricar otros preparados o artículos puedan hacerlo de manera segura y responsable, sin poner en peligro la salud de los trabajadores y consumidores y sin riesgo para el medio ambiente. Esto

implica que la información se transmitirá a los puntos anteriores y posteriores de la cadena de suministro y se intercambiará entre todos los participantes que intervienen en la misma [6].

Los datos transmitidos se refieren, entre otras cosas, a la identificación, la composición y las propiedades de las sustancias, las medidas que han de adoptarse para su uso y transporte sin riesgo, las medidas en caso de dispersión accidental o incendio, así como información toxicológica y ecológica. Las informaciones sensibles de carácter comercial no deben transmitirse.

- Usuarios intermedios: Los usuarios intermedios deben evaluar la seguridad química de las sustancias, basándose principalmente en la información facilitada por su proveedor, y adoptar las medidas adecuadas de gestión de los riesgos. Estas disposiciones, también, permitirán a las autoridades tener una visión general de los usos de la sustancia según va recorriendo la cadena de suministro, con lo que, si procede, podrán solicitar más información y adoptar las medidas adecuadas [6].
- Evaluación: La evaluación permite a la Agencia comprobar que la industria cumple sus obligaciones y evita los ensayos innecesarios con animales vertebrados. Están previstos dos tipos de evaluación: la evaluación del expediente y la evaluación de la sustancia.

La evaluación del expediente será obligatoria para todas las solicitudes que incluyan alguno de los ensayos enumerados en los anexos IX y X del Reglamento (es decir, los ensayos más exigentes y que utilizan, en su mayoría, animales vertebrados). En este caso, la evaluación pretenderá, esencialmente, minimizar la necesidad del recurso a este tipo de experimentación. La evaluación del expediente también podrá realizarse para comprobar la conformidad del registro. Está previsto que la Agencia realice una revisión profunda de al menos un 5% de los expedientes presentados [6].

También, es posible que las autoridades competentes de los Estados miembros evalúen las sustancias que puedan presentar un riesgo para la salud humana y el medio ambiente, con el fin de determinar si es necesario contar con información suplementaria. El programa de evaluación de las sustancias

será desarrollado por la Agencia en cooperación con estas autoridades competentes.

Si se sospecha que una sustancia presenta un riesgo para la salud humana o el medio ambiente, la Agencia incluirá esta sustancia en una lista específica, y un Estado miembro designado procederá a evaluarla para determinar si el declarante debe facilitar información suplementaria. La evaluación puede dar lugar a las conclusiones siguientes:

- A) La sustancia debe someterse a los procedimientos de restricción o de autorización;
 - B) La clasificación y el etiquetado de la sustancia deben armonizarse;
 - C) Se debe facilitar la información a las otras autoridades para que puedan adoptar las medidas adecuadas; por ejemplo, si a lo largo de la evaluación de la sustancia se llega a disponer de datos sobre las medidas de gestión de riesgo que pueden tener incidencia en las condiciones de uso de la sustancia, dichos datos deben remitirse a las autoridades encargadas de la reglamentación [6].
- Autorización: Las sustancias con propiedades extremadamente preocupantes pueden estar supeditadas a su autorización por la Comisión para usos particulares. Se pretende garantizar el control de los riesgos vinculados a estas sustancias y que las mismas sean paulatinamente sustituidas por otras sustancias o tecnologías adecuadas cuando sea económica o técnicamente viable.

La Agencia publicará y actualizará regularmente una lista de las sustancias (“lista de sustancias candidatas”) identificadas como extremadamente preocupantes. Entre estas pueden figurar:

- A) Las CMR (sustancias carcinógenas, mutágenas o tóxicas para la reproducción);
- B) Las PBT (sustancias persistentes, bioacumulables y tóxicas);
- C) Las vPvB (sustancias muy persistentes y muy bioacumulables);

Algunas sustancias preocupantes que tienen efectos graves e irreversibles sobre el ser humano y el medio ambiente, tales como los alteradores endocrinos [6].

- Restricciones: El procedimiento de restricción ofrece una red de seguridad que permite gestionar los riesgos que no están cubiertos de manera adecuada por otras disposiciones del sistema REACH. Las restricciones que pueden proponerse podrán referirse a las condiciones de fabricación, al uso o usos, a la comercialización de una sustancia, o en caso necesario, a la prohibición de dichas actividades. Los Estados miembros o la Agencia (previa petición de la Comisión) deberán preparar las propuestas en forma de expediente estructurado. La Comisión las aprobará después [6].
- Agencia Europea de Sustancias y Preparados Químicos: En virtud del Reglamento se crea la Agencia Europea de Sustancias y Preparados Químicos encargada de gestionar los aspectos técnicos, científicos y administrativos del sistema REACH y garantizar la coherencia de la toma de decisiones a escala comunitaria [6].
- Información: Será accesible la información no confidencial sobre las sustancias químicas, por ejemplo, con el fin de que las personas expuestas a las mismas puedan tomar decisiones acerca de la aceptabilidad de los riesgos relacionados con ellas. Algunas informaciones estarán disponibles gratuitamente en el sitio Internet de la Agencia, otra previa petición. Sin embargo, la Agencia también deberá respetar la confidencialidad de los datos de las empresas [6].
- Autoridades competentes: El Reglamento precisa que cada Estado miembro debe contar con autoridades que dispongan de las competencias y recursos necesarios para desempeñar los cometidos que les están asignados. Estas autoridades deberán cooperar entre sí y con la Agencia en el ejercicio de sus funciones [6].
- Contexto: El sistema REACH sustituye más de 40 directivas y reglamentos y crea un sistema único aplicable a todos los productos químicos.

El sistema REACH se completa con el Reglamento (CE) N° 1272/2008 sobre la clasificación, etiquetado y envasado de las sustancias químicas y sus

mezclas. Dicho Reglamento integra los criterios de clasificación y las normas de etiquetado del Sistema Globalmente Armonizado (SGA) de las Naciones Unidas en la legislación comunitaria, y las disposiciones de REACH en lo referente al inventario de las clasificaciones y los etiquetados [6].

1.3.2. PREVENCIÓN Y CONTROL INTEGRADOS DE LA CONTAMINACIÓN (LEY IPPC)

La Directiva 96/61/CE y la Ley 16/2002, de 1 de julio, de Prevención y Control Integrados de la Contaminación (Ley IPPC), establecen un nuevo enfoque en la concepción del medio ambiente. Definen importantes actuaciones como son la concesión de la Autorización Ambiental Integrada (AAI), el concepto de las Mejores Técnicas Disponibles (MTD) y la Transparencia informativa. Estos nuevos conceptos tienen importantes repercusiones tanto para las autoridades competentes como para los sectores industriales.

- Objetivo y ámbito de aplicación de la legislación IPPC: El objetivo es: evitar o, cuando ello no sea posible, reducir y controlar la contaminación en su conjunto, mediante sistemas de prevención y control que eviten su transmisión de un medio a otro”.
- Elementos clave: Los aspectos más relevantes de esta ley son:
 - A) Introduce el concepto de las Mejores Técnicas Disponibles (MTD) como referencia para establecer los Valores Límites de Emisión (VLE).
 - B) Establece la Autorización Ambiental Integrada (AAI), que integra y coordina procedimientos y autorizaciones existentes, para lo que es imprescindible la plena coordinación administrativa de los organismos implicados en su concesión.
 - C) Fomenta el diálogo y el intercambio de información entre las administraciones y sectores industriales.
 - D) Promueve el principio de transparencia informativa, a través de actuaciones como los registros PRTR y EPER y otros mecanismos de información.

Para las industrias la aplicación de esta ley supone:

- A) La exigencia de estar al corriente de las MTD definidas o consideradas para su sector.
- B) La simplificación de los trámites administrativos.
- C) Mediante los registros PRTR y EPER, junto a otros mecanismos, transparencia informativa de los complejos industriales hacia el público y otras partes interesadas.

La Autorización Ambiental Integrada es una nueva figura de intervención administrativa que, para las instalaciones afectadas, sustituye al conjunto de autorizaciones ambientales existentes hasta el momento, y que establece un condicionado ambiental para el funcionamiento de complejos industriales.

La AAI incluye todos los aspectos ambientales, y aquellos otros relacionados que consideren las autoridades ambientales competentes, de acuerdo con la legislación básica estatal y las correspondientes autonómicas [7].

1.4. IMPACTO AMBIENTAL DE RESIDUOS QUÍMICOS

Los residuos generados por el rubro industrial de los recubrimientos electrolíticos se consideran potencialmente contaminantes debido a sus características, encontrándose conformados mayoritariamente por metales pesados tales como zinc, níquel, cromo hexavalente, cobre, cadmio los cuales son considerados, entre otros aspectos, inhibidores de tratamientos biológicos de residuos líquidos y dañinos para la salud. Esta potencialidad contaminante tiene su justificación al considerar los volúmenes de agua utilizados en los procesos, sobre todo en los de lavado o enjuague que presentan contaminantes en descargas continuas. También, incide, pues el peso total de estos compuestos químicos es inferior a los acumulados en los estanques de electrodeposición, que comúnmente, son asociados a procesos batch (discontinuos) [8].

1.4.1. FUENTES Y CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS LÍQUIDOS

La industria de los recubrimientos electrolíticos lleva involucrado consumo de agua, tanto en los baños de proceso como en las etapas de lavado y enjuague. Las descargas de estas aguas residuales están compuestas por efluentes que se caracterizan por su carga contaminante tóxica en términos de su contenido de cianuro, metales pesados como el cromo hexavalente, ácidos, álcalis. El proceso de recubrimiento metálico, en general, es muy poco efectivo ya que sólo una pequeña cantidad de las sustancias utilizadas en éste se deposita en la pieza. Hasta un 90% de las sustancias puede evacuarse a través de las aguas residuales [8].

En particular, los residuos líquidos provenientes de procesos de cromado, se caracterizan por su contenido de ácido crómico libre y bicromatos en solución neutra o débilmente ácida. Si se utilizan baños ácidos de cobre, níquel, las aguas ácidas generadas contienen los metales correspondientes en concentraciones de trazas, más los diversos compuestos asociados a productos anexos agregados al baño.

En general, los residuos líquidos descargados por este tipo de industria, provienen de:

- 1) Aguas de lavado, enjuague y enfriamiento;
- 2) Baños de proceso agotados;
- 3) Mantenimiento de baños de proceso (ejemplo: filtración);
- 4) Baños de remoción y acondicionamiento: contaminados y agotados; y
- 5) Soluciones de sistemas de lavado/extracción de gases.

1.4.2. FUENTES Y CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS

Los residuos sólidos generados en el rubro de los recubrimientos electrolíticos lo constituyen los lodos resultantes de los baños de proceso y enjuague, así como también los lodos provenientes de algún sistema de tratamientos de las aguas residuales. La composición de estos lodos o borras es variada, pudiendo contener metales como níquel, cobre, cromo, zinc y otros metales pesados.

En este tipo de industria, cuando se obtienen residuos líquidos que contienen variadas especies químicas (metales pesados, cianuro, entre otros), se obtienen lodos de iguales características a los residuos líquidos que los generaron, lo que dificulta su reutilización o reciclaje. Sin embargo, la segregación o separación de corrientes de efluentes, permite la producción de un lodo con la posibilidad de reutilización o reciclaje en la industria metalúrgica [8].

1.4.3. FUENTES Y CARACTERIZACIÓN DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS

Las emisiones a la atmósfera de la industria de los recubrimientos electrolíticos se producen en las distintas etapas del proceso productivo y se caracterizan de acuerdo a la naturaleza de los compuestos químicos utilizados en ellos. Así, en los procesos de decapado, en donde se utiliza ácido nítrico se producen gases nitrosos y nítricos, debidos a la naturaleza oxidante del ácido. Del mismo modo, constituye fuente de contaminación el arrastre del ácido en forma de neblina o gotas, que se encuentran contenidas en los vapores de las soluciones de limpieza.

Por otra parte, la utilización de ácido clorhídrico provoca las emisiones del ácido, debido a la alta presión de vapor ejercida a temperatura ambiente. En la electrólisis se generan gases de hidrógeno en el cátodo y oxígeno en el ánodo, lo que permite que estos gases arrastren gotas de solución en su ascenso y difusión en el aire. En la preparación mecánica de las piezas, se produce la emisión de partículas de polvo.

Las cantidades de emisiones atmosféricas producidas en esta industria no son relevantes desde el punto de vista ambiental global, sin embargo existe un efecto importante desde el punto de vista de salud ocupacional, pues los trabajadores están expuestos directamente a las nieblas y aerosoles emitidos, cuando no existen aspiradores o absorbentes sobre los baños de proceso y cuando no se utilizan implementos de seguridad [8].

1.4.4. PRINCIPALES IMPACTOS AMBIENTALES GENERADOS POR EL SECTOR

Los impactos ambientales ocasionados por los residuos producidos en el rubro de los recubrimientos electrolíticos tienen directa relación con la naturaleza tóxica de muchos de los compuestos químicos involucrados, los cuales son los elementos base de esta industria. En particular es necesario hacer especial mención a los metales pesados tales como el cromo hexavalente (Cr [VI]) y la especie química cianuro. Así, entonces, los procesos llevados a cabo en este tipo de industria significan un importante aporte en el deterioro del medio ambiente. El riesgo que algunos de estos residuos suponen así como su corriente de generación y proceso se presentan en la Tabla 1.1.

Estos residuos contaminantes, presentes en los efluentes líquidos descargados, sólidos generados y vapores emitidos a la atmósfera, afectan el medio físico circundante así como la salud de las personas. Los efectos producidos abarcan desde el deterioro de los sistemas de recolección de aguas servidas; el deterioro de sistemas de tratamientos microbiológicos, inhibiendo el desarrollo microbiano; hasta el efecto en la salud de los trabajadores expuestos y la población en general [8].

Tabla 1.1. Residuos de recubrimiento electrolíticos.

Residuo	Riesgo	Corriente	Proceso
Álcali (hidróxido)	Corrosividad	Residuo líquido	Limpieza y electro depósito
Ácido (nítrico, sulfúrico, clorhídrico y fluorhídrico)	Corrosividad	Residuo líquido	Limpieza, acondicionamiento, electro depósito.
Detergentes	Toxicidad	Residuo líquido	Limpieza
Aceites y grasas	Toxicidad	Residuo líquido y solvente agotado	Limpieza
Metales pesados	Toxicidad	Baño de recubrimiento, agua de lavado, filtros agotados, lodos y nieblas.	Electro depósito
Cromatos	Toxicidad	Baño de recubrimiento, agua de lavado y lodos.	Electro depósito, cromado y recubrimiento.

El manejo inadecuado residuos químicos peligrosos supone riesgos al medio ambiente y a la salud de las personas expuestas a los efluentes de estos residuos, siendo de interés el impacto causado por estos en aguas, tierras y emisiones liberadas a la atmosfera:

- Contaminación del agua: En el rubro de los recubrimientos electrolíticos existen cuatro tipos de efluentes, dos de ellos, tales como soluciones ácidas y alcalinas pueden contener metales pesados (exceptuando el cromo hexavalente). Estos efluentes no son tóxicos, pero pueden contaminar los cuerpos de agua. Cuando son descargados en un sistema de recolección de aguas servidas pueden inhibir los procesos biológicos de tratamiento. Los otros dos tipos de efluentes corresponden a residuos tóxicos tales como los efluentes cianurados y los que contienen cromo hexavalente, los cuales al ser vertidos en cuerpos receptores, sin tratamiento previo los afectan gravemente, tal y como se presenta en las Tablas 1.2, 1.3 y 1.4.

Tabla 1.2. Efectos de ciertos contaminantes sobre la salud.

Parámetro	Efecto por respiración	Efecto por ingesta
Cadmio	<ul style="list-style-type: none"> • Perturbación aguda y crónica en el sistema respiratorio, y • Disfunción renal. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tumores testiculares, • Difusión renal, • Hipertensión, • Arterioesclerosis, • Inhibición en el crecimiento, y • Cáncer.
Cromo VI	<ul style="list-style-type: none"> • Cáncer pulmonar, • Perforaciones del tabique nasal, y • Complicaciones respiratorias. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ulceras, • Cáncer gastrointestinal, y • Perforaciones del tabique nasal, y • Enfermedades de la piel.
Plomo	<ul style="list-style-type: none"> • Interferencia en el proceso de formación de elementos sanguíneos, • Daños al hígado y riñón, y • Efectos neurológicos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Afecciones a la piel, • Anemia, • Disfunción neurológica, y • Daños al riñón
Níquel	<ul style="list-style-type: none"> • Enfermedades respiratorias, • Defectos y malformaciones en el nacimiento, • Cáncer pulmonar, y • Cáncer nasal. 	

Si bien es cierto, los procesos involucrados en la industria de recubrimientos son variados, éstos producen residuos industriales líquidos cuya composición o

caracterización química no es contaminante por sí sola, se tiene que tener en cuenta por tanto los efectos sinérgicos de tales compuestos al momento de ser mezclados en un mismo sistema de descarga o recolección [8].

Tabla 1.3. Efectos de ciertos contaminantes sobre los sistemas o instalaciones de recolección de agua.

Parámetro	Efecto
pH	Daño a los colectores, por efecto de su acidez y alcalinidad. Inhibición del crecimiento microbiano en el sistema de tratamiento biológico en las aguas servidas.
Temperatura	Aumento de las velocidades de reacciones químicas y bioquímicas, ocasionado por un aumento de temperatura, volatilización de compuestos orgánicos presentes en los residuos líquidos, con gasificación y producción de emisiones tóxicas y mal olor. La presencia de gases aumenta la presión en las tuberías.
Sólidos suspendidos	Se produce la acumulación de sedimentos al interior de las tuberías, produciendo efectos de obstrucción y escurrimiento de fluidos.
Aceites y grasas	Se produce acumulación y se dificulta el escurrimiento de fluidos. Además disminuye la transferencia de fluido en el cuerpo receptor.
Sulfato	Se produce la precipitación de sales insolubles que atacan las tuberías de cemento.
Metales pesados y tóxicos	Interfieren en los procesos biológicos de tratamientos de aguas servidas, inhibiendo el crecimiento microbiano.
Detergentes	Interfieren en los procesos biológicos de tratamientos de aguas servidas, inhibiendo el crecimiento microbiano.

Tabla 1.4. Efectos de ciertos contaminantes descargados en las mantos acuíferos

Parámetro	Efecto
pH	Efecto sobre las aguas destinadas a consumo humano, bebida animal, riego, recreación, estética y vida acuática.
Temperatura	Las altas temperaturas desfavorecen la dilución de oxígeno la masa de agua, alternando el desarrollo de la vida acuática.
Sólidos suspendidos	Se produce la acumulación de sedimentos que ocasionan embaucamientos y depósitos en terrenos de uso agrícola.
Aceites y grasas	Efecto sobre la absorción de oxígeno atmosférico en el agua, afecta los procesos de fotosíntesis de las algas, plantas y organismos acuáticos en general.
Metales pesados y toxico	Interfiere en los procesos naturales de autodepuración biológica de cuerpos receptores.
Detergentes	Interfieren en los procesos de absorción de oxígeno, creando ambientes anaerobios.

- Contaminación del suelo: Descargas no controladas de residuos líquidos en planta e inadecuada disposición de lodos no inertizados que contienen compuestos tóxicos, pueden producir contaminación de suelos y napas subterráneas.

Los efectos de los contaminantes infiltrados al suelo son similares a los ocasionados por descarga de residuos líquidos contaminados a las aguas superficiales.

- Contaminación atmosférica: Las emisiones al aire o atmósfera se producen en las diferentes etapas del proceso y dependen de su naturaleza. Ejemplos de lo anterior son las nieblas, que no constituyen una contaminación del ambiente externo, pero que sí afecta el ambiente interno desde el punto de vista de salud ocupacional. En la preparación mecánica de las piezas, se produce la emisión de partículas de polvo [8].

Finalizado el estudio de las leyes y normativas relativas al manejo de residuos peligrosos y teniendo conocimiento del impacto que los residuos generados en los procesos electrolíticos suponen al ambiente y la comunidad, se procede a la determinación de las principales etapas involucradas en este tipo de proceso, para la evaluación de los componentes que formulan las diferentes soluciones de proceso como también los residuos generados en cada etapa para su posterior consideración en el desarrollo de la propuesta de manejo de residuos.

2. DETERMINACIÓN DE LAS PRINCIPALES ETAPAS DEL PROCESO

En este capítulo se determinan las etapas y las soluciones de los procesos de recubrimientos electrolíticos de níquel y cromo en base a las cuales se harán las consideraciones para la formulación de la propuesta de manejo de residuos químicos considerando las diferentes variables del proceso, entiéndase: fórmulas de los baños, concentraciones, corrientes y temperaturas que aseguran la efectividad y calidad de los recubrimientos para la obtención de las propiedades requeridas. Debe aclararse que a pesar que los procesos de niquelado y cromado son el enfoque principal en este trabajo de graduación, se consideran también las etapas previas de preparación de la pieza para los recubrimientos por lo cual las etapas a continuación se presentan correspondiendo al orden de éstas en el proceso productivo.

2.1. DESENGRASE

La etapa de desengrase en los procesos de recubrimientos electrolíticos tiene como finalidad la eliminación de los aceites y grasas provenientes del tratamiento mecánico o almacenamiento de las piezas a recubrir. En la industria la efectividad de la etapa de desengrase será la base para la buena adhesión del recubrimiento al sustrato. Los baños de desengrase tienen en su composición agentes tensoactivos que emulsionan los aceites y las grasas adheridos a la superficie de la pieza. En el presente trabajo de graduación se consideraran dos formulaciones para esta etapa correspondientes a dos métodos diferentes de desengrase:

- A) Desengrase químico, y
- B) Desengrase electrolítico.

2.1.1. DESENGRASE QUÍMICO

Este consiste en la inmersión de la superficie a tratar en una solución química, durante un tiempo prefijado, empleando disolventes, detergentes o por electrólisis. Las películas de grasa que han sido adsorbidos se disuelven, pero existen otras sustancias que no pueden ser eliminadas por ellos, e incluso con las grasas tienen una limitación cuantitativa [9].

Los disolventes actúan por reacciones moleculares y para juzgar de las ventajas e inconvenientes se han de considerar unos principios básicos de su actuación.

- A) Con el uso se incrementa la contaminación del disolvente que ha de ser regenerado por destilación.
- B) Al retirar las piezas metálicas queda sobre su superficie una película de disolvente y una fracción de grasa disuelta que no evapora con el disolvente.

En el desengrase químico con detergentes (comerciales), se consigue eliminar cualquier tipo de grasa gracias a la presencia de elementos tensoactivos que disminuyen la tensión superficial del baño y que se añaden a una solución alcalina. Por otro lado, para favorecer el efecto mecánico de la limpieza, normalmente se utiliza algún mecanismo de agitación del medio, como el aire. En la Tabla 2.1 se presenta una formulación típica de un baño de desengrase empleado en la industria de los recubrimientos electrolíticos.

Tabla 2.1. Fórmula utilizada en el desengrase químico.

Reactivo	Concentración g·l ⁻¹
Sosa Caustica	40.0
Carbonato sódico	25.0
Fosfato trisódico 12H ₂ O	10.0
Metasilicato sódico 5H ₂ O	10.0
Parámetro	Valor
pH	12.0 – 14.0
Temperatura, °C	60.0 – 90.0

2.1.2. DESENGRASE ELECTROLÍTICO

Es también uno de los sistemas más utilizados y consiste en someter las piezas, actuando como cátodos, en la acción de una solución alcalina. Las grasas saponificables son atacadas y saponificadas por la acción de la solución alcalina, y el hidrógeno originado en la electrólisis sobre el cátodo favorece que las grasas se liberen de la pieza. Con este sistema, también se desprenden los óxidos metálicos por su reducción a través del hidrógeno. La formulación básica del medio es la siguiente, presentada en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Fórmula utilizada en el desengrase electrolítico

Reactivos	Concentración, g·l ⁻¹
Sosa Caustica	50.0-60.0
Fosfato trisódico 12H ₂ O	10.0-20.0
Gluconato sódico	10.0-30.0
Parámetro	Valor
pH	12.0 – 14.0
Temperatura, °C	80.0
Densidad de corriente, A/dm ²	5.0 - 10.0

2.1.3 RESIDUOS DE LA ETAPA DE DESENGRASE

Durante esta etapa la capa de grasa que se encuentre sobre el metal es eliminada y depositada en la superficie de las aguas de desengrase. No es recomendable la realización de un desengrase con disolventes ya que redistribuye el contaminante como una película fina continua de grasa sobre la pieza.

En las soluciones de desengrase se acumulan principalmente dos grupos de impurezas: por un lado aquellas partículas incorporadas al baño con las piezas en forma de suciedades, pigmentos y similares que pueden eliminarse normalmente por filtración; por otro lado están los aceites y grasas del mecanizado y pulido previo, así como los de protección anticorrosiva provisional. Los aceites se encuentran en el baño de desengrase en forma de emulsión de gotas de tamaño muy variable de 0.1 a 100 µm y en ocasiones de 0.01 µm en función, sobre todo, del tipo de

emulgente empleado y del tipo de aceite y grasas contaminantes. Los agentes emulgentes fuertes mantienen una gran parte del aceite en una emulsión muy fina con gotas que se encuentran por debajo de 1 µm de diámetro. Por otro lado, cuanto mayor sea el tamaño de las gotas de aceite, más fácilmente se separan de la fase acuosa debido a la diferencia de densidad, ascendiendo hasta la superficie del baño y acumulándose en la misma.

La Fig. 2.1 presenta en un diagrama de bloque el producto y los residuos generados en la etapa de desengrase. Entre los residuos generados se pueden mencionar los siguientes:

- A) Aguas aceitosas con alto contenido de materia orgánica;
- B) Aceites y grasas como resultado de la utilización de separadores de aceite con el fin de prolongar la vida del baño;
- C) El baño agotado; y
- D) Envases de los productos químicos utilizados [10].

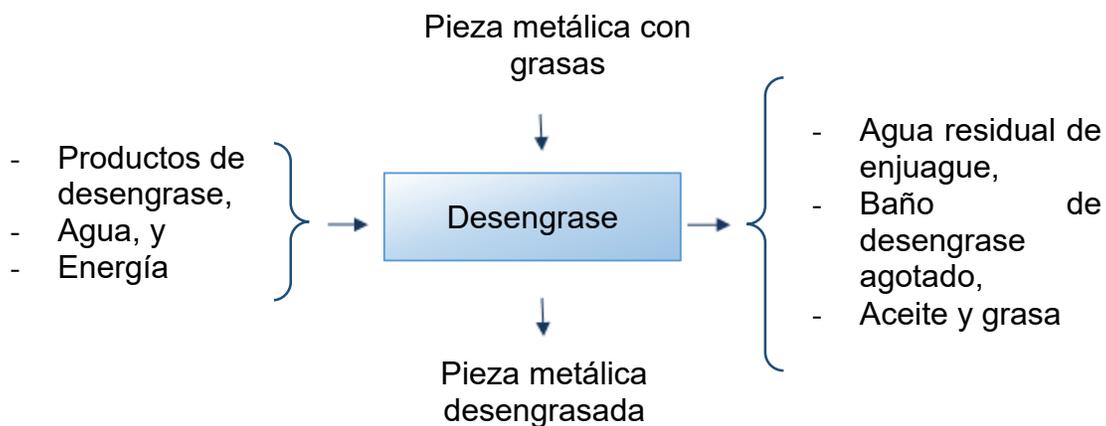


Fig. 2.1. Diagrama E/S del proceso de desengrase

2.2. DECAPADO

La denominación general de herrín se aplica a las capas de óxido que se forman en la superficie de los metales cuando son sometidos a elevadas

temperaturas. El herrín (óxido) puede formarse durante distintas operaciones, por ejemplo, en la fundición, forja, laminado en caliente y recocido.

La composición y estructura física del óxido depende de las condiciones en que se forma. Así, se relaciona con una serie de factores, tales como la temperatura y duración del caldeo, los efectos mecánicos del laminado y el forjado, etc., la composición de la atmósfera del horno y la duración del enfriamiento. Debe quitarse el óxido antes de aplicar cualquier acabado a la superficie de los metales. Algunas veces se aplica la pintura sobre el herrín, pero este proceder no es recomendable. La eliminación del óxido conviene efectuarla entre las operaciones de estampado y laminado, para evitar el desgaste que se produciría en las herramientas y matrices cuando se intenta trabajar el metal oxidado.

La eliminación del óxido de los metales ferrosos se efectúa decapando las piezas a recubrir en una solución de ácido sulfúrico o clorhídrico. Debe considerarse que el decapado no es una etapa imprescindible del proceso ya que este no será necesario como ejemplo en los metales recién maquinados los cuales no contienen óxidos.

Las altas temperaturas y las elevadas velocidades de calentamiento provocan el agrietamiento y la rotura en láminas de la película de óxido, aunque ello puede ocurrir también a temperaturas relativamente bajas. Las rápidas fluctuaciones de temperatura pueden provocar la rotura de las capas protectoras de óxido.

Se considera, en general, que el óxido formado al calentar el hierro está constituido por tres capas distintas:

- A) La capa más externa, que es relativamente delgada; contiene la mayor proporción de oxígeno y consiste en óxido férrico (Fe_2O_3).
- B) Una capa intermedia, que es más bien gruesa; está compuesta de óxido ferroso férrico (Fe_3O_4).
- C) Una capa relativamente compacta en la proximidad del hierro inalterado; contiene la mayor proporción de este elemento y su composición corresponde aproximadamente a la fórmula FeO . Es probable que esta capa no consista en el compuesto FeO , sino que sea una solución sólida denominada "wustite" que

se descompone por debajo de 570 °C en un eutectoide de hierro y óxido ferroso férrico Fe_3O_4 . En el caso del herrín formado por debajo de esta temperatura de transición, la capa más interna del mismo contiene Fe_2O_3 o Fe_3O_4 o una mezcla de ambos.

El óxido ferroso (FeO) en contacto con el acero es el más soluble de los óxidos presentes en el óxido; de aquí que, cuando exista junto a la superficie del acero una cantidad realmente importante de este óxido, tiene lugar un decapado mucho más rápido que cuando existen en dicha zona óxidos más elevados.

Aunque estas composiciones pueden variar dependiendo de muchos factores a los cuales está expuesto el metal. La eliminación del óxido se produce como resultado de la disolución química de:

- A) La disolución química de la capa de óxido.
- B) El desprendimiento del gas originado al reaccionar el ácido con el metal base.

Para la etapa de cromado electrolítico se consideraran dos formulaciones correspondientes a:

- A) Decapado por ácido sulfúrico, y
- B) Decapado por ácido clorhídrico.

También, se ha observado la utilización de ambos ácidos mezclados, aunque algunos activadores especiales de metales utilizan el bifluoruro amónico ($F_2H_2NH_4$) como sustancia de activación.

Después del decapado, la superficie contiene productos químicos que se generan por la acción de los ácidos sobre los óxidos. A continuación, por consiguiente, se eliminan estos productos mediante su neutralización y posterior lavado con agua corriente.

2.2.1. DECAPADO POR ÁCIDO SULFÚRICO

El mejor ácido sulfúrico comercial tiene una concentración del 95%; su acción sobre el hierro y el acero es pequeña aunque a diferencia del ácido clorhídrico también actúa sobre cobre y aluminio. Empezando con una baja concentración de

ácido, se observa que al aumentar la misma, disminuye el tiempo de decapado, hasta que alcanza un máximo cuando la concentración está próxima al 25%; después, la velocidad del decapado disminuye rápidamente. Por otra parte, el efecto de la temperatura es muy marcado. En la Tabla 2.3 se presenta la solubilidad del hierro y sus óxidos en ácido sulfúrico [11].

Tabla 2.3 Solubilidad del hierro y sus óxidos en el ácido sulfúrico.

Temperatura, °C	Concentración de ácido %	Disuelto de una muestra de 100 gramos en una hora.		
		Fe, g	Fe ₂ O ₃ , g	FeO, g
20	1.0	6.0	3.9	0.14
	5.0	15.0	4.8	0.56
	10.0	35.0	6.4	0.98
30	10.0	97.7	9.0	1.40

Así, en algunas pruebas sobre el decapado del acero oxidado indicadas en la Tabla 2.4, se encontró que aumentando la temperatura del ácido sulfúrico al 5% de 18 a 60 °C disminuía el tiempo de decapado casi a la décima parte. Por esta razón, el decapado con ácido sulfúrico deberá llevarse a cabo con ácido caliente; así podrá lograrse un mayor rendimiento.

Tabla 2.4 Efecto de la temperatura en el tiempo de decapado.

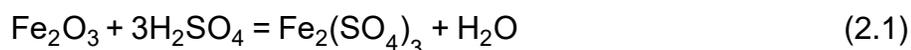
Ácido sulfúrico	18 °C	40 °C	60 °C
5%	55 min	15 min	5 min
10%	13 min	6 min	2 min
Ácido clorhídrico	18 °C	40 °C	60 °C
5%	135 min	45 min	13 min
10%	120 min	32 min	6 min

La velocidad del decapado disminuye a medida que aumenta en la solución el contenido en sulfato ferroso. El efecto retardador de las sales ferrosas es menor a elevadas temperaturas que a bajas temperaturas, tanto en el caso del ácido sulfúrico como en del ácido clorhídrico y es debido a la mayor solubilidad de las sales a alta temperatura. Con bajas concentraciones de ácido sulfúrico el efecto es menos marcado que con las elevadas. Las sales férricas aceleran la velocidad de decapado, pero ello solo tiene interés científico, puesto que es despreciable el contenido de hierro trivalente en las soluciones de decapado [11].

Con ácido sulfúrico de baja concentración, el peso de óxido disuelto, comparado con el del hierro metálico, el cual es considerablemente mayor que en el caso de emplearse ácido clorhídrico de concentración equivalente. La disolución del óxido en el ácido sulfúrico (de cualquier concentración) tiene una marcada importancia en las operaciones de decapado, y en cuanto a la relación entre la cantidad de hierro metálico disuelto y la de sus óxidos, es mucho mayor a elevadas temperaturas que a temperatura ambiente.

Se ha fijado en $80 \text{ g}\cdot\text{f}^{-1}$ la máxima cantidad de hierro que puede tolerarse en los baños de decapado con ácido sulfúrico, mientras que con los baños de ácido clorhídrico se da un máximo práctico de $120 \text{ g}\cdot\text{f}^{-1}$.

Con el ácido sulfúrico, las reacciones que tienen lugar están en gran parte limitadas a los óxidos, ferroso y férrico y el hierro metálico, tal como se presenta en las Ecs. (2.1 - 2.3)



La reducción del sulfato férrico a sulfato ferroso se realiza a causa de la presencia del hidrógeno naciente, tal como se presenta en la Ec. (2.4):



En la Tabla 2.5 se presenta la composición de los baños de decapado con ácido sulfúrico

Tabla 2.5. Fórmula para Decapado por ácido sulfúrico.

Reactivo	Concentración, $\text{g}\cdot\text{f}^{-1}$
Ácido sulfúrico	5 -35
Parámetros	Valor
Temperatura, °C	50 – 80
Límite máximo de hierro en el baño, $\text{g}\cdot\text{f}^{-1}$	80.0

2.2.2. DECAPADO POR ÁCIDO CLORHÍDRICO

El ácido clorhídrico comercial consiste en una solución acuosa al 30 a 35% de ácido clorhídrico gaseoso. La volatilidad del ácido hace impracticable su empleo a elevadas temperaturas; a temperaturas superiores a 40 °C la velocidad de volatilización del ácido es realmente rápida. En la práctica actual, la velocidad de decapado se incrementa más con elevadas concentraciones de ácido que con una elevación de la temperatura. La solubilidad del hierro y sus óxidos en el ácido clorhídrico se presentan en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6 Solubilidad del hierro y sus óxidos en el ácido clorhídrico.

Temperatura, °C	Concentración de ácido, %	Disuelto de una muestra de 100 gramos en una hora.		
		Fe, g	Fe ₂ O ₃ , g	FeO, g
20	1	20.8	0.112	0.48
	3	31.6	0.360	0.76
	5	40.7	0.710	0.83
	10	72.0	10.600	7.50

Las reacciones que se dan durante la etapa de decapado con ácido clorhídrico según las Ecs. (2.5 - 2.7) son las siguientes:



La reducción del cloruro férrico por el hidrógeno naciente está representada por la Ec. (2.8).



Después del decapado, queda sobre la superficie del metal una capa de lodo adherente; mucho de este lodo se acumula también en la parte superior del depósito. En el decapado con ácido sulfúrico, el depósito contiene hasta un 0.6% del hierro disuelto en el ácido; con ácido clorhídrico, la cantidad de lodo producida es menor. Este lodo contiene también una alta proporción de los metales nobles

contenidos como trazas en el metal que se decapa, los cuales se precipitan sobre la superficie del acero [11].

El uso del ácido clorhídrico tiende, de esta manera, a dar una superficie más blanca y pulida que la producida por el ácido sulfúrico, y es por ello preferido en algunas operaciones a pesar de su elevado costo y de su acción más lenta. En la Tabla 2.7 se presenta la formulación del baño para decapado utilizando ácido clorhídrico.

Tabla 2.7. Fórmula para decapado de ácido clorhídrico

Reactivo	Valor
Ácido Clorhídrico (HCl), %	5 - 18
Parámetros	Valor
Temperatura, °C	20 - 30
Límite máximo de hierro en el baño, g·l ⁻¹	120

2.2.3. RESIDUOS DE LA ETAPA DE DECAPADO

La función del decapado consiste en eliminar los óxidos metálicos y partículas metálicas de la superficie del metal base.

Después del decapado, queda sobre la superficie del metal una capa de lodo adherente; mucho de este lodo se acumula también en la parte superior del depósito. En el decapado con ácido sulfúrico, el depósito contiene hasta un 0.6% del hierro disuelto en el ácido; con ácido clorhídrico, la cantidad de lodo producida es menor. Este lodo contiene también una alta proporción de los metales nobles contenidos como trazas en el metal que se decapa, los cuales se precipitan sobre la superficie del acero. Un análisis del lodo depositado sobre una chapa de acero señala la presencia de hasta un 20% de cobre, 7% de níquel y 6% de arsénico; el acero contiene sólo un 0.18% de cobre, 0.08% de níquel y 0.43% de arsénico.

Es importante el lavado cuidadoso del metal decapado para quitar estos depósitos. En la Fig. 2.2 se presenta el producto y residuos de este proceso. Durante la etapa de decapado y el posterior enjuague se han identificado los efluentes de residuos listados a continuación:

- A) Aguas contaminadas con ácido sulfúrico,
- B) Aguas contaminadas con ácido clorhídrico, y
- C) Lodos de hierro.

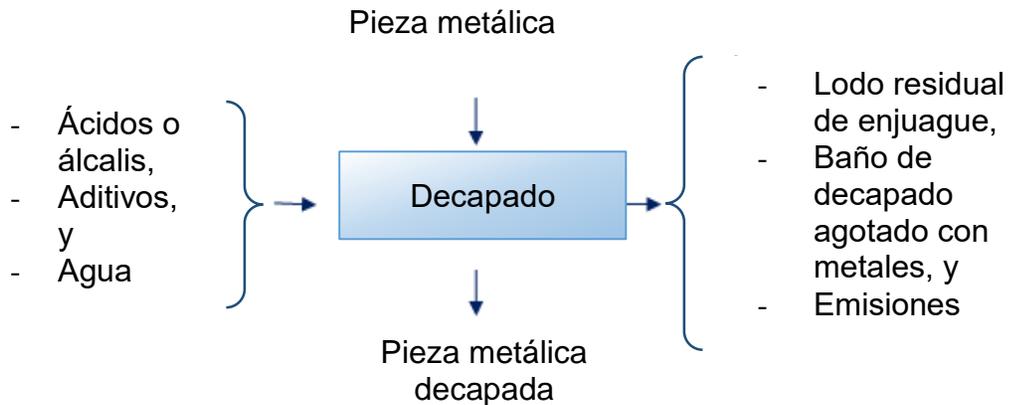


Fig. 2.2. Diagrama E/S del proceso de decapado.

2.3. NIQUELADO

Las aplicaciones electrolíticas de níquel son ampliamente utilizadas para fines decorativos de superficies. Por lo general, éstas se complementan con recubrimientos delgados de cromo para conservar su brillo debido a la tendencia del níquel a empañarse con el paso del tiempo. Los recubrimientos de níquel decorativos son siempre de poco espesor, en un intervalo de 1 - 40 μm . También, se hacen aplicaciones gruesas de níquel, que pueden alcanzar varios milímetros de espesor, esta aplicación se realiza para proteger a las piezas contra la corrosión, el desgaste o cuando se trata de rellenarlas (alabes de turbinas, hélices, ejes de bombas, varillas de émbolos, etc.).

El níquel es bivalente. Las sales de níquel más utilizadas para la preparación de baños de niquelado son: sulfato de níquel, cloruro de níquel, sulfato doble de níquel y de amonio, entre estos el más utilizado es el sulfato de níquel. Sin embargo, actualmente existe cierta tendencia en emplear baños de niquelado a base de

cloruros. En general, el baño de niquelado comúnmente contiene de 100 a 400 g de sulfato de níquel por litro, de 10 a 40 g de cloruro de níquel o de cloruro sódico y de 20 a 30 g de ácido bórico. La concentración en sulfato de níquel se incrementa con la densidad de la corriente. El cloruro facilita la corrosión de los ánodos y el ácido bórico hace el papel de regulador oponiéndose a las variaciones de pH. En ciertos casos se añaden sulfates alcalinos, de sulfato doble, para aumentar la conductibilidad de las soluciones y de disminuir la concentración de iones de níquel. Los diversos baños de niquelado actúan generalmente con muy débil acidez (pH de 4.8 a 6.5). En ciertos casos la acidez puede ser más fuerte: pH de 1.5 a 2, como en los baños de cloruro entre los cuales se pueden mencionar los baños de níquel en caliente sin agitación (Watts).

El pH tiene un papel importante en los baños de niquelado. Su valor óptimo dependerá de la composición de electrolito, de su temperatura y de la densidad de corriente. Así, para cada baño existe un valor límite del pH. La acidez se debe verificar con frecuencia. Para ello se puede seguir diversos métodos los cuales serán mencionados posteriormente en este trabajo.

Existen diferentes tipos de baños de níquel entre los cuales se pueden mencionar:

- A) Baños fríos: Actúan a una temperatura ordinaria, con densidades de corriente bajas en el intervalo de 0.2 a 1 A/dm². Los baños fríos son cada vez menos aplicados y reemplazados por los baños calientes que representan la tendencia moderna. En la formulación de estos baños entran, usualmente, además del sulfato de níquel, el sulfato doble de níquel y amonio, cloruros, ácido bórico y a veces sulfato sódico y sulfato de magnesio.
- B) Baños calientes sin agitación: Sin agitación, trabajan con densidades de corriente de 2 a 5 A/dm². Los baños calientes permiten obtener rápidamente recubrimientos de níquel espesos para proteger eficazmente al acero, las aleaciones de cobre, etc.
- C) Baños calientes con agitación: Actúan con densidades de corriente que van de 5 – 12 A/dm². En un baño frío, por ejemplo, con una densidad de corriente de 0.5 A/dm² se requiere de dos horas para efectuar una aplicación electrolítica de

1/100 mm de espesor, mientras que en un baño caliente, admitiendo 3 A/dm², son necesarios veinte minutos.

D) Niquelado brillante: Por lo general, los baños brillantes de níquel se encuentran protegidos por patentes. Pueden distinguirse dos tipos de baño:

a) Los que contienen sales metálicas, como las sales de cadmio, zinc o de cobalto.

b) Baños que contienen productos orgánicos como resinas, aminas sulfonadas, aldehídos y diversos cuerpos muy complejos.

Para la etapa de niquelado electrolítico se consideraran dos formulaciones correspondientes a:

A) Recubrimiento de níquel en caliente sin agitación (Watts), y

B) Recubrimiento de níquel duro.

2.3.1. RECUBRIMIENTO DE NÍQUEL EN CALIENTE SIN AGITACIÓN (WATTS)

La mayoría de los baños de niquelado brillante que se usan hoy día están basados en la formulación propuesta en 1916 por Watts. Estos baños se formulan a partir de algunos componentes básicos como son el sulfato de níquel, el cloruro de níquel y el ácido bórico. Los baños calientes permiten obtener recubrimientos rápidos de níquel de gran espesor para proteger eficazmente el sustrato a recubrir. Este baño con bajo pH proporciona aplicaciones de níquel llamadas blandas, cuya dureza máxima se encuentra en el intervalo entre 150 – 160 Vickers, además de presentar las siguientes ventajas en comparación con otras formulaciones:

A) Pueden emplearse altas densidades con un buen poder de distribución del recubrimiento,

B) Pueden emplearse altas densidades sin efectos de quemado en el recubrimiento, y

C) Mejor rendimiento anódico.

Existe, no obstante, una cierta tendencia al picado para ciertos pH y el rendimiento catódico es más débil. En la Tabla 2.8 presenta una formulación de este tipo de recubrimiento y sus condiciones de trabajo [12].

Tabla 2.8. Fórmula para recubrimiento de níquel en caliente sin agitación

Reactivo	Concentración, g·l ⁻¹
Sulfato de níquel	330.0
Cloruro de níquel	45.0
Ácido bórico	38.0
Parámetro	Valor
pH	1.5 - 4.5
Temperatura, °C	45.0 – 60.0
Densidad de corriente, A/dm ²	2.5 – 8.0

2.3.2. RECUBRIMIENTO DE NÍQUEL DURO

Los componentes básicos de este tipo de formulaciones son el sulfato de níquel, el cloruro amónico y el ácido bórico. Este tipo de recubrimientos permiten obtener depósitos de gran dureza, buena resistencia a la corrosión y una superior resistencia a la abrasión sin necesidad del uso de aditivos orgánicos. Los altos valores de dureza se logran a través de la inclusión de iones de amonio obtenidos a partir del cloruro amónico. Debido a las propiedades deseadas para este tipo de recubrimientos se debe tener un estricto control sobre las condiciones de operación del baño ya que las condiciones que suponen un incremento de dureza de hasta ~425 Vickers en el recubrimiento implican también un incremento de esfuerzo de tracción en la superficie y disminución de la ductilidad (elongación). Entre estas condiciones se pueden mencionar:

- A) Incremento del pH sobre 5.0,
- B) Disminución en la temperatura, y
- C) Incremento en el contenido de cloruros.

Se aplican para recargar piezas que se mecanizan mejor que los recubrimientos de cromo y no presentan la tendencia a la formación de fisuras, sin dejar de presentar una buena resistencia a la corrosión. Aplicaciones de este tipo

de recubrimientos incluyen equipo de procesamiento, cilindros de secado, pistones hidráulicos y cilindros automotrices. En la Tabla 2.9 se presenta una formulación de este tipo de recubrimiento y sus condiciones de trabajo [13].

Tabla 2.9. Fórmula para recubrimiento de níquel duro.

Reactivo	Concentración, g·l ⁻¹
Sulfato de níquel	180.0
Cloruro amónico	25.0
Ácido bórico	30.0
Parámetro	Valor
pH	5.6 - 5.9
Temperatura, °C	43.0 – 60.0
Densidad de corriente, A/dm ²	2.0 – 10.0

2.3.3. RESIDUOS DE LA ETAPA DE NIQUELADO

Uno de los principales generadores de residuos son las aguas provenientes del lavado posterior a la pieza que ha salido del tanque de níquelado electrolítico, luego de dejar escurrir la pieza tiempo suficiente suspendida sobre el tanque, para generar la mínima cantidad de residuos por arrastre entra la pieza al proceso de lavado estos tanques de lavado al llegar al límite de acidez fijada o permitida para descarga o tratamiento para su posterior descarga, contiene presencia de ácidos y el filtrado de estos tanques durante el tratamiento genera lodos con presencia de níquel principalmente, así como se puede notar en la Fig. 2.3.

Si el agua residual de estos electrolitos se mezcla con aguas residuales formadoras de complejos de otros procesos, se generan complejos de níquel muy estables que sólo con mucha dificultad pueden ser destruidos.

Puesto que los baños de níquel se filtran continuamente, se generan residuos de filtración, además de concentrados al cambiar los baños de níquel (lo que rara vez ocurre) y, desde luego, las pérdidas de la solución del baño en el arrastre hacia los enjuagues [14].

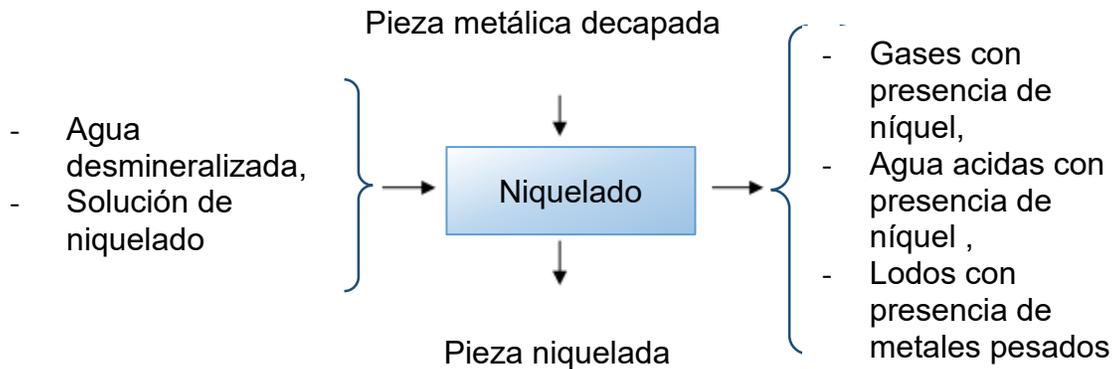


Fig. 2.3. Diagrama E/S del proceso de niquelado electrolítico.

2.4. CROMADO

El cromado electrolítico es el principal de los recubrimientos considerados en el presente trabajo de graduación debido a sus varias aplicaciones en la industria como recubrimiento o capa superficial por sus propiedades decorativas o ingenieriles.

Las aplicaciones electrolíticas de cromo tienen un aspecto blanco con reflejos azulados de gran dureza (400-1000 Brinell), ofrecen buena resistencia al empañamiento. Existen recubrimientos muy delgados, destinados a la decoración, y recubrimientos espesos para diversas aplicaciones industriales. El cromado electrolítico para decoración es por lo general depositado sobre una capa de níquel que garantiza la protección de las piezas contra la corrosión atmosférica, al mismo tiempo que la delgada película de cromo se opone al empañamiento. A consecuencia del débil rendimiento de los baños de cromado, no puede depositarse cromo de forma económica, sino en capas muy poco espesas y haría falta un espesor de por lo menos 0.03 mm para obtener una buena resistencia contra los agentes atmosféricos. El espesor de los recubrimientos de cromo para la decoración no sobrepasa la milésima de milímetro.

El cromo posee buena resistencia a la oxidación a elevada temperatura; a los compuestos de azufre, resiste al ataque de los ácidos nítrico, acético cítrico y fosfórico, el cromo resiste a la mayor parte de los agentes químicos: ácidos, bases,

sales, no resiste al ácido clorhídrico y sulfúrico caliente. Se recomienda su aplicación como revestimiento para resistencia a diversos agentes químicos, dureza, resistencia al desgaste, como superficie de frotamiento, presenta buen aguante ante el petróleo y sus derivados se les pueden emplear en medio oxigenado, vapor de agua, en presencia de gas sulfuroso hasta 1000 °C. Cuando se depositan capas espesas las aplicaciones son industriales que requieren resistencia al desgaste, la mejora de las condiciones de rozamiento, resistencia de erosión, etc., como en matrices de estirado, cilindros de laminadora, ejes de bombas, émbolos, etc., pudiendo oscilar, en estos casos, el espesor entre una centésima de milímetro y unas décimas. Se tiene que diferenciar los depósitos decorativos inferiores a una micra, y los depósitos decorativos se dan sobre una capa de níquel para evitar su deslucimiento o empañadura. Los depósitos de cromo micro sulfurado mejoran grandemente la resistencia a la corrosión. Los depósitos de cromo duro se caracterizan por un espesor que puede ir de algunos micrómetros a varias décimas de milímetro.

Para la etapa de cromado electrolítico se consideraran dos formulaciones correspondientes a:

- A) Un recubrimiento de cromo hexavalente autorregulable, y
- B) Un recubrimiento de cromo trivalente microporoso.

2.4.1. RECUBRIMIENTO DE CROMO HEXAVALENTE AUTORREGULABLE

Los electrolitos más utilizados para la aplicación de recubrimientos de cromo es el formulado a partir del trióxido de cromo (CrO_3) en el cual el ion metálico esta en forma de cromo hexavalente, dicho electrolito requiere de la adición de ácido sulfúrico (H_2SO_4), sin el cual no sería posible la electrodeposición de este metal. El óxido de cromo reacciona con el agua formando el ácido crómico (H_2CrO_4) según la reacción indicada en la Ec. (2.9).



Sin embargo, como el medio electrolítico es ácido en realidad el ácido crómico existirá en forma de ion dicromato (Cr_2O_7).

Existen diferentes teorías referentes al mecanismo de electrodeposición de cromo hexavalente entre las cuales destacan y son aceptadas las teorías citadas a continuación [15].

- Teoría de la reducción directa del cromo hexavalente: la cual postula que la reducción de cromo hexavalente a cromo metálico se lleva a cabo en una sola etapa según la Ec. (2.10).



- Teoría de la reducción por etapas del cromo hexavalente: la cual postula que la reducción de cromo hexavalente se realiza a través de dos etapas intermedias en que se generan cromo trivalente y cromo bivalente según la Ec. (2.11).



Además, de la reducción del cromo hexavalente a cromo metálico es importante considerar otro factor importante en estos procesos, este es el envejecimiento de cromo hexavalente; es decir, la formación de cromo trivalente a partir de este. El envejecimiento del electrolito permite la obtención de un buen electrodeposición de cromo, esto se realiza mediante el “entrenamiento” del baño recién preparado, dicho entrenamiento se refiere a la puesta en operación del baño durante un periodo de tiempo determinado para asegurar la formación de cromo trivalente en el mismo.

La formación de cromo trivalente en el electrolito en funcionamiento se lleva a cabo a través de las reacciones de reducción en el cátodo según la Ec. (2.11) citada anteriormente y la Ec. (2.12), así como las reacciones de oxidación en el ánodo según las Ecs. (2.13 y 2.14)



El propósito del envejecimiento es fomentar la reacción representada por la Ec. 2.11 y retrasar la reacción representada por la Ec. 2.10, lo cual permite obtener una concentración determinada de cromo trivalente en el electrolito la cual debe mantenerse lo más constante posible para el óptimo funcionamiento del electrolito. Una fórmula correspondiente a este tipo de recubrimiento se presenta en la Tabla 2.10.

Tabla 2.10. Fórmula para recubrimiento de cromo hexavalente autorregulable.

Reactivo	Concentración, g·l ⁻¹
Ácido crómico (CrO ₃)	150.0
Ion sulfato (SO ₄ ²⁻)	1.2
Ion fluoruro (F)	0.6
Parámetro	Valor
Temperatura, °C	43.0 – 44.0
Densidad de corriente, A/dm ²	23.0 – 40.0

2.4.2. RECUBRIMIENTO DECORATIVO DE CROMO TRIVALENTE MICROPOROSO

El cromado a partir de electrolitos de cromo trivalente se introdujo por consideraciones ambientales para cumplir con las regulaciones que limitan el uso de los compuestos de cromo hexavalente considerado cancerígeno. Además, el tratamiento de aguas residuales provenientes de electrolitos de cromo trivalente no es tan complejo como el requerido por las provenientes de electrolitos de cromo hexavalente ya que se evita la necesidad de convertir el cromo hexavalente a cromo trivalente, siendo únicamente necesaria su precipitación a su estado de hidróxido, como también menores costos de tratamiento debido a sus menores contenidos de cromo.

Debido a que los recubrimientos obtenidos mediante esta formulación son microporosos estos poseen una mayor resistencia a la corrosión ambiental debido a la menor obtención interna a diferencia de las generadas por otras formulaciones. Además de esto, este tipo de electrolito tiene un mayor poder de penetración y cobertura, como también la capacidad de no ser afectado por interrupciones en la corriente eléctrica, favoreciendo así el proceso de producción debido a su versatilidad.

En contraste a estas ventajas este tipo de recubrimientos también cuenta con las desventajas detalladas a continuación.

- A) Recubrimientos de espesor limitado entre 20 y 25 μm ,
- B) Recubrimientos de tono más oscuro,
- C) Mayor costo inicial del electrolito,
- D) Marcada sensibilidad a la presencia de impurezas, y
- E) Control continuo de concentración de cromo trivalente requerido.

Este tipo de recubrimiento se realiza mediante electrolitos acuosos y electrolitos basados en disolventes orgánicos y agua. Las sales más utilizadas para esto son: el cloruro de cromo y sulfato de cromo, agentes complejantes (sales de amonio y ácido glicólico), tensoactivos y agentes conductores de corriente (cloruros y bromuros). En la Tabla 2.11 se presenta una formulación de este tipo de recubrimiento y sus condiciones de trabajo.

Tabla 2.11. Fórmula para recubrimiento decorativo de cromo trivalente microporoso.

Reactivo	Concentración, $\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$
Sulfato de cromo ($\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$)	120
Cloruro de potasio (KCl) o sódico	75.0
Cloruro amoníaco (NH_4Cl)	90.0
Ácido bórico (H_3BO_3)	50.0
Formiato de potásico (HCO_2K) o crómico	60.0
Parámetro	Valor
pH	1 - 3.5
Temperatura, $^{\circ}\text{C}$	20.0 – 40.0
Densidad de corriente, A/dm^2	10.0 - 15.0

2.4.3. RESIDUOS DE LA ETAPA DE CROMADO

Durante el proceso de cromado ocurre un sobre potencial en la capa superficial de la pieza a cromar, a causa de reacciones de óxido-reducción y diferencias de concentración, lo que genera una separación simultánea de hidrógeno que el baño emite como gas y que arrastra fracciones del baño. Algunas empresas que cuentan con equipos de control de emisiones a la atmósfera aspiran y condensan estas emisiones, y las devuelven al baño después de haberlas regenerado. Al agregar al electrolito agentes tenso activos fluorados y espumantes, se evita que la solución salpique fuera del tanque y se reducen pérdidas por evaporación de la solución de cromado tóxica [14].

Después del cromado, las piezas se lavan, generalmente, en un enjuague permanente o de recuperación y después en uno o dos enjuagues en cascada. Como la concentración del electrolito en el enjuague permanente se incrementa, debido a los arrastres, este se emplea para rellenar el baño de cromo, a fin de recuperar el electrolito arrastrado y reponer el volumen del baño que se ha evaporado.

Por el peligro para la salud humana y al ambiente, debido a la toxicidad de los compuestos solubles de cromo (Cr VI), durante el cromado y en el tratamiento de los residuos y aguas residuales generados en este proceso, deben observarse normas especiales de seguridad en el trabajo y de protección ambiental. Las aguas residuales generadas de este proceso deben tratarse a fin de reducir el Cr VI a Cr III, menos tóxico, este proceso generalmente se hace con bisulfito de sodio.

Los principales residuos que se generan son lodos de concentrado (lodos del tanque del baño), aguas de enjuague ácidas contaminadas por arrastres, emisiones y lodos del sistema de tratamiento, tal como se presentan en el diagrama de proceso en la Fig. 2.4.

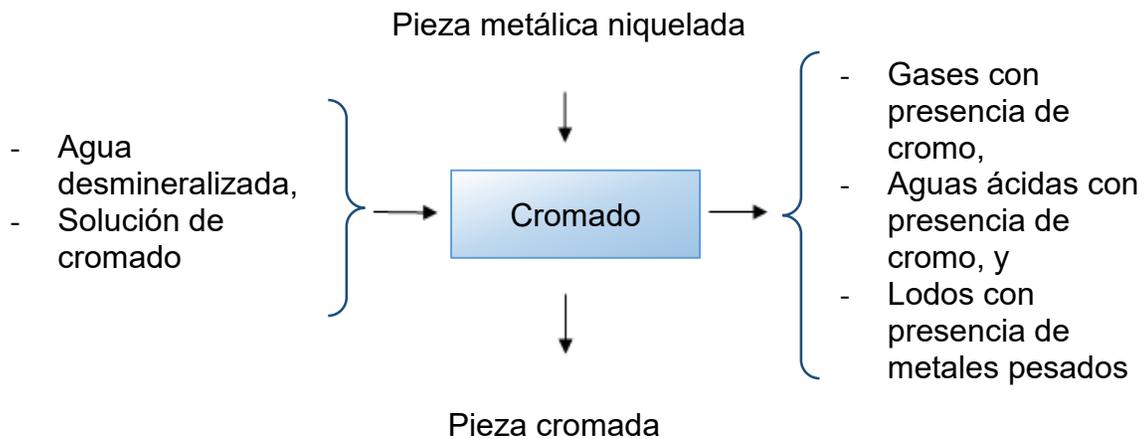


Fig. 2.4. Diagrama E/S del proceso de cromado electrolytico.

Habiendo sido determinadas las etapas del proceso de mayor intereses para el desarrollo de este trabajo, sus componentes, parámetros de operación y efluentes de residuos generados al final de cada proceso, es posible llevar a cabo en el Capítulo 3 la elaboración de la propuesta de manejo de residuos, con base las etapas y formulaciones seleccionadas anteriormente, para su consideración y aplicación a nivel nacional.

3. DESARROLLO DE PROPUESTA DE MANEJO DE RESIDUOS

Para la elaboración de la propuesta se consideraran los métodos y tecnologías empleados en la industria y recomendados en la bibliografía para la determinación y recopilación de estos en una serie de actividades o normativas para establecer un proceso óptimo de manejo de residuos para ser considerado por la industria de recubrimientos electrolíticos de niquelado y cromado a nivel nacional en la mejora de sus procesos productivos. Para esto se considera el proceso de manejo de residuos atendiendo a las etapas de análisis de calidad de baños para determinar los factores que afectan la vida útil de las soluciones, mantenimiento y regeneración de las soluciones, métodos de reducción de residuos, pretratamiento de residuos, almacenamiento y transporte de residuos concluyendo con los métodos de disposición final de residuos.

3.1. ANÁLISIS DE CALIDAD DE BAÑOS DE RECUBRIMIENTO

Antes de iniciar cualquier plan de manejo de residuos en cualquiera de las etapas del proceso productivo se debe evaluar y asegurar que la vida útil del baño ha llegado realmente a su fin y no cuenta con las características necesarias para proporcionar al recubrimiento de las propiedades requeridas o cuando el mantenimiento y prolongación de su vida útil implique gastos que sobrepasan los beneficios del producto generado en estas condiciones o los gastos de una renovación total del baño.

Para este fin deben considerarse tres variables que afectan negativamente la calidad de los baños disminuyendo en consecuencia su vida útil:

- A) Pérdida de electrolito por deposición en metal,
- B) Pérdida de electrolito por arrastre,
- C) Concentración de impurezas en el baño.

Nótese que cualquiera de las tres variables anteriores tiene como consecuencia la modificación de las propiedades del baño dando lugar a:

- A) Modificación de la concentración de los componentes del baño,
- B) Modificación del pH del baño electrolítico.

A consecuencia de lo cual se ven afectados también las variables del proceso y la calidad de los depósitos teniéndose entonces:

- A) Modificación en la capacidad de deposición del baño requiriendo por lo tanto mayores tiempos de inmersión, mayor temperatura de operación del proceso o mayores densidades de corriente para la obtención del espesor requerido;
- B) Quemado de la película depositada obteniéndose recubrimientos opacos o de coloraciones no deseadas;
- C) Mala adherencia del depósito al material base dando lugar a zonas sin recubrir, desprendimiento de la película de recubrimiento por fragilidad del depósito, oxidación, corrosión o fallo de piezas en operación;
- D) Deficientes propiedades mecánicas del depósito las cuales generan daños en la película, riesgo de fallo en la pieza recubierta y/o en otros componentes mecánicos o sistemas dependientes de la pieza en cuestión.

Debe entonces recalcarse la importancia de un estricto control de variables que permitan la corrección de los valores de concentración y pH de la solución de los baños electrolíticos, así como también la implementación de métodos para disminuir pérdidas de electrolito y la contaminación del mismo. Entre las pruebas para la determinación de las condiciones del baño y de la calidad del recubrimiento se sugieren:

- A) Análisis del baño en una celda de Hull,
- B) Pruebas de espesor por método coulométrico,
- C) Pruebas cualitativas de adhesión,
- D) Pruebas analíticas del electrolito, y
- E) Análisis del baño en pH-metro.

3.1.1. ANÁLISIS EN CELDA HULL

Una celda Hull es una unidad de recubrimientos electrolíticos de pequeña escala de dimensiones específicas como se presenta en la Fig. 3.1 con capacidad de 276 ml. La cual, tiene como función la aplicación de recubrimientos catódicos con el fin de caracterizar los recubrimientos obtenidos en todas las densidades de corriente a escala operacional [16].

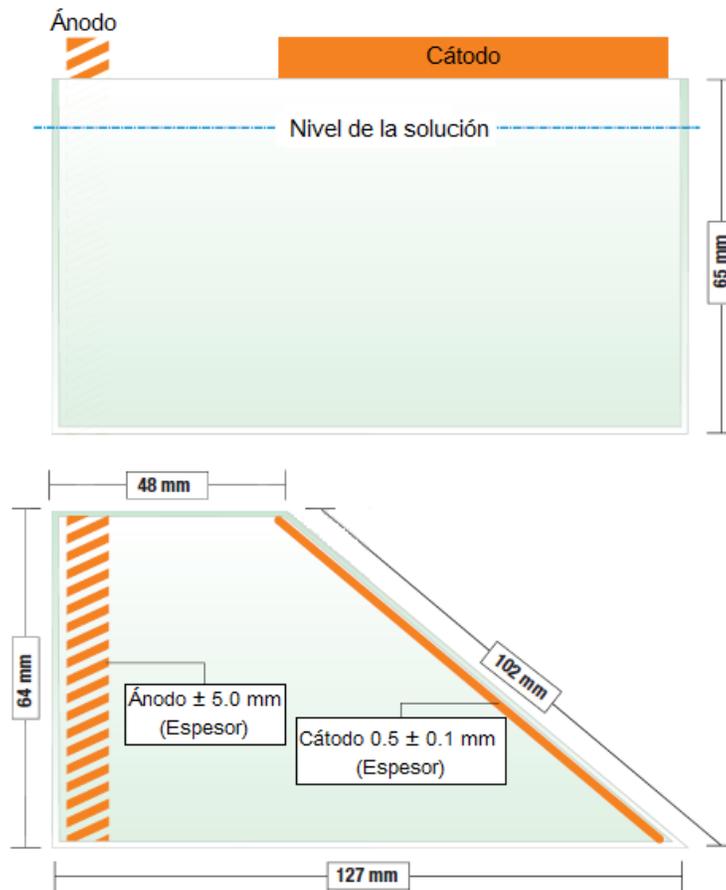


Fig. 3.1. Dimensiones de una celda Hull de 276 ml.

Considerando que no es económico ni lógico el análisis de las soluciones directamente en los tanques de recubrimiento, y que se ha demostrado experimentalmente que los análisis pueden ser realizados en pequeñas muestras de la solución en cuestión, se recomienda el uso de una celda Hull para la determinación de las causas exactas y/o correcciones para un problema específico,

según las condiciones de los componentes primarios, aditivos e impurezas. Entre los factores que se pueden analizar en una celda Hull se tienen:

- A) Límites aproximados de densidades y brillo deseados,
- B) Concentraciones aproximadas de constituyentes primarios,
- C) Concentraciones de agentes de adiciones, y
- D) Impurezas metálicas u orgánicas.

El ensayo consiste en la aplicación del recubrimiento a analizar sobre una placa de Hull del material base la cual se conecta como el cátodo mientras que una placa del elemento a recubrir hace las veces de ánodo. Este se realiza con tiempos de deposición entre 5 a 10 min y valores de corriente fijos entre 1 y 5 A, la placa de Hull por su posición presentará diferentes valores de densidad de corriente que varían de altas a la izquierda hasta bajas a la derecha. Finalizado el recubrimiento se retira y se enjuaga la placa de Hull, para su posterior análisis visual haciendo uso de una escala de Hull como la presentada en la Fig. 3.2. Las condiciones del baño y la apariencia presentada en placas recubiertas de níquel y placas recubiertas de cromo analizadas mediante este método se presentan en la Tabla 3.1 y Tabla 3.2 [16].

↑ Corriente total	← Borde de Panel	4	3	2.5	2	1.5	1.2	1	0.8	0.6	0.4	0.3	0.2	0.1	0.05
	1 A	8	6	5	4	3	2.4	2	1.6	1.2	0.8	0.6	0.4	0.2	0.1
	2 A	12	9	7.5	6	4.5	3.6	3	2.4	1.8	1.2	0.9	0.6	0.3	0.15
	3 A	20	15	12.5	10	7.5	6	5	4	3	2	1.5	1	0.5	0.25
	5 A	A/dm ² Densidad de corriente													
Celda de Hull de 267 m./															

Fig. 3.2. Escala de Hull. En el eje de ordenadas se presentan los valores de corriente total seleccionados para el ensayo y en el eje de las abscisas los diferentes valores de densidad de corriente presentados a lo ancho de la placa de Hull.

Tabla 3.1. Análisis de recubrimiento de níquel en celda Hull, 10 min a 60 °C y 2 A.

Apariencia	Situación / Causa
Depósito de níquel brillante uniforme con nivelación y brillo en toda la extensión de la placa y con buena penetración	Condición ideal
Bajo poder de penetración	Bajo contenido de níquel metálico
	Exceso de abrillantador
	Presencia de agentes oxidantes residuo de algún tratamiento
	Contaminación orgánica
	pH fuera de rango
	Presencia de Fe, Cu, Zn o Cr ⁺⁶
	Baja temperatura
	Área anódica deficiente
	Deficiencia de contacto
	Excesiva distancia ánodo - cátodo
Aspereza	Sólidos en suspensión
	pH alto
	Contaminación orgánica
	Exceso de abrillantador
	Presencia de Fe, Al, Ca
	Alto contenido de ácido bórico asociado a baja temperatura
	Filtración inadecuada
	Densidad de corriente muy alta
Agitación insuficiente	
Falta de brillo	Pretratamiento deficiente
	pH bajo
	Bajo contenido de abrillantador
	Baja temperatura
	Baja concentración de sales, principalmente cloruro de níquel
	Contaminación metálica, opacidad a bajas densidades de corriente
	Deficiencia en pretratamiento o lavados
	Insuficiente área anódica
Agitación insuficiente	
Mancha blanca	Contaminación orgánica
	Exceso de abrillantador
	Incompatibilidad de abrillantadores
	Pretratamiento deficiente
Depósito oscuro en áreas de baja densidad de corriente	Exceso de abrillantador
	Presencia de Zn, Cu y Pb
	Contaminación orgánica
	Incompatibilidad de aditivos

Continúa.

Continuación.- Tabla 3.1. Análisis de recubrimiento de níquel en celda Hull, 10 min a 60 °C y 2 A.

Apariencia	Situación / Causa
Pitting	Bajo contenido humectante
	Exceso de abrillantador
	Bajo contenido de níquel metálico
	pH muy alto o muy bajo
	Bajo contenido ácido bórico
	Presencia de Fe, Ca, Cr ⁺⁶
	Contaminación con grasa, aceites o contaminación orgánica
	Aireación en baños con agitación mecánica
	Deficiencia en pretratamiento o lavados
	Sólidos en suspensión
Depósito duro, quebradizo, altos esfuerzos residuales de tracción	Contaminación orgánica
	Exceso de abrillantador
	Alto contenido de cloruro de níquel
	Bajo contenido de ácido bórico
	Níquel metálico menor que 30 g·l ⁻¹
Presencia de Zn, Cu, Pb, Cd, Fe, Cr ⁺⁶	
Desprendimiento del recubrimiento o burbujas	Exceso de abrillantador
	Bajo contenido de ácido bórico
	Contaminación orgánica
	Presencia de Cr ⁺⁶
	Deficiencia en pretratamiento o lavados
	Pasivación de la película anterior
	Contacto intermitente, interrupción de corriente
	Porosidades en el metal base causando retención de solución
Neutralización inadecuada de la limpieza antes del baño de níquel	
Depósito quemado	Bajo contenido de níquel
	Baja temperatura
	Contaminación orgánica
	pH alto
	Presencia de fosfatos o nitratos
	Agitación insuficiente
	Alta densidad de corriente
Insuficiente área anódica	

Tabla 3.2. Análisis de recubrimiento de cromo en celda Hull, 3 min a 45 °C y 5 A.

Apariencia	Situación / Causa
Depósito de níquel cromo brillante con penetración de 70 a 80% exento de quemaduras y manchas marrones	Condición ideal
Bajo poder de penetración	Temperatura mayor que 50 °C
	Alto contenido de sulfato o baja relación CrO ₃ /SO ₄
	Alto contenido de cromo trivalente
	Contaminación metálica
	Níquel pasivo
	Pasivación de los ánodos
	Baja densidad de corriente
	Bajo contenido de sulfato
Quemadura de áreas con alta densidad de corrientes	Bajo contenido de ácido crómico
	Baja temperatura
	Bajo contenido de sulfato
	Alta densidad de corriente
Depósito oscuro	Contaminación metálica
	Alto contenido de cromo trivalente
Baño de coloración marrón oscura	Alto contenido de cromo trivalente
Manchas blancas o grises, depósitos mates de altas a medias densidades de corriente	Baja temperatura
	Níquel pasivo

Finalmente se debe mencionar que a pesar que el análisis de la solución en una celda de Hull no brinda resultados determinantes para caracterizar las propiedades de la solución, se puede utilizar como un diagnóstico o etapa previa para seleccionar análisis específicos en base a los resultados obtenidos, pudiéndose así evitar la realización de análisis no necesarios lo cual supone una optimización de recursos.

3.1.2. PRUEBA DE ESPESOR POR MÉTODO COULOMÉTRICO

La prueba de espesor sugerida se realiza mediante coulómetro, como el que se presenta en la Fig. 3.3, siguiendo las normas para métodos de prueba coulométricas según ASTM B764 – 94 e DIN EN ISO 2177. El procedimiento consiste en la disolución del metal de recubrimiento del sustrato metálico mediante un electrolito bajo corriente eléctrica controlada, en otras palabras revirtiendo el

proceso electrolítico. La corriente utilizada para esto es directamente proporcional a la masa del metal a ser removida, una clara correlación entre el tiempo de eliminación de recubrimiento y el espesor del recubrimiento eliminado puede ser determinada cuando la corriente de pruebas y el área se mantienen constantes.



Fig. 3.3. Equipo de medición de espesores y potencial electroquímico de recubrimientos (couloscopio).

La eliminación del recubrimiento toma lugar en una celda de medición la cual actúa como un baño electrolítico en miniatura, tal como se indica en el esquema de la Fig. 3.4. El área de medición está definida por una junta plástica adjunta a la celda de medición. Los electrolitos utilizados son formulados para los diferentes recubrimientos de manera que la eliminación no se inicie hasta que se aplique la corriente. Luego de iniciada la eliminación de la capa de recubrimiento por los instrumentos electrónicos del coulómetro una bomba hace circular el líquido al interior de la celda de medición, continuamente refrescando el electrolito en contacto con el área de trabajo, asegurando así una eliminación uniforme de la capa de recubrimiento [17].

El análisis del espesor de las capas de recubrimiento obtenidas en los procesos electrolíticos puede ser utilizado como parámetro para la determinación de la vida útil de un baño al determinar la efectividad de este por medio de la comparación de valores obtenidos en la prueba con los esperados, el resultado

indicara en caso de no obtenerse los valores esperados la necesidad de un reajuste de los parámetros de operación del baño y concentraciones de la formulación del baño.

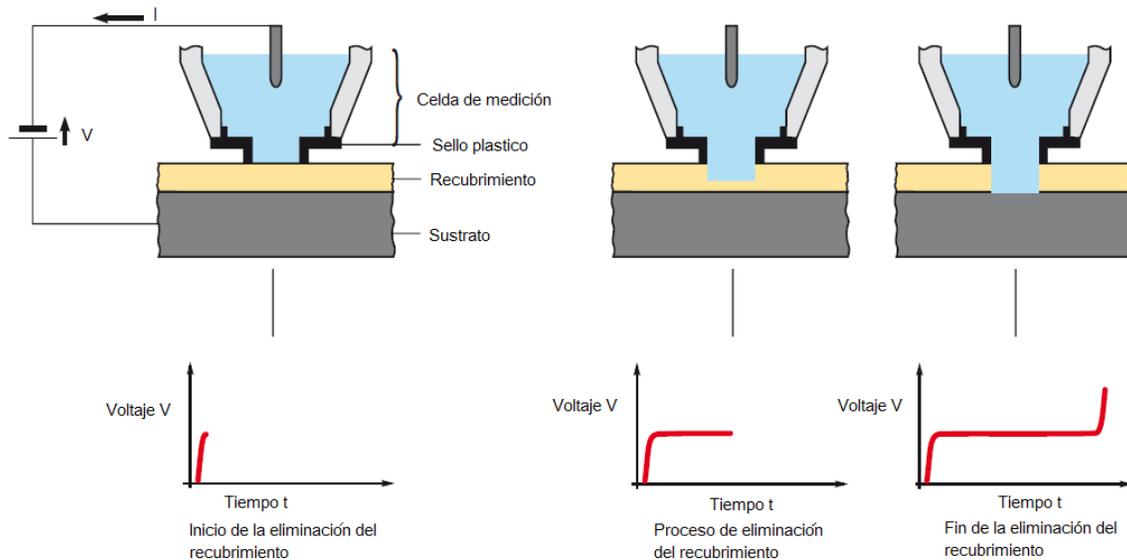


Fig. 3.4. Representación esquemática del proceso de eliminación de la capa de recubrimiento.

Además, del método sugerido existen pruebas analíticas mediante reactivos que atacan la capa de recubrimiento en los cuales el espesor se determina según el tiempo y el volumen de reactivo aplicado, no obstante los resultados obtenidos por dicho método no alcanzan el nivel de precisión de los obtenidos por método sugerido.

3.1.3. PRUEBAS CUALITATIVAS DE ADHESIÓN

La prueba cualitativa de adhesión de recubrimientos metálicos puede ser realizada por varios métodos siguiendo los parámetros establecidos según la norma ASTM B571. En la Tabla 3.3 se presenta algunos de los métodos establecidos para la aplicación de pruebas de adhesión en recubrimientos de níquel, cromo y níquel

más cromo. Los métodos sugeridos han sido seleccionados en base a su facilidad y a la accesibilidad de recursos para su aplicación.

Tabla 3.3. Métodos de pruebas de adhesión para recubrimientos de níquel, cromo y níquel más cromo.

Método de prueba	Material de recubrimiento		
	Níquel	Cromo	Níquel más cromo
Prueba de flexión	X	-	X
Prueba de pulido	X	X	X
Prueba de cincel	X	X	-
Prueba de troquelado	X	-	X
Prueba de limado	X	X	X
Prueba de temple	X	X	X

Varios métodos de prueba pueden ser considerados para el análisis de la adhesión del recubrimiento al material base, en caso de múltiples métodos un resultado negativo por cualquiera de los métodos indica adhesión deficiente por lo que se debe considerar el reajuste de las condiciones del baño de recubrimiento a su estado óptimo. El método de análisis seleccionado queda a libertad del generador en consideración a los recursos disponibles en la planta de recubrimientos o laboratorios de prueba, sugiriéndose por su factibilidad y fácil aplicación los siguientes.

- Prueba de flexión: Este método consiste en la flexión de una placa de prueba recubierta sobre un mandril hasta que ambos extremos de la placa sean paralelos, esto debe realizarse colocando la cara recubierta de manera que al aplicar la carga esta se encuentre en tracción. Otro procedimiento consiste en someter la placa de prueba a fatiga hasta que falle el material base. Ambos métodos deben complementarse con observación a bajo aumento entre 4x a 10x con el fin de identificar separación entre la capa de recubrimiento y el sustrato [18].
- Prueba de pulido: Consiste en pulir la superficie recubierta en trazos de 5 cm por 15 s con una herramienta de bordes suaves, una barra de acero de 6 mm de diámetro con un extremo semiesférico puede ser una herramienta adecuada para esto. La presión debe ser suficiente para pulir el recubrimiento con cada

trazo pero no para generar un desprendimiento de la capa de recubrimiento, cualquier defecto en la capa representa un resultado negativo [18].

- Prueba de cincel: Consiste en el uso de un cincel para penetrar la capa de recubrimiento, la prueba puede realizarse también en la interfaz entre el recubrimiento y el sustrato en una sección transversal de la placa de prueba extraída por sierra. Si el recubrimiento puede ser separado por cualquiera de estos métodos se considera una adhesión insatisfactoria [18].
- Prueba de troquelado: Formar una muestra de 60 mm de diámetro en una tapa bridada de 38 mm de diámetro con una profundidad de 18 mm mediante dados ajustables en una prensa troqueladora, la penetración del dado macho debe continuar hasta la fractura de la tapa. Posterior a la fractura se debe observar la muestra en busca de separación entre el recubrimiento y sustrato considerando insatisfactoria la adhesión en caso de identificarse separación [18].
- Prueba de limado: Extraer una muestra haciendo uso de sierra y observar el corte en busca de separación en la interfaz sustrato/recubrimiento. Aplicar un esfuerzo cortante sobre la sección con una lima a un ángulo de 45° desde el sustrato al recubrimiento, cualquier separación o desprendimiento representa adhesión insatisfactoria [18].
- Prueba de temple: Consiste en calentar una muestra recubierta en un horno a una temperatura de 250 °C y templar en agua u otro medio de temple adecuado a temperatura ambiente. Desprendimiento del recubrimiento indica adhesión insatisfactoria, el calentamiento puede propiciar la formación de burbujas en el recubrimiento a causa de retención de la solución del baño en poros o grietas en la superficie de la muestra, si el recubrimiento no puede ser separado del sustrato en la zona circundante a las burbujas éstas no deben interpretarse como evidencia de mala adhesión [18].

3.1.4. PRUEBAS ANALÍTICAS DE LA SOLUCIÓN

Las pruebas analíticas permiten la determinación de la concentración de un componente específico del baño de recubrimiento, siendo por lo tanto una medida

directa de la calidad del baño y del nivel de degradación del baño. Entre los métodos empleados en la actualidad para estas pruebas se sugieren:

- Valoración coulombimétrica: Esta se realiza con un coulombímetro mediante la aplicación de una intensidad de corriente constante que permite determinar con precisión la concentración de un componente. La corriente se aplica a la solución hasta que un indicador da la señal que se ha completado la reacción de oxidación o reducción del electrolito, siendo la intensidad de la corriente y el tiempo en que ésta fue aplicada un parámetro para determinar la cantidad de moles del componente a analizar.
- Espectrofotometría: Esta prueba se realiza haciendo uso de un espectrofotómetro, este equipo permite la medición de la energía radiante emitida o transmitida por una solución en función de una longitud de onda. La comparación de los resultados obtenidos de una solución desconocida contra los valores de una solución conocida permite la determinación de la cantidad de soluto de una solución.
- Análisis volumétrico: Conocido también como valoración o titulación puede ser realizada por medio de un valorador o de manera manual. Este análisis permite la determinación de la concentración de un componente conocido mediante una solución estándar que incluye un componente titulador, el titulador es añadido a la solución hasta que un indicador da la señal de que la reacción se ha finalizado. El volumen de titulador empleado hasta el final de la reacción permitirá la determinación de la concentración del componente a analizar.

El método de análisis de las concentraciones a utilizar se deja a libertad del productor en función de sus recursos y disponibilidad de adquisición de equipo en el país o en el exterior. En caso de no contar con los recursos disponibles para la realización de estas pruebas dentro de la empresa se pueden contratar los servicios especializado de un laboratorio químico. En el país la Fundación Salvadoreña para el Desarrollo Económico y Social (FUSADES) brinda servicios de laboratorio para análisis fisicoquímicos de aguas.

La frecuencia de aplicación de los diferentes análisis para la determinación de la calidad del baño dependerá de los parámetros de producción y de la

disponibilidad de los recursos del productor, sin embargo debe asegurarse que los análisis se apliquen en un periodo que sea representativo de las características del baño a lo largo de éste.

3.2. MANTENIMIENTO Y REGENERACIÓN DE LAS SOLUCIONES

Las soluciones empleadas para la aplicación de los recubrimientos deben ser sometidas a mantenimiento periódico para incrementar su tiempo de vida útil y la eficiencia del proceso. En primer lugar debe efectuarse un control analítico de la composición del baño. Entre más ampliamente se determine la composición de los baños de proceso mediante métodos analíticos, más específica será la dosificación de materiales para regenerar el baño. El segundo paso es la regeneración de las soluciones, se entiende regeneración como la adición de los reactivos que componen al baño en cantidades tales que permitan reestablecer las concentraciones establecidas en las fórmulas, como también el valor de pH de la solución para su correcto funcionamiento.

3.2.1. SOLUCIONES DE PROCESO

En base a las investigaciones realizadas las soluciones de proceso generalmente no se cambian completamente debido a los altos costos de eliminación y renovación, por lo cual se opta por su regeneración y ajuste de las concentraciones de los componentes de éstas. Además, del control analítico periódico para su ajuste, se recomiendan otros métodos para su mantenimiento, tales como [19]:

- A) Procurar que las etapas previas de limpieza se lleven a cabo adecuadamente para evitar contaminación de los baños por grasas u óxidos, a fin de prolongar la vida útil de los baños.

- B) Eliminar impurezas suspendidas y sedimentadas en los baños mediante filtración haciendo uso de fibras sintéticas o naturales, carbón activado y cartuchos de hilo.
- C) Remover productos orgánicos degradados del baño, a través de medios de adsorción. El tratamiento con carbón activado tiene la función de remover compuestos orgánicos degradados que se forman a partir de aditivos orgánicos por oxidación anódica o reducción catódica del electrolito. Estos compuestos modifican las propiedades de la capa de recubrimiento de manera descontrolada, por lo que deben ser eliminados periódicamente.
- D) La eficiencia del filtrado con carbón activado es mayor si se realiza un pretratamiento con agua oxigenada a 30 °C y posteriormente se filtra a 50 °C. Sin embargo, este tratamiento no se debe realizar en periodos demasiado cortos pues como se ha mencionado también se eliminan aditivos no degradados.
- E) Eliminación de determinadas sustancias contenidas en el baño a través de intercambio iónico.
- F) Purificación de baños mediante oxidación electrolítica de determinadas sustancias. Para el caso, oxidación del cromo hexavalente a cromo trivalente en el ánodo.
- G) Las partículas metales ajenos a los baños pueden removerse mediante precipitación. Para baños ácidos de níquel se pueden eliminar el hierro y cromo mediante agua oxigenada a pH alto y posterior filtración del baño.
- H) Eliminación de sales a través de cristalización. Los métodos utilizados para esto, son el enfriamiento de la solución o la evaporación en vacío. La condición para la cristalización en frío es que la solubilidad de la sal correspondiente disminuya a menor temperatura y que los demás componentes del electrolito permanezcan disueltos a la temperatura de enfriamiento.
- I) En los baños ocasionalmente se pueden formar carbonatos, por absorción del CO² del aire. Estos se pueden eliminar mediante congelación, introduciendo una caja con hielo seco y acetona al baño, los carbonatos se precipitarán sobre la

superficie de la caja y ésta puede ser removida del baño junto con los carbonatos.

- J) Utilizar bolsas de tela para cubrir los ánodos y retener las impurezas contenidas en éstas. Éstas se deben retirar y limpiar periódicamente para no aumentar la resistencia.
- K) Los baños de proceso se deben cubrir cuando no se encuentren en operación para evitar contaminación por agentes externos.
- L) Para evitar pérdidas del electrolito por evaporación o de calor, y para reducir la cantidad de emisiones atmosféricas en baños de cromo, estos se pueden cubrir con una capa de esferas sintéticas flotantes.
- M) Los baños de níquel se pueden purificar electrolíticamente (mediante electrólisis selectiva), a bajas densidades de corriente, para eliminar cobre y aditivos orgánicos degradados. Este proceso se puede efectuar introduciendo placas onduladas de acero. Las densidades de corriente generalmente empleadas son de 0.1 – 0.35 A/dm². Durante el tratamiento el baño se debe agitar para incrementar el contacto y finalizar aplicando filtrado para eliminar las partículas metálicas que pudieran haber caído del cátodo.
- N) Los baños de niquelado se deben filtrar continuamente, en el flujo principal o el bypass, a través de carbón activado. El filtrado es importante que se realice principalmente en baños ácidos con el fin de eliminar aditivos orgánicos degradados. También, para evitar que se remuevan los aditivos no degradados (abrillantadores y niveladores aún útiles) se puede agregar agua oxigenada al baño, previo al tratamiento. Ésta oxida la materia orgánica, permite una mejor adsorción y no interfiere con la calidad del electrolito.

3.2.2. SOLUCIONES DE DESENGRASE

La mayoría de las piezas a recubrir son pretratadas por métodos mecánicos sin o con arranque de virutas. De esta manera quedan impregnados en la pieza aceites, abrasivos, grasas y pastas pulidoras. Dependiendo de las necesidades de

disolución y separación de los aceites y grasas de la superficie del producto, la solución desengrasante tiene que cumplir con los requisitos siguientes:

- A) Máxima reducción del esfuerzo superficial y de la capa límite;
- B) Capacidad aglutinadora de complejos para endurecedores e iones metálicos introducidos;
- C) Fuerza de dispersión para jabones alcalinotérreos y metálicos;
- D) Alta capacidad de soportar ensuciamientos debidos a los residuos de fundido y a pastas pulidoras;
- E) Poder emulsionante para aceites minerales y aditivos no saponificables;
- F) Buena capacidad para ser enjuagada, incluso en agua fría;
- G) En las soluciones de desengrase se acumulan principalmente dos tipos de impurezas. Por un lado se encuentran aquellas partículas incorporadas al baño con las piezas en forma de suciedades, pigmentos y similares que pueden eliminarse normalmente por filtración. Por otro lado están los aceites y grasas del mecanizado y pulido previo, así como los de protección anticorrosiva provisional [19].

Los aceites se encuentran en el desengrase en forma de emulsiones. Una de las técnicas más eficaces para el mantenimiento de desengrases es la instalación de separadores de aceite, que consisten en un depósito específico que por su construcción permite reducir al máximo las turbulencias, ayudando al flotamiento de los aceites. El aceite acumulado se puede retirar manual o automáticamente. En la Fig. 3.5 se presenta un esquema de un separador de grasas y aceites [19].

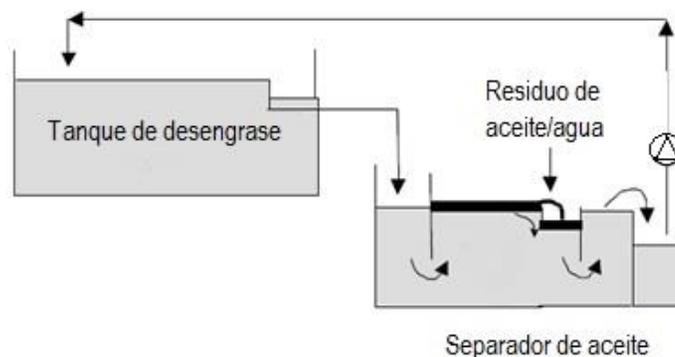


Fig. 3.5. Esquema de separación de grasa y aceite.

3.2.3. SOLUCIONES DE DECAPADO

Con el fin de reducir el volumen de residuos producidos en los procesos de decapado y por ende su impacto ambiental, se han establecido varios métodos para aumentar la vida útil de los baños de decapado, entre los cuales se recomiendan:

- A) Procurar que las piezas no permanezcan mucho tiempo a la intemperie o estén mucho tiempo en línea esperando a ser procesadas, de esta manera, se reduce la formación de óxidos sobre la superficie de las piezas.
- B) Optimizar el tiempo de exposición: la pieza a decapar debe permanecer en el tanque de decapado sólo el tiempo suficiente para eliminar la capa de óxido. Si los tiempos de decapado son muy largos se puede afectar al metal base.
- C) Las aguas contaminadas contienen residuos de hierro los cuales reducen considerablemente la velocidad de decapado, siendo estos del 8% en ácido sulfúrico y de 12% en ácido clorhídrico. Por lo cual se debe mantener control del contenido de hierro en la solución y establecer un plan periódico de filtrado según las características de producción.
- D) Si se emplea un mismo baño en el decapado con ácido sulfúrico de piezas de acero y de bronce, se pueden llegar a acumular contaminantes orgánicos y cobre. Si la concentración de cobre supera los $300 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ en el baño, puede causar problemas de adhesión en el acero y además contaminar el baño de niquelado. En este caso se sugiere emplear distintos tanques de decapado para acero y bronce.
- E) Regenerar por solución de ácido sulfúrico – fosfórico/ sustrato ferroso. La solubilidad del hierro aumenta conforme se incrementa la temperatura y disminuye con el incremento de la concentración del ácido. Utilizando estas propiedades, puede regenerarse el baño enfriando la solución para cristalizar el sulfato ferroso; como paso posterior se puede adicionar ácido sulfúrico y enfriar nuevamente, con lo que se obtiene una segunda fase de cristalización para eliminar el hierro del baño.

F) Otro método de separación es el intercambio iónico, mediante el cual se pueden separar los iones metálicos de la solución de ácido, con la posibilidad de ser reutilizado. La eficiencia de este método depende de la solubilidad del metal para permanecer como ion en la solución ácida [19].

3.3. REDUCCIÓN DE RESIDUOS

Existen diferentes medidas para evitar o minimizar la generación de residuos en la industria de los recubrimientos electrolíticos, siendo estas medidas la base para que las empresas aborden de manera independiente el problema del manejo de sus residuos para la optimización de sus procesos. Posterior a la aplicación de estas medidas a nivel empresarial, podrán lograrse en cooperación con las autoridades, asociaciones, consultores externos, empresas de manejo de residuos y fabricantes de equipo, normativas que brinden soluciones integrales o parciales, con respecto a la prevención o minimización de la generación de residuos a nivel nacional y, por lo tanto, el mejoramiento de la situación ambiental del país.

Al evaluar las posibles medidas para minimizar los residuos no sólo se debe contemplar el aspecto técnico sino también el económico. Las medidas de minimización presentadas a continuación, se elaboraron mediante el desarrollo de los conceptos empresariales de manejo de residuos, sobre la base de la situación actual en el país y de la información bibliográfica recabada. Sin embargo, debido a la diversidad de procesos existentes en la industria de los recubrimientos electrolíticos, podría resultar necesario que se evalúen estas medidas y adecuarlas a las condiciones y necesidades de cada empresa.

3.3.1. MEDIDAS DE MINIMIZACIÓN, REFERENTES A LOS PROCESOS

Entre los principales residuos que por su volumen sobresalen en la industria de los recubrimientos electrolíticos están: el agua residual generada por la operación de enjuague después de las operaciones de desengrase, decapado y recubrimiento, los lodos provenientes del tratamiento del agua residual así como los concentrados generados por los cambios de los baños y el mantenimiento periódico de los tanques del proceso.

Los lodos del tratamiento de agua se generan por la neutralización y precipitación de los metales pesados contenidos en las aguas de enjuague y también por la precipitación de las sales minerales al usar agua no desmineralizada, las cuales pueden llegar a formar hasta el 50% del volumen total y dificultar el tratamiento externo de estos lodos.

Una reducción en el volumen de estos lodos se puede lograr disminuyendo la cantidad de arrastres de metales pesados hacia los enjuagues y utilizando sólo la cantidad óptima de químicos para el tratamiento de las aguas residuales.

Por otra parte, la reducción de arrastres y la optimización de los enjuagues son medidas que ayudan a disminuir el consumo de agua y el volumen de agua a tratar, estas se deben considerar como un paso previo al diseño e instalación de un equipo de tratamiento.

3.3.2. MEDIDAS PARA LA REDUCCIÓN DEL ARRASTRE DE SUSTANCIAS CONTENIDAS EN LOS BAÑOS

Las soluciones de los baños adheridas a las piezas y que son transportadas por estas al siguiente tanque es conocido como arrastre de la solución de recubrimiento, esto provoca la contaminación de las siguientes etapas en el proceso, por lo tanto se genera mayor consumo de agua y materias primas, relacionado a la generación de un mayor volumen de lodos. Como se podrá observar en las medidas recomendadas para la reducción de arrastres, la mayoría

de éstas son de fácil instrumentación y sin embargo tienen un impacto importante sobre la reducción de residuos y el consumo de materiales.

La cantidad de contaminantes en los arrastres depende de factores como: el diseño de los sujetadores que transportan las piezas a ser recubiertas, la forma de las piezas, los procedimientos de recubrimiento y varios parámetros interrelacionados de las soluciones de proceso, como la concentración de los químicos, la temperatura, la viscosidad y la tensión superficial en los baños.

La reducción de los arrastres de los baños de recubrimiento, reduce los costos tanto en la renovación del baño como también en la disposición de los residuos. La reducción del arrastre se puede lograr alterando la viscosidad, la concentración química, la tensión superficial, la velocidad con la que se sacan las piezas de los baños y la temperatura.

Al prolongar el tiempo de escurrido de la pieza sobre el baño del proceso, disminuye la cantidad de solución adherida a la misma. Así, en la Fig. 3.6 se presenta que al incrementar el tiempo de escurrimiento en piezas planas por 10 s, se puede obtener una reducción importante como máximo del 50% del volumen arrastrado.

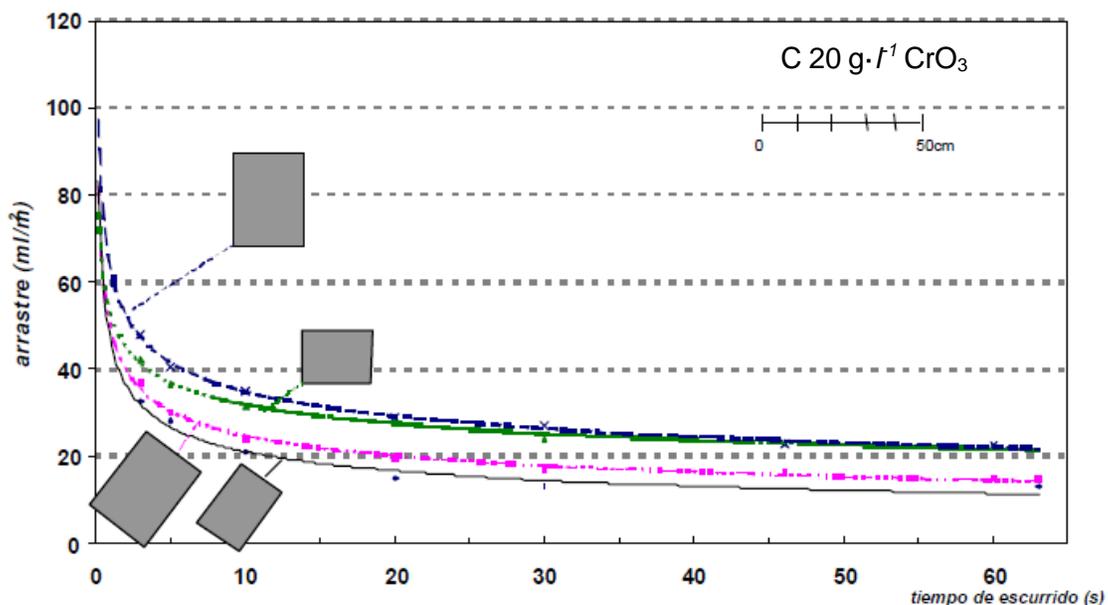


Fig. 3.6. Arrastres de electrolito, en ml/m², para piezas en bastidor en diferentes posiciones

Tal como se presenta en la Fig. 3.6 los escurrimientos son mayores dentro de los primeros 10 s y después de este tiempo la velocidad de escurrimiento disminuye notablemente, por lo que se puede considerar que este tiempo es suficiente para reducir los arrastres. También, se puede deducir que las piezas colocadas de forma inclinada, drenan más rápido los arrastres.

De manera general se pueden enlistar las siguientes medidas para reducir el arrastre:

- A) En el caso de los sujetadores o ganchos que se transportan manualmente para facilitar que los trabajadores permitan que las piezas escurran el tiempo establecido, pueden colocarse soportes sobre los baños, a fin de que los trabajadores coloquen el gancho en éste y permitan el tiempo de escurrimiento recomendado, sin embargo se les debe informar que las piezas deben cumplir con un tiempo mínimo y máximo de escurrimiento;
- B) Los baños de proceso calientes tienen una viscosidad menor que los fríos y, por lo tanto, significan menor arrastre de líquido por las piezas. Sin embargo, si en estos baños calientes los tiempos de escurrimiento son muy largos, pueden generarse incrustaciones en las piezas y las pérdidas por el arrastre de líquido aumentarán;
- C) El reducir la velocidad con que se extraen los ganchos o sujetadores del baño, también contribuye a aumentar el tiempo de escurrimiento. Consecuentemente la película de solución del baño de proceso que quedará en las piezas será más delgada;
- D) La tensión superficial de los baños puede reducirse mediante el uso de agentes tensoactivos, de esta manera, el arrastre de líquido por las piezas puede reducirse considerablemente. La concentración adecuada de los tensoactivos debe verificarse mediante análisis, dado que su efecto disminuye mientras mayor sea su concentración e incluso puede provocar manchas en las piezas y acumulación de espumas o de productos degradados;
- E) La viscosidad de las soluciones es menor a bajas concentraciones de los electrolitos en los baños. La concentración del electrolito en los baños debe ajustarse al rango mínimo recomendado. Esta disminución en la concentración

del baño puede realizarse paulatinamente e ir verificando los resultados en el proceso y las condiciones de operación del baño. Los baños en que los márgenes de tolerancia son estrechos, el proceso deberá ser apoyado por mantenimiento regular del baño para conservarlo en condiciones adecuadas de operación. Con esta medida se reduce tanto el consumo de electrolitos, como la contaminación de las siguientes operaciones por arrastres;

- F) Se pueden colocar dispositivos inclinados entre el baño de recubrimiento y el enjuague, con el que se pueden captar los escurrimientos durante el transporte de los ganchos. Al ser inclinados, estos retornan la solución captada directamente al baño;
- G) En el caso de los perfiles y tubos, estos deben sacarse de los baños de manera uniforme y mantenerse unos segundos inclinados sobre el baño, para que el líquido retenido en el interior y en los espacios huecos pueda escurrir en el baño correspondiente;
- H) La geometría de los sujetadores debe optimizarse de tal forma que se puedan evitar zonas horizontales en las cuales se retenga baño o se arrastren sedimentos acumulados en el tanque. Se debe evitar que los escurrimientos de una pieza caigan sobre otra, así como facilitar que las piezas planas se coloquen inclinadas y permitir el drenado de piezas cóncavas;
- I) Se debe dar mantenimiento continuo al aislante de los sujetadores a fin de evitar acumulaciones de metal y pérdidas de electrolito;
- J) Se recomienda rodear los tanques con canales de escurrimiento (fibra de vidrio o PVC) y devolver el líquido escurrido al baño.

3.3.3. DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN ARRASTRADO

La determinación detallada de los arrastres (V) es una herramienta para desarrollar un programa de minimización de arrastres y de optimización de los enjuagues. La determinación del volumen arrastrado sirve para estimar tanto las

pérdidas del electrolito por arrastres, como la concentración del electrolito en los enjuagues, lo que facilitará el cálculo del criterio de lavado (CL).

En la estimación de arrastres en función de la producción, se puede considerar que los arrastres están en un intervalo de 50 a 200 ml·m⁻² para piezas en bastidor y en el caso de barriles de 0.5 a 2.5 litros por barril. Si se toma un valor promedio en ambos casos, se puede realizar un cálculo de los arrastres en función de la producción y de que existan piezas con geometría no muy variable.

En la Tabla 3.4 se presenta algunos de los arrastres típicos, dependiendo del tipo de baño.

Tabla 3.4 Arrastres típicos para superficies planas y curvas. Chusher (1981, a partir de los trabajos de G.B. Hogaboom 1936). Techniques for reducing or eliminating releases of toxic chemicals in electroplating, US EPA.

Tipo de baño	Superficies plana	Superficies curvas
Cromo (250 g·l ⁻¹)	48.1	122.3
Cromo (400 g·l ⁻¹)	184.6	484.8
Níquel Watts	4.8	154.8

Para determinar los arrastres en función de la conductividad, primeramente se debe elaborar una curva de calibración en el laboratorio, midiendo la conductividad del baño a diferentes concentraciones. Una vez elaborada la recta de calibración, en la planta se inicia con un primer enjuague limpio o diluido, en el cual se determina la conductividad. A continuación se pasa un número determinado de tanques de lavado (5-30), y se vuelve a medir la conductividad. Con la ayuda de la curva de calibración se determina la concentración, y se traslada a volumen arrastrado en función de la concentración presente en el enjuague.

3.3.4. OPTIMIZACIÓN DE LA TÉCNICA DE LAVADO/ENJUAGUE

La mayoría de los residuos peligrosos en la industria de los recubrimientos electrolíticos, provienen del agua residual generada por las operaciones de enjuague que siguen después de las operaciones de desengrase, decapado y

recubrimientos metálicos. Los ahorros asociados con la reducción del uso de agua en los enjuagues, conducen directamente a una reducción del volumen de agua consumido y del volumen de agua a enviar al sistema de tratamiento. Incrementando la eficiencia de los enjuagues, en una línea de producción se reduce el flujo de agua residual hasta en un 90% (Watson, Michael R. 1973. *Pollution Control in Metal Finishing*. Noyes Data Corporation, Park Ridge, New Jersey)

El enjuague representa una dilución del líquido adherido a una pieza, el enjuague debe lograrse a tal grado que se obtenga el factor de dilución requerido para la producción, el cual también es denominado “*criterio de enjuague o de lavado*”. Este criterio de enjuague define el porcentaje máximo de un químico contenido en el baño de recubrimiento que puede contener el agua de enjuague para no perturbar el proceso siguiente. Generalmente, los factores de dilución requeridos (criterio de enjuague) están entre 100 y 20,000 o más. Por ejemplo los criterios de enjuague pueden oscilar:

- A) Después del pretratamiento: 500 –1000;
- B) Después del metalizado (s/cromado): 2000-10000; y
- C) Después del cromado: 10000 – 50000.

A fin de poder establecer el criterio de lavado, las concentraciones del electrolito de los tanques se pueden determinar analíticamente o correlacionar con la conductividad de la solución en el tanque.

Por otro lado, la cantidad de agua empleada en el enjuague debe ser sólo la necesaria, a fin de que se puedan obtener ahorros en su consumo y no se aumente más de lo necesario la carga de la planta de tratamiento de agua. También se puede lograr la máxima concentración inicial de metal posible en los lodos, para la recuperación de materiales con valor. Sobre el resultado del enjuague también influye la capa límite de difusión adherida en las piezas y que consiste de los químicos de baño, la cual es difícil de eliminar con sólo sumergirlas. Esta capa límite de difusión se elimina más rápidamente, optimizando el enjuague mediante medidas como las sugeridas a continuación:

- A) Agitación en los tanques de enjuague, por medio de inyección de aire o por agitación mecánica, lo cual incrementa la turbulencia entre las piezas y el agua de enjuague;
- B) Incrementar el tiempo de contacto entre las piezas y el agua de enjuague, sumergiendo varias veces los ganchos o sujetadores con las piezas o girando el barril dentro del tanque de enjuague;
- C) Revirtiendo o agitando los sujetadores de las piezas, si éstas están bien fijas;
- D) Incrementar el volumen del agua durante el tiempo de contacto para reducir la concentración de los químicos enjuagados de la superficie de las piezas;
- E) Retirando los bastidores lentamente de los baños de proceso.

Al sólo sumergir las piezas, la capa límite de difusión de químicos adheridos puede tener un espesor de unas décimas de milímetros, el cual disminuye a pocos micrómetros por medio de fuertes turbulencias, pero no puede eliminarse totalmente.

Anteriormente, simplemente se enjuagaba en un recipiente de enjuague el tiempo necesario para lograr la dilución correspondiente. Este procedimiento significaba no sólo un consumo muy elevado de agua sino también la generación de cantidades considerables de agua residual y un incremento en los tiempos de producción. En base al consumo de agua y que actualmente se trata de optimizar este recurso se mencionan opciones de enjuague.

- Enjuague en cascada: El enjuague en cascada se caracteriza porque el agua fluye en sentido contrario al del trabajo, a través de varios compartimentos en un tanque o a través de varios tanques, uno seguido de otro. Con este método, por ejemplo, una cascada doble sólo necesita de 1 - 5% de la cantidad de agua requerida por un tanque de enjuague con flujo constante. La desventaja del sistema de enjuague en cascada son sus necesidades de espacio, por eso, este tipo de enjuague no puede realizarse en todas las empresas.
- Enjuague mediante rocío: El enjuague de piezas montadas en ganchos o sujetadores también puede realizarse mediante rocío. Por la elevada turbulencia generada, se mejora la eficacia del enjuague. Para este tipo de enjuague, generalmente se coloca una serie de boquillas sobre el tanque de

enjuague o sobre los baños de proceso, en este último caso siempre y cuando el volumen del agua de enjuague sea menor o igual al volumen del agua pérdida por evaporación. Esta práctica permite que los arrastres y la solución del enjuague drenen directamente hacia el baño, y de esta manera la solución del enjuague rellena el baño. Se recomienda el uso de agua desionizada en este tipo de sistemas de enjuague por rocío.

- Recirculación de aguas de enjuague: La regeneración interna del agua de enjuague se puede lograr a través de métodos clásicos de precipitación química o procedimientos físicos. También, se puede utilizar el agua de enjuague de una fase de proceso como agua de enjuague en otro proceso, siempre y cuando la calidad requerida lo permita.

Otra forma para optimizar los enjuagues es su conducción en un circuito cerrado, a través de equipos de intercambio iónico, ósmosis inversa, o electrólisis. Estos métodos sólo pueden aplicarse con efecto benéfico cuando se utiliza agua desmineralizada ya que de otra manera los minerales presentes en el agua potable se intercambiarían en lugar de los contaminantes.

3.4. MÉTODOS DE DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS

Luego de consideradas todas las medidas para el mantenimiento y regeneración de las diferentes soluciones empleadas en el proceso de recubrimientos electrolíticos, así como, las medidas para la reducción de residuos dentro de la empresa, es necesario establecer los métodos de tratamiento a aplicar a los residuos generados. Los métodos de tratamientos utilizados a nivel internacional y que pueden ser aplicados a los residuos generados en los procesos electrolíticos son: El co-procesamiento, incineración, confinamiento y tratamiento físico químico de residuos [13].

La aplicación de estos métodos de tratamiento debe realizarse bajo las normativas establecidas en el Decreto N° 41 Reglamento especial en materia de sustancias residuos y desechos peligroso y con los respectivos permisos

ambientales emitidos por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, por lo cual, debe considerarse que instituciones participan y prestan sus servicios y asesoría para el manejo y tratamiento de residuos a nivel nacional.

3.4.1. EMPRESAS AUTORIZADAS PARA LA GESTIÓN DE RESIDUOS

En El Salvador la seguridad química es vigilada por un grupo de instituciones nacionales, esta iniciativa fue creada en el año 2006 para la regulación del uso de sustancias químicas y garantizar una adecuada gestión de éstas en el país. Las instituciones participantes en esta iniciativa y su respectiva función se presentan en la Tabla 3.5 [12].

Tabla 3.5. Instituciones nacionales y su función en la gestión de sustancias químicas en El Salvador.

Institución	Función
Viceministerio de Transporte (VMT)	Vigilancia y control de transporte de materiales peligrosos en el territorio salvadoreño según el Reglamento de transporte de carga.
Policía Nacional Civil (PNC)	En el Art. 11 de la Ley Orgánica de la PNC, se crea la División de Medio Ambiente cuya función es investigar, prevenir y combatir los delitos y faltas contra el ordenamiento legal del Medio ambiente.
Consejo Superior de Salud Pública (CSSP)	Ente autónomo poseedor de su propia Ley y estrechamente vinculado con el MSPAS
Cuerpo de Bomberos de El Salvador	Institución de Servicio Público
Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales	Vigilancia y control de materiales peligrosos y principal responsable sectorial en materia de calidad ambiental
Ministerio de Economía (MINEC)	Formulación y ejecución de políticas de promoción de actividades económicas, comerciales e industriales
Ministerio de Hacienda (MH): Dirección General de Aduanas	Control fronterizo de la introducción de productos químicos, previa comprobación de las autoridades correspondientes.
Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social (MSPAS)	Autoridad competente para la autorización del uso de alcohol desnaturalizado para usos industriales.
Ministerio de Trabajo y Previsión Social (MINTRAB)	Verificar, vigilar y evaluar las condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo con el propósito de dictar las recomendaciones necesarias para la eliminación o minimización de los riesgos accidentes
Fiscalía General de la República (FGR)	A través de la Unidad de Medio Ambiente y Salud, investigará el delito y la promoción penal, esto involucra también a los materiales peligrosos en caso de que ellos causen contaminación.
Ministerio de Relaciones Exteriores (MINREX)	Vigilar el cumplimiento de los diferentes instrumentos ratificados por el país como: convenios, tratados, convenciones, acuerdos, entre otros, ya sean de carácter regional, internacional, etc.

Además de las instituciones presentadas anteriormente, el MARN establece que son únicamente dos las empresas a nivel nacional autorizadas para la eliminación y disposición final de desechos peligrosos las cuales son:

- A) Geocycle El Salvador S.A. de C.V. – Holcim El Salvador S.A. de C.V.
- B) Manejo Integral de Desechos Sólidos S.E.M. de C.V (MIDES S.E.M. de C.V.)

De estas empresas Geocycle El Salvador S.A. de C.V. es la encargada de la disposición de desechos industriales, teniendo ésta permisos ambientales para el: “Manejo, caracterización y pretratamiento de residuos y desechos peligros, así como para la destrucción de residuos y desechos en el co-procesamiento en sus hornos de cemento”. Entre los residuos y desechos generados en los procesos de recubrimiento electrolítico que esta empresa tiene autorización para tratar, están:

- A) Aceites minerales y sintéticos,
- B) Lodos de procesos químicos,
- C) Aguas y tierras contaminadas,
- D) Solventes e hidrocarburos y
- E) Químicos de origen industrial.

En vista a las limitadas alternativas con las que se cuentan a nivel nacional, los residuos generados en procesos electrolíticos de niquelado y cromado deben ser entregados a la empresa Geocycle El Salvador S.A. de C.V. para su disposición final como combustible alternativo para sus hornos de cemento por co-procesamiento. Para lo cual, se establece el tratamiento que se debe hacer a los residuos para ser entregados a esta empresa.

3.4.2. TRATAMIENTO DE RESIDUOS PARA SU ENTREGA

Debido a la gran variedad de residuos existente, su posible riesgo y la elevada incertidumbre sobre la composición precisa de los residuos, se requiere un considerable esfuerzo para evaluar, caracterizar y seguir los residuos entrantes a lo largo de todo el proceso. Los sistemas adoptados deben proporcionar una ruta de

control clara que permita rastrear los incidentes y determinar su origen. Esto permite la adaptación de los procedimientos para prevenir incidentes. Los procedimientos exactos requeridos para la aceptación y almacenamiento de residuos dependen de las características químicas y físicas de los residuos [7].

3.4.3. IDENTIFICACIÓN Y ANÁLISIS DE RESIDUOS

Para cada tipo de residuo peligroso, se presenta una declaración de la naturaleza del residuo redactada por el productor del residuo, de forma que el gestor de residuos pueda decidir si es posible el tratamiento de cada tipo específico de residuo. Esta declaración puede incluir:

- A) Datos sobre el productor de residuos y personas responsables;
- B) Datos sobre el código de residuo y otras designaciones del residuo;
- C) Datos sobre el origen del residuo;
- D) Datos analíticos sobre materiales tóxicos particulares;
- E) Características generales, incluidos parámetros de combustión, como: CI, S, calor calorífico, contenido de agua, etc.;
- F) Otra información sobre seguridad y medio ambiente;
- G) Firma legal; y
- H) Datos adicionales a petición de la planta receptora.

3.4.4. PRETRATAMIENTO DEL LODO

Debido a la composición del lodo se necesita un pretratamiento mediante operaciones de deshidratación y compactación con filtro prensa, centrifugación, o bien vía térmica con hornos de secado, para eliminar el exceso de agua y reducir su volumen, ya sea para facilitar su transporte, como también, para reducir las complicaciones que este genera debido a su volumen.

La deshidratación mecánica antes de la incineración reduce el volumen de la mezcla de lodo, al reducir su contenido de agua. Este proceso lleva asociado un aumento del calor calorífico. Esto permite su incineración independiente y económica. El éxito de la deshidratación mecánica depende de las máquinas seleccionadas, el acondicionamiento realizado, el tipo y la composición del lodo.

Mediante deshidratación mecánica del lodo de depuradoras en decantadoras, centrífugas, prensas filtrantes de cinta y de cámara, puede conseguirse un nivel de materia seca (MS) entre el 10 y el 45%.

Muchas veces, el lodo es acondicionado antes de la deshidratación mecánica para mejorar su escurrido. Esto se consigue con ayuda de aditivos que contienen materias floculantes. Es necesario diferenciar entre sustancias floculantes inorgánicas (sales de hierro y aluminio, cal, carbón, etc.) y floculantes orgánicos (polímeros orgánicos). Las sustancias inorgánicas no sólo actúan como sustancias floculantes, sino que también son coadyuvantes (builders); es decir, aumentan sustancialmente el contenido inorgánico, y por consiguiente la proporción sin combustionar del lodo deshidratado (ceniza). Por este motivo, en el tratamiento de lodo de depuradora se utilizan principalmente sustancias acondicionantes orgánicas [7].

Luego de tratados los lodos, estos deben ser almacenados en barriles metálicos de 200 l para ser transportados al sitio de confinamiento dentro de la empresa, estos deben almacenarse temporalmente hasta completar el volumen mínimo para ser transportado por alguna empresa autorizada.

Las técnicas de almacenamiento empleadas varían según el tipo de residuos, su composición y la vulnerabilidad o riesgo asociado con la emisión de sustancias de los residuos. Por lo cual se presentan las siguientes medidas para su consideración [7].

- A) El almacenamiento se debe hacer en zonas cubiertas y resistentes al ataque de los residuos.
- B) Las zonas designadas para la carga y descarga de residuos debe contar con un sistema de desagüe controlado y claramente marcado para evitar derrames accidentales al sistema de alcantarillado.

- C) La capacidad de almacenamiento debe establecerse en función del volumen de residuos previsto y la frecuencia de transporte y disposición final.
- D) Los espacios de confinamiento deben contar con medidas de protección contra incendios.
- E) Se debe asegurar, en la medida de lo posible, que los residuos peligrosos se almacenen en los mismos envases (bidones) utilizados para el transporte, evitando con ello la necesidad de manejo y traslado adicional. Una buena comunicación entre el productor y el gestor de residuos ayuda a asegurar que los residuos se almacenen, trasladen, etc. en un modo que permita un buen control de los riesgos existentes a lo largo de la cadena.
- F) Es también importante que sólo se almacenen residuos bien caracterizados y compatibles en depósitos o búnkeres.

3.4.5. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

La industria de recubrimientos metálicos enfrenta uno de los más serios problemas en lo que se refiere a la contaminación de sus aguas residuales. El manejo de metales tóxicos como cromo, cadmio, plomo y de compuestos venenosos como el cianuro, genera la necesidad de proteger a las personas y al medio ambiente del envenenamiento por los mismos.

En nuestro país es una práctica común en las empresas el descargar las aguas residuales directamente a la red de drenaje. Estas aguas residuales generalmente se descargan sin otro tratamiento más, que la dilución y neutralización simples; al provocar la auto neutralización de corrientes ácidas con alcalinas y la dilución de concentrados con enjuagues, por ser la más económica para poder “cumplir” con los parámetros de descarga.

Sin embargo, la práctica de “tratamiento” anterior no es recomendable pues, generalmente son descargadas y mezcladas soluciones agotadas de sales cianuradas (soluciones alcalinas) y soluciones ácidas (generalmente conteniendo ácido crómico), para provocar la auto neutralización. Esta mezcla puede ser

peligrosa, debido a que por simple neutralización no es posible cambiar la forma tóxica hexavalente del cromo, contenido en la corriente ácida a su forma trivalente menos tóxica. La forma más conveniente para tratar este tipo de efluentes es procesar las corrientes por separado: tratar separadamente las que contienen cianuro y las ácidas con cromo. La corriente que contiene cromo hexavalente se debe tratar con un reductor fuerte como el bisulfito de sodio o el dióxido de azufre, que reducen el cromo a su forma trivalente, el cual como es fácil de precipitar en forma de hidróxido de cromo, a un pH alcalino controlado. En caso de no llevar a cabo esta forma de tratamiento de los efluentes, los elementos contaminantes únicamente se diluyen disminuyendo su concentración, lo cual no les resta peligrosidad por la forma tóxica y acumulativa en los organismos vivos; propiedades características de los cianuros como tóxicos y del cromo como metal pesado.

- Neutralización y precipitación de metales: El principio de la precipitación de metales como proceso de separación, se basa en diferentes grados de solubilidad de los mismos en función del pH de la solución. La mayoría de los metales pesados son solubles en medios ácidos y precipitan en medios alcalinos.

Si el agua residual contiene varios metales el pH debe ajustarse a un valor pH medio de ~8.5 en consideración a la Tabla 3.5, sin embargo, a este valor de pH aún están en solución ~10 mg·l⁻¹ de níquel. Si la precipitación de agua residual que contiene varios metales se realiza a valores de pH de alrededor de 10, se encontrarán todavía ~10 mg·l⁻¹ de Cr III en solución. A continuación se dan algunas recomendaciones para optimizar la neutralización y precipitación de los metales pesados, empleando principalmente sosa (hidróxido de sodio), lechada de cal u otros reactivos.

La precipitación mixta con sosa (NaOH) y lechada de cal (Ca(OH)₂) incrementa la eficacia del proceso, puesto que la cal mejora la precipitación y floculación, aún y cuando contribuye a generar mayores cantidades de lodo. Por lo general se dosifica la sosa y la lechada conjuntamente o se dosifica primero Ca(OH)₂ hasta pH 6 y se afina aportando NaOH.

El empleo de sulfuros (como Na_2S u órgano sulfurados) es necesario si no se cumplen con los límites mínimos de descarga, por lo general de níquel, por la presencia de complejos. Después de realizar la precipitación con lechada de cal y sosa y pasar por el filtro prensa se realiza la precipitación con sulfuros y una filtración final.

Para tratar y reutilizar aguas de enjuague, los metales pesados que contienen pueden eliminarse de manera electrolítica. De igual forma puede reducirse electrolíticamente el Cr VI y el cianuro puede oxidarse. De este modo, se evitan los lodos y sales que se forman con el tratamiento típico.

- Detoxificación de cromo hexavalente: Las aguas residuales del proceso de cromado contienen Cr VI, que además de ser altamente tóxico es soluble en todo el intervalo de pH ácido y alcalino. Sin embargo, el proceso de reducción del Cr VI es muy rápido y permite, además de detoxificarlo, precipitar el poco soluble Cr III. Por lo cual bastan tiempos de reacción de 15 min a pH 2 - 2.5 con bisulfito de sodio (NaHSO_3). De manera alternativa, se sugieren los siguientes procedimientos para optimizar la reducción de cromo VI:
 - A) Separar las corrientes contaminadas con cromo VI.
 - B) Emplear bisulfito de sodio como reductor para pH ácido. En caso de pH alcalino como son las aguas procedentes de la regeneración de resinas, utilizar sulfato ferroso (FeSO_4), el cual es barato pero generador de gran cantidad de lodo o bisulfito de sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) que no incrementa el volumen de lodo aunque su costo es más elevado.
 - C) Completa la fase de reducción, el cromo III se debe hidroxilar mediante la adición de un álcali, para formar un hidróxido de cromo insoluble que precipita. La fase flotante en la superficie será el efluente tratado libre de cromatos.

Posterior a su tratamiento la calidad de agua para ser desechada al alcantarillado, debe ser tal que cumpla con los valores detallados en la Tabla 3.6 según los parámetros establecidos en el Reglamento especial de Aguas Residuales.

Tabla 3.6: Valores máximos permisibles en afluentes.

Parámetro	Valor máximo permisible
Grasas y aceites, mg·l ⁻¹	150.0
Cianuro total (CN), mg·l ⁻¹	1.0
Zinc (Zn), mg·l ⁻¹	5.0
Cobre (Cu), mg·l ⁻¹	3.0
Cromo hexavalente, mg·l ⁻¹	0.5
Cromo total, mg·l ⁻¹	3.0
Detergentes (SAAM), mg·l ⁻¹	35.0
Hierro total (Fe), mg·l ⁻¹	20.0
Níquel (Ni), mg·l ⁻¹	4.0
Sólidos sedimentables, mg·l ⁻¹	20.0
Sulfatos (SO ₄) ₂ , mg·l ⁻¹	2000.0
Temperatura, °C	20.0 – 35.0
pH	5.5 – 9.0

Los análisis de las muestras deberán ser realizados en laboratorios debidamente acreditados por el CONACYT o por organismos internacionales. La frecuencia de la preparación y análisis de las muestras estará basada en el caudal de efluentes que se generen según la Tabla 3.7 y se deberá elaborar un informe operacional de cada periodo antes del análisis [10].

Tabla 3.7. Frecuencia mínima de muestreo y análisis para aguas residuales de tipo especial.

Parámetro	Caudal, m ³ /día		
	<10	10 - 100	>100
Temperatura, pH, sólidos sedimentables y caudal.	Mensual	Semanal	Diario
Parámetros obligatorios según norma,	Anual	Semestral	Trimestral

Industrias con descargas menores a 5 m³/día estarán exentos de presentar informes operacionales sin embargo deberán asegurar el cumplimiento de las normas para cumplir con los requerimientos de los valores permisibles por parámetro [10].

3.5. NORMATIVAS DE SEGURIDAD

Actualmente la Seguridad Industrial está contemplada específicamente en 4 recopilaciones legales, que son:

- A) Constitución de la República de El Salvador de 1983 y Reformas 1991/92.
- B) Ley Orgánica del Ministerio de Trabajo y Previsión Social.
- C) Código de Trabajo.
- D) Reglamento sobre la Seguridad e Higiene en los Centros de Trabajo
Departamento de Higiene y Seguridad Ocupacional

En este apartado se tratará más en específico sobre las medidas de seguridad industrial en el área de químicos utilizados y medidas de seguridad tomadas en cuenta en el proceso, dejando para el estudio del lector las medidas de seguridad estructural y señalización de la planta.

Para el uso de todos los productos químicos es necesario conocer los peligros que pueden potenciar dentro de una planta industrial. Un producto químico debe contener la siguiente información:

- A) Nombre del Material;
- B) Nombre del Fabricante;
- C) Información del Material: color, olor, apariencia y propiedades físicas; y
- D) Caracterización: tóxico, inflamable, explosivo, comburente, radioactivo, etc.

Es posible clasificar las medidas preventivas en 3 grupos:

- A) Acciones sobre las Condiciones Materiales;
- B) Acciones sobre los Trabajadores; y
- C) Acciones sobre la Organización.

Existen medidas de control, relativas a la protección de los trabajadores, que se pueden adoptar combinándolas de la manera que resulte más conveniente:

- A) Diseño y Métodos de Funcionamiento adecuado de las instalaciones;
- B) Instalaciones, procesos o sistemas de trabajo que reduzcan al mínimo, supriman o puedan retener polvos peligrosos, vapores nocivos, etc., y que, en el caso de derrames y escapes, puedan circunscribir el área de contaminación;
- C) Sistema y prácticas de trabajo;

- D) Protección Personal;
- E) Prohibición de comer, mascar, beber y fumar en zonas contaminadas;
- F) Suministro de medios e instalaciones adecuados para lavar, cambiarse y guardar la ropa, incluidas las instalaciones para el lavado de ropa contaminada;
- G) Utilización de rótulos y carteles; y
- H) Procedimientos adecuados en caso de emergencia.

Una instrucción correcta y una formación de calidad son componentes esenciales de un programa de comunicación de riesgos eficaz, tales como:

- A) Informar a los trabajadores de los riesgos asociados a los productos químicos utilizados en el lugar de trabajo.
- B) Instruir a los trabajadores sobre la forma de obtener y usar la información que aparece en las etiquetas y en las fichas de datos de seguridad.
- C) Capacitar a los trabajadores en cuanto al uso correcto y eficaz de las medidas de control técnico y de las de protección personal procurando que comprendan su importancia.
- D) Las empresas debe utilizar la ficha de datos de seguridad, junto con la información específica del lugar de trabajo.

Una forma eficaz de conocer los riesgos que genera la manipulación de productos químicos es mediante su clasificación en base a su peligrosidad:

- A) Explosivos: sustancias o preparados que pueden explotar bajo el efecto de una llama o que son más sensibles a los choques o a la fricción.
- B) Comburentes: sustancias o preparados que en contacto con otros, particularmente con los inflamables, originan una reacción exotérmica.
- C) Extremadamente Inflamables: sustancias o preparados líquidos cuyo punto de destello sea inferior a 0 °C y su punto de ebullición inferior o igual a 25 °C.
- D) Fácilmente Inflamables: pueden ser de diferentes tipos como sustancias o preparados que a temperatura ambiente en el aire y sin aporte de energía, pueden calentarse e incluso inflamarse.
- E) Inflamables: sustancias y preparados cuyo punto de destello es igual o superior a 21 °C e inferior o igual a 55 °C.

- F) Muy Tóxicos: sustancias y preparados que por inhalación, ingestión o absorción cutánea pueden ocasionar riesgos extremadamente graves, agudos o crónicos, e incluso la muerte.
- G) Tóxicos: sustancias y preparados que por inhalación, ingestión o absorción cutánea puedan ocasionar riesgos graves, agudos o crónicos e incluso la muerte.
- H) Nocivos: sustancias y preparados que por inhalación, ingestión, o absorción cutánea puedan ocasionar riesgos de gravedad limitada.
- I) Corrosivos: sustancias y preparados que en contacto con los tejidos vivos pueden ejercer sobre ellos una acción destructora.
- J) Irritantes: sustancias y preparados no corrosivos que por contacto inmediato, prolongado o repetido con la piel o mucosas puedan provocar una reacción inflamatoria.
- K) Peligrosos para el Medio Ambiente: sustancias y preparados cuya utilización presente riesgos inmediatos o diferidos para el medio ambiente.
- L) Carcinogénicos: sustancias y preparados que por inhalación, ingestión o absorción cutánea pueden producir cáncer o aumento de su frecuencia.
- M) Teratogénicos: sustancias y preparados que por su inhalación, ingestión o absorción cutánea puedan producir alteraciones en el material genético de las células.
- N) Radioactivos: sustancias o preparados que pueden emitir radiación externa e internamente en los tejidos y el medio ambiente en general.

3.5.1 SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE RIESGOS LOCALES

Es un sistema de símbolos destinados a usarse en instalaciones fijas; como equipos de proceso, almacenes de productos químicos y tanques de almacenamiento. Las ventajas de este sistema es que puede usarse sin necesidad de recurrir a información técnica inmediata, debido a su simplicidad, es fácil de memorizar el significado general de los números y la totalidad del símbolo, advierte

de los mayores peligros que representan cada producto. La desventaja de este sistema es que ofrece una información limitada sobre los peligros de los productos.

El sistema de información está basado en un rombo, el cual indica peligros para la salud, grado de inflamabilidad y grados de riesgos por reactividad.

El rombo tal y como se presenta en la Fig. 3.7 se subdivide en cuatro más pequeños, en el rombo superior y en los dos laterales se expresan números del cero al cuatro, para indicar el grado de peligro que representa cada uno de estos tres aspectos específicos. El cero indica el grado más bajo y el cuatro el grado más alto, el cuarto rombo inferior se emplea para comunicar información especial.

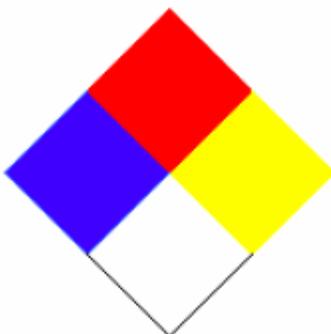


Fig. 3.7. Sistema de clasificación de riesgos locales basado en el rombo.

Los riesgos con sus cuatro grados de peligro son:

- A) Rombo de la izquierda de color azul, indica riesgo contra la salud (toxicidad) y los números, el grado o severidad de este riesgo:
 - 0: Riesgo mínimo. No existe riesgo significativo.
 - 1: Riesgo ligero. Irritación o posible lesión leve, sin dejar secuelas.
 - 2: Riesgo moderado. Lesión leve con posible incapacidad temporal.
 - 3: Riesgo alto. Lesión grave si no se toman las medidas inmediatas y se proporciona tratamiento de urgencia.
 - 4: Riesgo severo. Riesgo grave de muerte o de incapacidad permanente como resultado de una sola exposición o de exposiciones repetitivas.
- B) Rombo central superior color rojo indica el riesgo de inflamabilidad con los siguientes grados de severidad:

- 0: Riesgo mínimo. Materiales estables, que no arden o que pueden arder si son expuestos directamente y por mucho tiempo a la flama.
- 1: Riesgo ligero. Materiales que pueden ser calentados para que ardan y líquidos con punto de inflamación sobre 93.3 °C.
- 2: Riesgo moderado. Materiales que deben ser calentados para que ardan incluyendo líquidos con punto de inflamación arriba de 37.8 °C, pero debajo de 93.3 °C.
- 3: Riesgo alto. Materiales capaces de arder casi bajo condiciones normales de temperatura incluyendo líquidos con punto de inflamación arriba de 23 °C, pero debajo de 37.8 °C.
- 4: Riesgo severo. Gases muy inflamables o líquidos inflamables muy volátiles con puntos de inflamación debajo de 23 °C y temperaturas de ebullición debajo de 37.8 °C.
- C) Rombo de la derecha de color amarillo: indica el riesgo de reactividad o estabilidad química con los siguientes grados de severidad:
- 0: Riesgo mínimo. Materiales estables aún sometidos a las condiciones generales en un incendio.
- 1: Riesgo ligero. Materiales normalmente estables, pero que pueden volverse inestables a temperaturas y presiones altas y no liberan energía en forma violenta.
- 2: Riesgo moderado. Materiales que son normalmente inestables y que puedan sufrir rápidamente violentos cambios químicos sin estallar.
- 3: Riesgo alto. Materiales que son capaces de estallar o de reaccionar violentamente, pero que necesitan una fuente de inflamación o elevar su temperatura bajo confinamiento.
- 4: Riesgo severo. Materiales que por sí mismos, son capaces de explotar fácilmente por reacciones a temperaturas y presiones normales.
- D) Rombo central inferior de color blanco, indica el riesgo específico principal del material que se trate:
- W: Materiales que muestran reactividad inusual con el agua, deben identificarse con la letra W con una línea horizontal cruzándola por la mitad.

OXY: Materiales que poseen propiedades oxidantes deben identificarse con las letras OXY.

ACID: Materiales que presentan riesgos por ácidos deben identificarse con las letras ACID.

COR: Materiales corrosivos, deben identificarse con las letras COR.

ALK: Materiales alcalinos, deben identificarse con las letras ALK.

3.5.2. CONDICIONES DE ALMACENAMIENTO DE MATERIA PRIMA Y PRODUCTO TERMINADO

Una bodega de productos químicos debe asegurar la integridad de los insumos que allí se almacenan, para lo cual la infraestructura debe reunir una serie de condiciones físicas, que para su evaluación se divide en los siguientes aspectos:

- A) Ubicación: debe ser independiente del laboratorio de análisis, y de sustancias inflamables por la característica que poseen de encenderse con facilidad, arder libremente y de difícil extinción. Según la Norma Internacional Alemana (DIN), existen armarios especiales de seguridad conectados a sistemas de ventilación y con dispositivo de alarma en caso de incendio. La ubicación debe ser tal, que cuando se requiera de cualquier insumo, estos se encuentren de una forma rápida y segura.
- B) Dimensiones: el espacio de almacenaje requerido depende básicamente de: sistema de almacenaje, variedad de artículos, cantidad de artículos y sistema de inventario. A su vez la cantidad de artículos depende de la frecuencia de los pedidos, ya sea que las materias primas se ordenen o se entreguen una vez al año o si las entregas están distribuidas durante el año (entregas parciales) y el sistema de inventario está determinado por la rotación de materia prima y producto terminado, utilizándose el de mayor tiempo en estantería.
- C) Sistema de Construcción: los materiales usados en la construcción de una bodega de productos químicos, debe poseer la propiedad de ser inatacables por la variedad de sustancias que ahí se manejan y de fácil limpieza.

- D) Paredes: las paredes interiores deben ser recubiertas con materiales poliméricos que den como resultado superficies monolíticas sin juntas entre sus partes, no inflamables, de fácil limpieza y buena apariencia, así como baja transmisión calorífica y ser acústicos.
- E) Techos: estos no deben generar partículas, la superficie deberá ser completamente lisa, sin juntas, la estructura total deberá ser de fácil limpieza.
- F) Pisos: la norma más común es que sean monolíticos, es decir que puedan lavarse con agua abundante sin ningún problema.

Entre los requerimientos se encuentran: que no sean atacados por los ácidos o álcalis, resistente a los solventes, impermeables, antiestáticos y antideslizantes, capaces de soportar el peso de la carga a almacenar, no deben ser porosos y la unión del zócalo con el piso debe tener forma cilíndrica, que no deje rincones difíciles de limpiar. Un piso muy recomendado es el de cemento armado, alisado con pinturas elásticas a partir de resinas epóxicas, con espesantes que son de gran resistencia y cuyo mantenimiento es costoso, pero la limpieza se lleva a cabo en pocas horas, ya que su secado es rápido, si se reviste de una capa gruesa de resina poliéster y lana de vidrio adquiere una resistencia física y química casi perfecta.

- G) Ventanas y Puertas: las ventanas deben de ser fijas que solo permita la entrada de luz, actualmente se utilizan exclusivamente puertas metálicas a prueba de fuego, por su calidad y resistencia a los incendios. En términos generales puertas y ventanas deben ser de ajuste adecuado para evitar la entrada de insectos y polvo exterior, lo más lisas posibles, sin moldura de difícil limpieza. Se recomienda que las puertas exteriores que sirven de acceso de un área a otra dentro de la bodega, cuente con una ventana fija de vidrio, que permita ver hacia el interior sin necesidad de abrir la puerta.
- H) Circulación del aire: un principio importante es el de permitir suficiente circulación interna del aire, la buena circulación del aire maximiza la vida útil de los insumos. Lo ideal es que se cuente con un sistema de acondicionado de la capacidad suficiente para proveer una adecuada circulación del aire dentro de toda la bodega, proporcionando además la temperatura y humedad requerida

en cada área. Debe evitarse el uso de cualquier dispositivo como inyectores o extractores de aire, que permitan que el polvo, insectos u otras partículas del exterior ingresen al interior de la bodega.

- I) Iluminación: se requiere de una iluminación necesaria para moverse sin dificultad, se asume que la operación en estos lugares así iluminados es discontinua, se usa luz blanca, que en ambientes amplios, suministra una iluminación de máxima intensidad a bajo costo. Por ser una bodega donde se mantiene estantería, es posible que la luz central no sea suficiente, entonces se ilumina la zona con una segunda fuente de lámparas fluorescentes.

3.5.3. SEÑALIZACIÓN

Por el ambiente de trabajo en esta área existen algunas señales que son obligatorias como medida de seguridad en toda planta industrial, así:

- A) Portar protección en los ojos: Por principio siempre se tiene que llevar gafas en las diversas áreas de una Planta Industrial como laboratorio, bodega, etc. Todo lo que no sea agua, es dañino para los ojos. Un ejemplo de este tipo de señal se presenta en la Fig. 3.8.



Fig. 3.8. Portar protección en los ojos.

- B) Portar guantes protectores: Indicada en la Fig. 3.9, puesto que las manos son la parte del cuerpo más amenazada, se tiene que llevar guantes apropiados.



Fig. 3.9. Portar guantes protectores.

- C) Portar protección respiratoria: En manejo de gases o sustancias tóxicas que desarrollan vapores peligrosos, se debería por principio trabajar en cámara de extracción. Pero también existen situaciones en las cuales se necesita una protección respiratoria con mascarilla provista de filtros especiales. Esta medida de precaución es del todo válida, cuando es inevitable que pasen por el aire en el lugar de trabajo, sustancias nocivas que pueden ser inhaladas. Esta señal puede ser presentada como se indica en la Fig. 3.10.



Fig. 3.10. Portar protección respiratoria.

- D) Portar calzado protector: Mientras que en el laboratorio raramente se presenta la necesidad de llevar calzado protector, es necesario en el almacén de productos químicos durante ciertos trabajos, por ejemplo cuando existe el riesgo de salpicaduras, al trasvasar mayores cantidades de líquidos peligrosos o bien el peligro de la caída de envases. La señal para esta precaución se presenta en la Fig. 3.11.



Fig. 3.11. Portar calzado protector.

- E) Portar protección del aparato auditivo: Tal y como se presenta en la Fig. 3.12. Los trabajadores pueden sufrir la pérdida permanente del sistema auditivo debido a que los ruidos elevados pueden ocasionar daños sin causar dolor. El utilizar incorrectamente la protección para sus oídos puede ser tan dañino como el no utilizar ninguna clase de protección.



Fig. 3.12. Portar protección auditiva.

- F) Portar protección para cabeza: Se requiere protección para la cabeza siempre que exista el riesgo de ser lastimado por objetos que se puedan caer, o si se trabaja cerca de conductores eléctricos que estén expuestos y que puedan entrar en contacto con la cabeza. Esta se presenta según la señal de la Fig. 3.13.



Fig. 3.13. Portar protección de la cabeza.

G) Otras señales obligatorias: Adicionales y cuando sean necesarias para la protección personal de los operarios o cualquier persona que se encuentre cerca del área de proceso y almacenamiento de químicos y residuos. Algunas de estas se presentan a continuación en la Fig. 3.14.



Fig. 3.14. De izquierda a derecha: protección de la cara, uniforme, protección de la cara y vías respiratorias.

3.5.4. EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL

En la manipulación de productos químicos deberían observarse las reglas de seguridad incluso en el caso que en la etiqueta no haya ninguna caracterización de sustancias peligrosas.

Cada tipo de trabajo exige su propia indumentaria laboral, especialmente en el uso y manejo de productos químicos; raras veces se trata con sustancias inofensivas y no se pueden excluir situaciones peligrosas, a pesar de una buena preparación. Por ello, para el trabajo seguro se debe contar con equipo de protección adecuado y conocer sobre el uso correcto del mismo.

La protección personal es una técnica que tiene por objeto proteger a un trabajador de un daño específico. Dentro de este concepto se incluyen todos los elementos destinados a proteger al trabajador, bien en su conjunto o bien alguna de sus partes, contra riesgos específicos del trabajo.

Antes de implementar un equipo de protección personal, es preciso tener en cuenta una serie de aspectos:

A) Debe considerarse como la última barrera entre el individuo y el riesgo; es decir, que se recurrirá a la protección personal cuando no es posible eliminar las situaciones de riesgo mediante el empleo de otras técnicas.

- B) El uso de las prendas de protección personal debe ser individual, cada operario deberá recibir el equipo de protección necesario.
- C) Puesto que toda prenda de protección personal tiene una vida limitada deberán tenerse en cuenta la recomendación del fabricante respecto de su uso y mantenimiento.

Un equipo de protección personal debe cumplir requisitos mínimos que hagan posible su función protectora y son:

- A) Que proteja contra el riesgo para el que está destinado.
- B) Que no genere nuevos riesgos.
- C) Que no dificulte el trabajo.
- D) Que sea cómodo.
- E) Que se pueda quitar y poner fácilmente.
- F) Que se adapte a cada persona.

El equipo de seguridad básico necesario para el manejo de sustancias peligrosas cuenta con los siguientes componentes:

- A) Casco o gorro protector
- B) Lentes de seguridad
- C) Máscaras para polvo, gases o aerosoles peligrosos
- D) Guardapolvo traje de trabajo
- E) Guantes de goma o plásticos
- F) Delantal plástico o de goma
- G) Zapatos o botas de seguridad

Es importante también tener en cuentas estas medidas:

- A) El acceso al laboratorio estará limitado, a juicio del responsable del mismo, cuando los experimentos estén en marcha.
- B) Las superficies donde se trabaja deben ser descontaminadas una vez al día y siempre que haya un derrame de material infeccioso.
- C) Prohibido pipetear líquidos con la boca.
- D) No está permitido comer, beber, fumar o aplicarse cosméticos en el laboratorio.
- E) La comida se almacenará en armarios o refrigeradores destinados a tal fin y situados fuera de la zona de trabajo.

- F) Antes de dejar el laboratorio el personal que haya manejado materiales o animales debe lavarse las manos.
- G) Cualquier técnica o manipulación debe ser efectuada de manera que minimice la creación de aerosoles.
- H) Se recomienda el empleo de batas u otro tipo de equipamiento que prevenga la contaminación de la ropa de calle.
- I) Los materiales contaminados se irán depositando en contenedores apropiados.
- J) Debe existir programa de control de plagas y roedores.

3.5.5. TIPOS DE ENVASES PARA ALMACENAMIENTO

El envasado y correspondiente separación de los residuos químicos peligrosos es algo complejo. Para ello, se emplean distintos tipos de bidones o recipientes, dependiendo del tipo de residuo y de la cantidad producida. Para los residuos del grupo I al VII es recomendable emplear envases homologados para el transporte de materias peligrosas.

La elección del tipo de envase también depende de cuestiones logísticas como la capacidad de almacenaje del laboratorio. Algunos tipos de posibles envases a utilizar son los siguientes:

- A) Contenedores (garrafas) de polietileno de 5 o 30 litros de capacidad. Se trata de polietileno de alta densidad resistente a la mayoría de productos químicos. También pueden emplearse envases originales procedentes de productos, siempre que estén correctamente etiquetados y marcados.
- B) Bidones de polietileno de 60 y 90 litros de capacidad y boca ancha, destinados al material desechable contaminado.
- C) Cajas estancas de polietileno con un fondo de producto absorbente, preparadas para el almacenamiento y transporte de reactivos obsoletos y otros productos especiales.
- D) Barriles metálicos o de polietileno de 200 litros de capacidad.

Finalizado el desarrollo de la propuesta, el Capítulo 4 presenta una serie de recomendaciones y valoraciones generadas con base a la experiencia de los autores durante el desarrollo del presente trabajo, con el fin de presentar al interesado información que le permita superar cualquiera de las dificultades que se le podrían presentar en el diseño o desarrollo de prácticas a nivel de laboratorio o industrial en el área de recubrimientos electrolíticos.

4. CONSIDERACIONES Y VALORACIÓN PARA IMPLEMENTACIÓN DE PROPUESTA DE MANEJO DE RESIDUOS

Luego de establecidas las medidas recomendadas para la reducción y manejo de residuos generados durante los procesos electrolíticos de cromado y niquelado, se considera apropiado adicionar algunas recomendaciones de interés para la implementación de las medidas mencionadas en el capítulo anterior, por alguna empresa nueva o ya existente, como también una valoración del proceso necesario para el desarrollo de dicha propuesta. Cabe aclarar antes de profundizar más en el presente capítulo, que las recomendaciones e ideas incluidas en el mismo, debido al carácter teórico de este trabajo de graduación, están basadas en datos bibliográficos, criterios de los autores, como también, información de empresas visitadas con el fin de recopilar información adicional. Sin embargo, tal y como se ha especificado en ocasiones previas, el fin del presente trabajo es servir como guía para posteriores estudios que puedan de manera experimental alimentar la información aquí expuesta.

4.1. DE LA INFORMACIÓN Y SU ACCESIBILIDAD

El desarrollo del presente trabajo de graduación ha requerido de la recopilación de una amplia base de información bibliográfica, con el fin de establecer medidas y recomendaciones adoptadas a nivel internacional para su integración y aplicación en la industria nacional. Se ha mencionado desde el inicio de este trabajo la falta de regulaciones específicas para el manejo de residuos de la industria de recubrimientos electrolíticos a nivel nacional, como también, la limitada y de difícil acceso información a las medidas utilizadas actualmente a nivel nacional. Por lo cual, con la propuesta de manejo de residuos desarrollada en el capítulo anterior, se pretende establecer un antecedente en el desarrollo de investigaciones y regulaciones en esta área de la industria, además de esto, agregado al cumplimiento de los objetivos establecidos en el perfil, se aspiró a la formulación

de medidas de mantenimiento específicas que detallaran volúmenes y dimensiones específicas, como también, un análisis de costos para la implementación de la propuesta de manejo desarrollada.

Sin embargo, durante el proceso de investigación y desarrollo del presente trabajo de graduación, se determinó que no era posible a nivel bibliográfico obtener datos con este nivel de detalles, esto se justifica primeramente con el tipo de datos presentados en la bibliografía existente del tema, la cual en su mayoría ha sido redactada por comisiones que al igual que el presente trabajo de graduación tienen como finalidad establecer medidas y regulaciones para controlar la generación de desechos químicos en la industria de los recubrimientos electrolíticos, por lo cual las medidas incluidas en dichos textos es de carácter general a cualquier tipo de formulación para los procesos de recubrimiento; en segundo lugar se debe mencionar la discreción de las empresas en brindar información correspondiente a sus fórmulas y procesos, con el fin de proteger y asegurar la unicidad y calidad de sus productos, además de proteger su imagen respecto a un tema tan importante y delicado como lo es la responsabilidad ambiental; en tercer lugar debe considerarse también la limitada información oficial (entiéndase estudios de impacto ambiental e informes de operación anual) que pudo ser brindada por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador; y finalmente la imposibilidad de obtener cotizaciones y mayor información sobre el costo de tratamiento de estos residuos por falta de bodegas con las condiciones apropiadas para el almacenamiento de químicos controlados y la falta de muestras para análisis con el fin de establecer si dichos residuos pueden ser tratados a nivel nacional o ser destinados a confinamiento.

4.2. DE LA IMPORTANCIA DE UN ESTUDIO EXPERIMENTAL

En vista a lo mencionado en el apartado anterior, se debe hacer notar la importancia de llevar el estudio de este tema a nivel experimental, mediante el diseño de una línea de proceso a baja escala, preparación de una o dos de las

formulaciones sugeridas en el presente trabajo o en la bibliografía para el recubrimiento de pequeñas piezas de tamaño y geometría regular.

Se debe considerar para el desarrollo de este estudio contar con una bodega o con espacios de almacenamiento que cumplan los requerimientos establecidos para almacenar químicos controlados y tramitar los permisos correspondientes para el uso de estos espacios y químicos. Luego de obtener los permisos y autorizaciones para la adquisición de químicos, se debe definir el volumen de los baños de recubrimiento a utilizar y adquirir los reactivos en la presentación que más se acomode a las concentraciones y dimensiones definidas para el ensayo experimental. Para la preparación de las soluciones seleccionadas y aplicación de los recubrimientos se debe tener en cuenta en todo momento el uso de equipo de seguridad y seguimiento de normas de seguridad para evitar daños personales o a terceros, como también prever medidas en caso de derrames o fugas. Se sugiere evaluar las condiciones del baño en base periódica para determinar la variación de los parámetros de proceso y por ende la calidad del baño, para poder establecer el comportamiento de la solución y determinar en base a los resultados medidas detalladas para el mantenimiento de las soluciones, como también, establecer un estimado de la vida útil de la solución según los parámetros de operación.

Habiendo recopilado los datos suficientes recolectar muestras del baño y los lodos residuales, para ser presentados a Holcim con el fin de que sean analizados para determinar si esta empresa puede llevar a cabo su tratamiento final y el costo que implica el uso de sus servicios según un plan de entrega de residuos, entiéndase volumen y frecuencia; en caso no sea posible el tratamiento en la empresa, determinar el tratamiento previo necesario para su disposición final y el costo de aplicación de dicho tratamiento.

4.3. DE LA IMPORTANCIA DE ESTE ESTUDIO Y SU SEGUIMIENTO

Finalmente se considera provechoso tratar sobre la importancia de este estudio, su seguimiento y profundización. El desarrollo y seguimiento de la presente

propuesta para el manejo de residuos electrolíticos, servirá no únicamente como una lista de recomendaciones a seguir para la optimización de los recursos y procesos en una empresa o laboratorio de recubrimientos electrolíticos, sino también como una guía para la determinación de los recursos disponibles y necesarios para el desarrollo de futuros estudios de recubrimientos electrolíticos en la Universidad de El Salvador. Debe notarse también el potencial para mediante estos estudios llevar al cabo el diseño de los espacios adecuados y equipo necesario, así como guías para el desarrollo de prácticas de laboratorio siguiendo los procedimientos y parámetros recomendados, dentro del plan de materias de la currícula actual o una nueva materia electiva.

CONCLUSIONES

Finalizada la investigación y el desarrollo de la propuesta de manejo de residuos químicos generados en procesos electrolíticos de niquelado y cromado, revisada y analizada la información incluida en ésta como datos obtenidos del proceso investigativo se concluye:

- ✓ Que la propuesta de manejo de residuos químicos desarrollada satisface los objetivos establecidos al inicio del presente trabajo de graduación, poniendo a disposición de los interesados una compilación de información y medidas orientadas al manejo adecuado de residuos químicos para la industria de procesos electrolíticos.
- ✓ Que dicha propuesta puede ser implementada efectivamente en cualquier línea de proceso de recubrimientos electrolíticos en las etapas de desengrase, decapado, lavados, niquelado y cromado para cualquiera de las formulaciones incluidas en el presente trabajo de graduación.
- ✓ Que el presente trabajo de graduación constituye un antecedente en el desarrollo de investigaciones en el área de procesos de recubrimientos electrolíticos en la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, presentando las bases para estudios posteriores; así como también en el interés por el desarrollo de regulaciones o normativas que puedan ser aplicados a nivel académico e industrial.
- ✓ Que se debe considerar la continuación de estudios experimentales en el área de los procesos electrolíticos con el fin de complementar la información vertida en el presente trabajo de graduación, así como también, la adecuación. de espacios y preparación del equipo necesario para esto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Majano, A. M. (2000). *Decreto N° 41 Reglamento especial en materia sustancias, residuos y desechos peligrosos*. San Salvador, El Salvador.
- [2] Martínez, J. (2005). *Guía para la gestión integral de residuos peligrosos, Fundamentos Tomo I*, 39 - 45. Montevideo, Uruguay.
- [3] Organización de las Naciones Unidas (ONU) (1990). *Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación*. Basilea, Suiza.
- [4] Organización de las Naciones Unidas (ONU) (2001). *Convenio de Estocolmo sobre contaminantes orgánicos persistentes*. Estocolmo, Suecia.
- [5] Organización de las Naciones Unidas (ONU) (1998). *Convenio de Rotterdam*. Rotterdam, Países Bajos.
- [6] Unión Europea (UE) (2014). *Marco reglamentario de gestión de las sustancias químicas (REACH), Agencia Europea de Sustancias y Preparados Químicos*. Recuperado de: <http://eur-lex.europa.eu/>
- [7] Comisión Europea (2006). *Prevención y Control Integrados de la Contaminación, Documento de referencia sobre mejores técnicas disponibles para incineración de residuos*, 21 - 22, 25 – 29. Recuperado de: <http://www.prtr-es.es/>
- [8] Comisión Nacional del Medio Ambiente Chile (2000). *Guía para el control y prevención de la contaminación industrial*, 16 – 21. Santiago de Chile, Chile.
- [9] Centro de Actividad Regional para la Producción Limpia (CAR/PL) (2002). *Alternativas de prevención de la contaminación en el sector de tratamiento de superficie*, 8 – 10. Barcelona, España.
- [10] Fundación Entorno, Empresa y Medio Ambiente (1996). *Guía tecnológica, directiva 96/61 relativa a la prevención y control integrados de la contaminación*, 9. Madrid, España.
- [11] FOSFAMET (1999). *Proceso de decapado de metales*, 1 – 7. Recuperado de: <http://www.fosfamet.cl/>

- [12] Ruiz Padilla, J.A. (2006). *Recubrimientos electrolíticos aplicados a prácticas del laboratorio de tratamientos superficiales de procesos de producción mecánica*, 53- 59 y 69.
Recuperado de: <http://bibdigital.epn.edu.ec/>
- [13] Nickel Institute (2014). *Nickel Plating Handbook*, 13 – 14, 36.
Recuperado de: <https://www.nickelinstitute.org/>
- [14] Comisión ambiental metropolitana, Sociedad Alemana de Cooperación Técnica (GTZ) (1998). *Manual de minimización, tratamiento y disposición. Concepto de manejo de residuos peligrosos e industriales para el giro de la galvanoplastia*, 41 – 44, 46 – 48, 61 – 74. Mexico D.F., Mexico.
- [15] Julve, E. (2001). *Perspectiva general del cromado industrial: Características físicas del recubrimiento y tipos de cromado*, 20 – 25.
Recuperado de: <https://dialnet.unirioja.es/>
- [16] Sur Tec Brasil (2012). *Manual Técnico Tratamientos de Superficies*, 109 – 113, 120 – 121, 145 – 157. San Pablo, Brasil.
- [17] Fischer® (2014). *Couloscope® CMS2 and Couloscope® CMS2 STEP Measurement of coating thicknesses and electrochemical potentials according to the coulometric method*, 5.
Recuperado de: <http://www.fischer-technology.com/>
- [18] American Society for Testing and Materials (2003). *ASTM B571-97: Standard Practice for Qualitative Adhesion Testing on Metallic Coatings*, 1 y 2.
Recuperado de: <http://www.astm.org/>