



*MÓDULO DE CONTAMINACIÓN POR RESIDUOS*

# **TRATAMIENTOS FÍSICO-QUÍMICOS DE RESIDUOS**

*M.<sup>a</sup> JESÚS KAIFER*

Edición 2005/2006

**INDICE**

- 1. CONCEPTOS BÁSICOS**
- 2. NEUTRALIZACIÓN/PRECIPITACIÓN/FLOCULACIÓN/FILTRACIÓN**
- 3. OXIDACIÓN QUÍMICA. TRATAMIENTO DE CIANUROS**
- 4. REDUCCIÓN QUÍMICA. TRATAMIENTO DE CROMO HEXAVALENTE**
- 5. SEPARACIÓN DE FASES. ROTURA DE EMULSIONES**
- 6. TÉCNICAS DE TRATAMIENTO DE ORGÁNICOS E IONES: MEMBRANAS Y EVAPOCONDENSACIÓN**
- 7. ESTABILIZACIÓN**
- 8. DESTILACIÓN PARA RECUPERACIÓN DE DISOLVENTES**
- 9. INTERRELACIÓN DE LOS DISTINTOS PROCESOS DE TRATAMIENTO FÍSICO-QUÍMICO.**

## 1. CONCEPTOS BÁSICOS.-

Los procesos físico-químicos se definen como procesos industriales cuyo objeto es la eliminación de los contaminantes presentes en fase acuosa mediante la adición de reactivos.

Por lo tanto son procesos cuyo objetivo es conseguir un efluente con la calidad requerida para su vertido y concentrar los contaminantes en una fase sólida (lodos) que debe ser gestionada correctamente.

En general y en términos medioambientales, se deben considerar técnicas de concentración, ya que los contaminantes normalmente no se destruyen, sino, que se modifica su estado físico lo que implica su insolubilización y por tanto su fácil retirada del medio acuoso.

Los grupos de contaminantes sobre los cuales se puede aplicar estas técnicas de tratamientos son los de naturaleza inorgánica, por ejemplo:

- Metales pesados
- Cianuros
- Cromatos (cromoVI)
- Arseniatos
- Fosfatos

También son aplicables a algunos residuos acuosos que contienen compuestos orgánicos, como por ejemplo:

- Taladrinas (emulsiones agua:hidrocarburo)
- Tintes (siempre en medio acuoso)
- Pinturas (siempre en medio acuoso)
- Soluciones acuosas con trazas de orgánicos disueltos.

Fundamentalmente estas técnicas de tratamiento van dirigidas a residuos procedentes de las industrias del metal y mas concretamente a la industria del tratamiento de superficies.

La actividad de estas industrias se centra en recubrir superficies metálicas o plásticas con distintos materiales con los siguientes fines:

- Prevenir la corrosión
- Prevenir el desgaste
- Aumentar su dureza
- Aumentar su resistencia
- Modificar su comportamiento ante determinados parámetros físicos: conductividad eléctrica, transmisividad del calor, etc

Los productos básicos procedentes de la industria siderúrgica son los que reciben un tratamiento especial en este tipo de industrias con el objeto de aplicarlos posteriormente en sectores como la automoción, aeroespacial, telecomunicaciones, informática, energética, etc.

A continuación se destacan los procesos productivos más significativos desde el punto de vista de la producción de residuos.

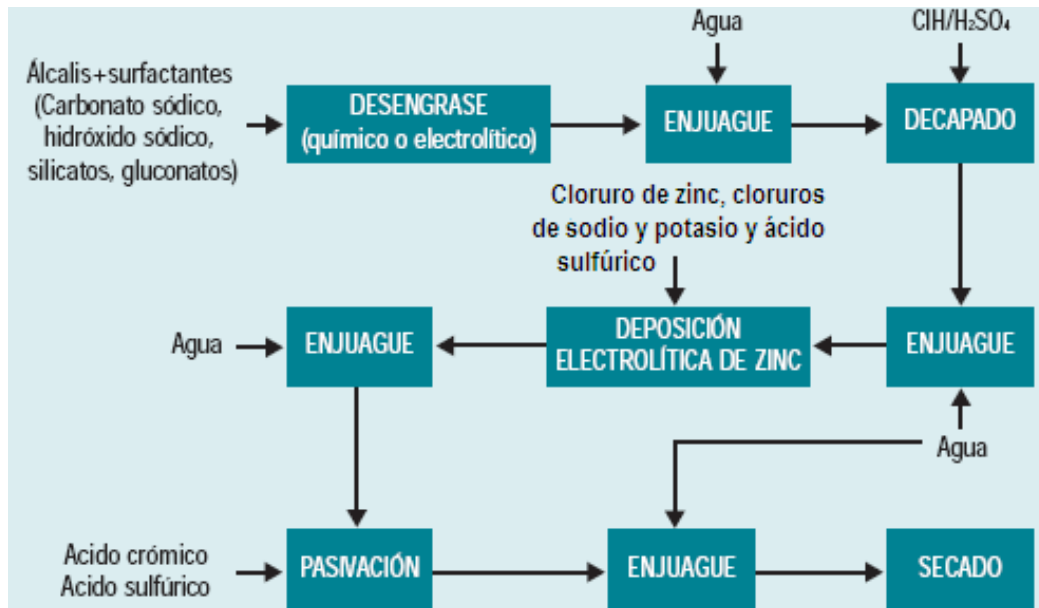
- Corte mecánico (se utilizan las taladrinas como refrigerantes)
- Pulido y conformado de la pieza
- Desengrasado (baños alcalinos)
- Decapado (baños de ácidos concentrados)
- Revestimientos
- Fosfatación
- Oxidación anódica o anodizado( recubrimiento con un óxido metálico)
- Procesos de electrodeposición, también conocidos como galvanotecnia (cobreado, niquelado, cadmiado, zincado, latonado, etc)
- Impresión de placas de circuitos electrónicos
- Pasivado crómico (utilización de Cromo VI)
- Pintado (en cabinas de arrastre de agua)

Son residuos muy característicos para el tratamiento de superficies los procedentes de los baños de galvanotecnia. Este proceso se basa en la deposición electrolítica de metales mediante la inmersión de las piezas en distintos baños. Así, la solución ácida, neutra o alcalina que constituye el baño en

la cual el metal a depositar se encuentra en forma iónica, al introducirse la pieza tiene lugar la reducción del mismo sobre su superficie, cubriendo la misma. Las propiedades específicas del electrolito dependen de su composición, así se aplican recubrimientos de Zn, Ni, Cu, Cd, Ag, Sn, Au, etc.

A veces, estos baños están formados por complejos de cianuro-metal en medio fuertemente alcalino, sin embargo, las dificultades en su tratamiento así como en su utilización (manipulación, etc) están eliminando estos baños del mercado para ser sustituidos por baños ácidos.

eoii

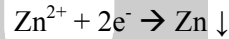


Las reacciones que tienen lugar se observan en el ejemplo (zincado ácido):

Ánodo:

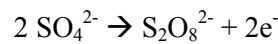
Deposición del Zinc

Generación de Hidrógeno

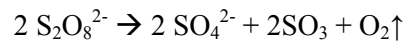


Cátodo:

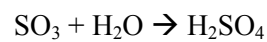
Oxidación del SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>



Descomposición del S<sub>2</sub>O<sub>8</sub><sup>2-</sup>



Síntesis de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>



Electrolisis del H<sub>2</sub>O



Además, debe tenerse en cuenta que en estos baños contienen otros compuestos de forma minoritaria cuya función es ayudar a la conservación del baño. Entre estos compuestos podemos destacar a los siguientes: tensoactivos, EDTA (para formar complejos con los metales y evitar su precipitación), ácidos orgánicos débiles, etc.

Las técnicas de minimización aplicables a los productores de estos tipos de residuos para reducir su impacto ambiental siguen los siguientes criterios:

- Uso de técnicas de fabricación que minimicen la generación de residuos
- Sustitución de sustancias empleadas por otras menos peligrosas
- Empleo de técnicas de recuperación, reciclado de sustancias generadas y utilizadas en el proceso.

Sin embargo, a pesar de la aplicación de estas técnicas, los residuos se seguirán produciendo (aunque es deseable que se reduzca su cantidad con el empleo de las mejores técnicas disponibles) y deberán ser tratados de forma adecuada.

## **2. NEUTRALIZACIÓN/PRECIPITACIÓN/FILTRACIÓN**

### ***Precipitación.-***

Son los procesos básicos que componen el tratamiento físico-químico, como se explicaba en el primer apartado, se van a añadir reactivos para insolubilizar los contaminantes presentes y al estar fundamentalmente destinadas a la eliminación de metales pesados, las reacciones de precipitación química son ampliamente utilizadas.

Los procesos que van a intervenir en la eliminación de los metales pesados son:

- Precipitación
- Floculación
- Sedimentación

La precipitación se basa en alterar el equilibrio químico del sistema excediendo el producto de solubilidad de las especies. Esta alteración puede alcanzarse por varios métodos, en general se realiza mediante:

- 1 Adición de sustancias que reaccionan con el compuesto para dar lugar a una forma poco soluble (precipitación de sulfuros)

- 2 Adición de sustancias que alteran el producto de solubilidad produciendo la insolubilización (precipitación en función del pH).
- 3 Cambio de temperatura de una solución en la dirección que provoca una disminución del producto de solubilidad, ya que la solubilidad de los metales se representa en la figura 1.

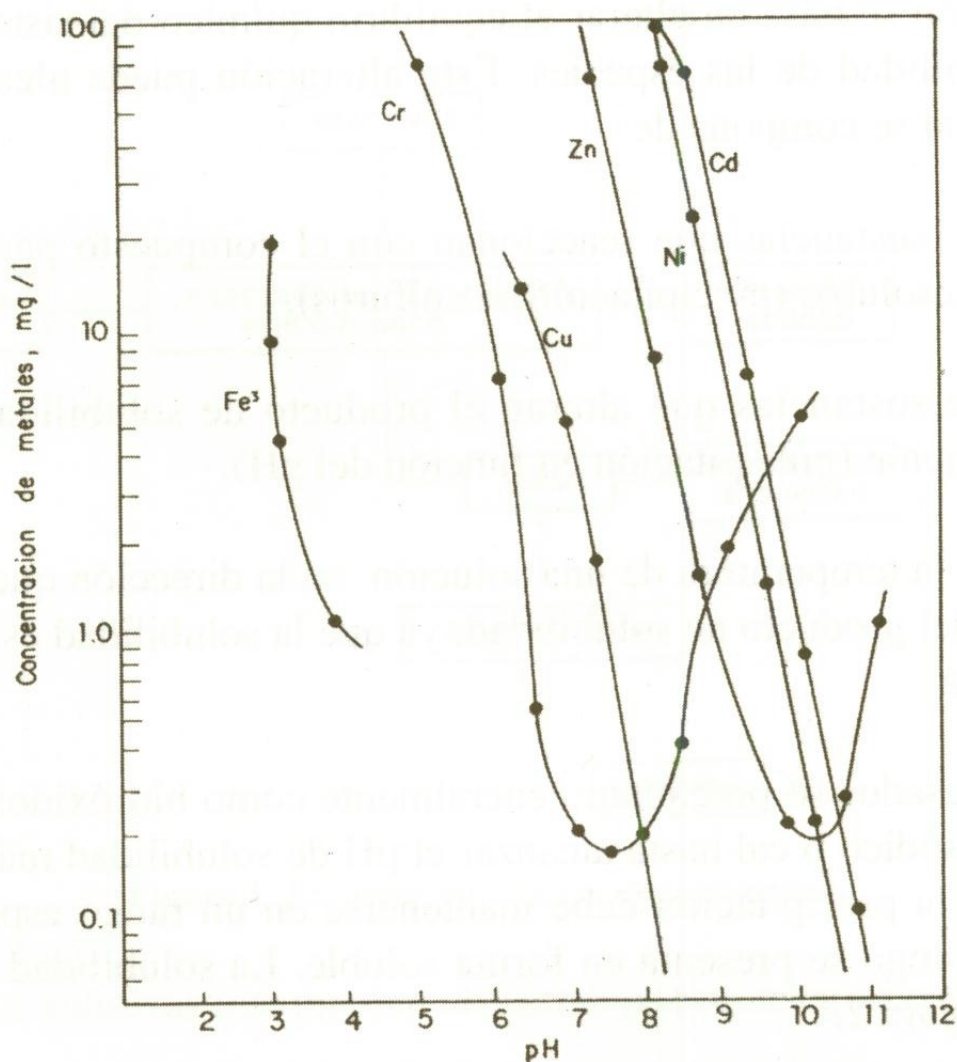
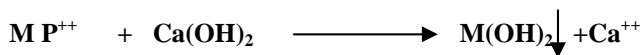


Figura 2. Curva de precipitación de los metales (Lanouette)



Los metales pesados se precipitan como hidróxidos mediante la adición de hidróxido sódico o cal hasta alcanzar el pH de solubilidad más bajo. Cuando el metal es anfótero, la precipitación debe mantenerse en un rango específico de pH, ya que fuera de este rango se presenta en forma soluble.



Con la utilización de cal como reactivo, además del hidróxido metálico precipitan también los carbonatos y el sulfato y exceso de hidróxidos generando un volumen superior de lodos a depositar.

Los metales que más frecuentemente se encuentran en los residuos son: Fe, Zn, Cu, Ni, Pb, Cd, Cr.

El precipitado formado insoluble en agua, se elimina de la solución mediante decantación y posterior filtración.

El lodo separado pasará a ser un residuo y a tener que ser caracterizado para su gestión adecuada.

El diseño del tratamiento se realiza mediante el ensayo conocido como jar.test con el objeto de determinar la cantidad de reactivo, la dosis y el pH óptimo. Casi nunca se recurre al cálculo estequiométrico ya que las limitaciones cinéticas y el efecto del ión común ocasionan un **consumo de precipitante de al menos 3 veces superior al teórico.**

Es importante considerar que el término de precipitación se refiere únicamente a procesos de insolubilización de uno de los componentes, la eliminación de las partículas formadas envuelve normalmente otros procesos.

Tabla 1.- Características de los reactivos de precipitación

CARACTERÍSTICAS DE LOS REACTIVOS				
	Ca(OH) <sub>2</sub>	NaOH	CO <sub>3</sub> Na <sub>2</sub>	SNa <sub>2</sub>
<b>Uso</b>	general	Pequeños consumos	Sólo si es requerido	Sólo si es requerido
<b>Precio</b>	Bajo	Alto	Moderado	Alto
<b>Velocidad de reacción</b>	Baja	Muy Alta	Moderada	Moderada
<b>Separación precipitado</b>	Muy buena	Moderada (c/polielectrolito)	Moderada (c/polielectrolito)	Muy difícil (c/polielectrolito)
<b>Calidad efluente</b>	Buena	Buena	Buena	Excelente (difícil eliminación Sulfuro)

### *Floculación.-*

La precipitación de metales presentes en disolución conlleva la utilización de los procesos de separación de sólidos.

Muchas técnicas de separación de fases sólidas y líquidas se basan en la utilización de la fuerza de gravedad y/o fuerzas inerciales para eliminar las partículas sólidas. Las fuerzas que actúan son:

- Fuerzas gravitacionales
- Fuerzas inerciales
- Fuerzas electrostáticas
- Fuerzas interiónicas

En las partículas de pequeño tamaño predominan c y d, las cuales tienden a repeler partículas, causando suspensiones indefinidas de sólidos en suspensión.

La floculación consiste en la aglomeración de partículas pequeñas, los mecanismos que se desarrollan están relacionados con la carga de las partículas y su superficie, su actuación consiste en originar:

- Desestabilización química de fuerzas superficiales repulsivas

- Englobamiento físico-químico de las diferentes partículas

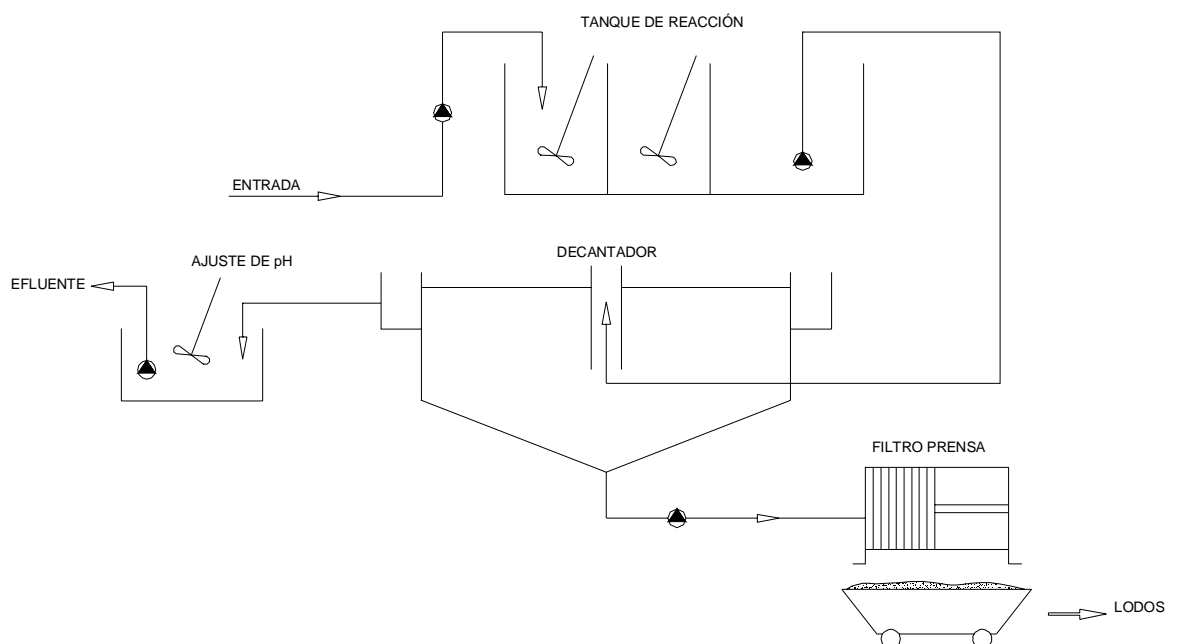
Los floculantes más utilizados son:

- Alúmina,
- Cal
- Sales férricas
- Polielectrolitos (polímeros solubles en agua de cadena larga, ej. Poliacrilamidas).

### *Sedimentación.-*

Proceso físico por el que las partículas que están suspendidas en un líquido por medio de fuerzas gravitacionales e inerciales sedimentan. Los elementos fundamentales de estos procesos son:

- 1 Depósitos de suficiente tamaño para que el líquido permanezca el tiempo necesario en estado de prácticamente reposo.
- 2 Un medio mecánico para dirigir el sólido hacia la parte inferior del depósito con el fin de facilitar la sedimentación.
- 3 Un medio físico para eliminar las partículas separadas.





En general, los procesos de precipitación de metales como sistema de tratamiento de residuos presentan las siguientes ventajas e inconvenientes:

Ventajas:

- Operación sencilla y con equipos estándar
- Versátil, aplicable a gran variedad de corrientes acuosas.
- Relativamente bajo costo
- Fácilmente integrable en sistemas más costosos.
- Método no destructivo.

Inconvenientes:

- Presencia de complejos o de partículas difícilmente sedimentables (sulfuros).
- Difícilmente selectivo.

*Rendimientos del tratamiento.-*

<b>RESUMEN DE RENDIMIENTOS DE TRATAMIENTO A NIVELES EQUIVALENTES A LOS BAT (7)</b>		
	<b>Equivalentes BAT</b>	
	<b>Concentración, <math>\mu\text{g/l}</math></b>	<b>Tecnología de Tratamiento (Media de 30 días)</b>
<b>Arsenico</b>	<b>200</b>	1. Oxidación arsenito 2. Precipitación con cal, o coprecipitación con aluminio 3. Clarificación por gravedad
<b>Bario</b>	<b>1,000</b>	1. Precipitación con sulfuros 2. Coagulación 3. Clarificación por gravedad
<b>Cadmio</b>	<b>100</b>	1. Precipitación a alto pH 2. Clarificación por gravedad con cal o filtración para la sosa
<b>Cromo hexavalente</b>	<b>50</b>	1. Reducción ácida a Cr trivalente o intercambio iónico a pH inferior a 6
<b>Cromo total</b>	<b>500</b>	1. Precipitación 2. Clarificación por gravedad con cal o filtración con sosa
<b>Cobre</b>	<b>400</b>	1. Precipitación 2. Clarificación por gravedad

## RESUMEN DE RENDIMIENTOS DE TRATAMIENTO A NIVELES EQUIVALENTES A LOS BAT (7)

Equivalentes BAT		
Concentración, $\mu\text{g/l}$	Tecnología de Tratamiento (Media de 30 días)	
Fluoruro	10,000	1. Precipitación con cal a pH elevado 2. Clarificación por gravedad
Hierro	1,500	1. Oxidación a pH neutro del ión ferroso a férrico  2. Precipitación  3. Clarificación por gravedad o filtración
Plomo	150	1. Precipitación a pH elevado 2. Clarificación por gravedad con cal o filtración y sosa
Mercurio	3	1. Intercambio iónico o clarificación y filtración
Níquel	750	1. Precipitación con cal a pH elevado 2. Clarificación por gravedad y/o filtración
Plata	100	1. Intercambio iónico o co-precipitación con cloruro de hierro seguido de filtración
Cinc	500	1. Precipitación a pH óptimo 2. Clarificación por gravedad y/o filtración

### FILTRACIÓN (DESHIDRATACIÓN DEL LODO).-

El sistema de filtración más empleado en las plantas de tratamiento de residuos consiste en la utilización de filtros prensa.

Los filtros prensa son equipos que se aplican para la separación de mezclas de sólidos y líquidos. Se bombean los fangos a varias cámaras que tienen en ambos lados una tela filtrante. Las partículas sólidas quedan retenidas por la tela filtrante formando una torta, mientras que el líquido se filtra.



Cuando las cámaras están llenas con sólidos, el bombeo de la mezcla a filtrar se hace cada vez más difícil y se aumenta la presión. A un cierto nivel de presión se para la alimentación y se descarga la torta. A continuación, el filtro prensa está listo para el siguiente ciclo. La concentración de materia seca en la torta puede alcanzar un 70 % en función de las características del producto a filtrar.

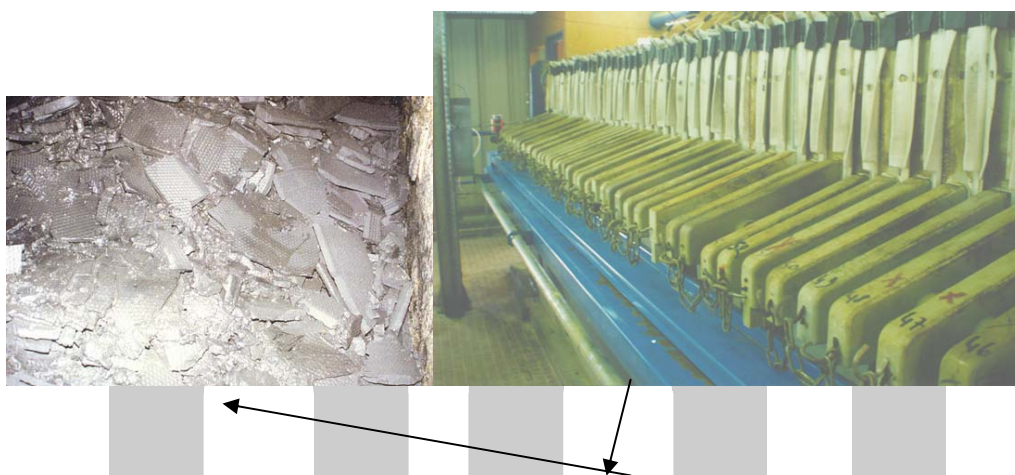
Características de los filtros prensa de cámara:

- La presión de deshidratación se alcanza con la bomba de alimentación ( hasta 50 bar)
- Espesor de la torta de 15 a 70 mm Materiales posibles diversos: PP ,PVDF , aluminio, fundición, acero inoxidable
- Volumen de la torta: de 5 a 15.000 litros por equipo
- Superficie de filtración: hasta 1000 m<sup>2</sup> por equipo

El lodo obtenido generalmente tiene una humedad inferior al 40%, se gestionará de acuerdo a sus características físico químicas como residuo peligroso o no peligroso.



La tendencia actual es la de conferir al lodo un tratamiento adicional que consiste en la adición de reactivos para disminuir su potencial de lixiviación y su toxicidad.



### 3. *REACCIONES OXIDACIÓN. TRATAMIENTO CIANUROS*

#### Oxidación química.-

Se basan en reacciones red-ox, en medio acuoso y usando reactivos de naturaleza inorgánica.

La elección del reactivo depende de su potencial estándar de reducción, que toma valores entre +3 y -3 voltios.

Los reactivos tiene mayor poder de oxidación cuanto más positivo sea su potencial estándar frente al del compuesto a oxidar.

En general son más activos a pH ácido, mientras que los reductores lo son a pH alcalino.



<b><i>Oxidante/medio ácido</i></b>	<b><i>E° (V) voltios</i></b>
<b>Peróxido de hidrógeno catalizado</b>	<b>+2,80</b>
<b>Oxígeno atómico</b>	<b>+2,42</b>
<b>Ozono</b>	<b>+2,08</b>
<b>Ácido persulfónico</b>	<b>+2,01</b>
<b>Peróxido de hidrógeno</b>	<b>+1,76</b>
<b>Ácido permangánico</b>	<b>+1,51</b>
<b>Ácido hipocloroso</b>	<b>+1,49</b>
<b>Cloro</b>	<b>+1,36</b>
<b>Dióxido de cloro</b>	<b>+1,27</b>
<b>Oxígeno</b>	<b>+1,23</b>

Destacamos el peróxido de hidrógeno catalizado (sales de FeII), constituye el denominado reactivo de Fenton, su poder oxidante permite el tratamiento de moléculas orgánicas que no reaccionan frente al peróxido de hidrógeno debido a que requieren altas energías de activación. Su aplicación más característica es la eliminación de fenoles en agua, destrucción de pesticidas, herbicidas, etc.

También permite la destrucción de los ferrocianuros, uno de los complejos más resistentes al ataque químico.

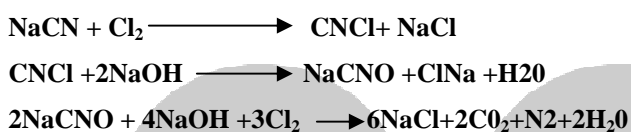
## Tratamiento de cianuros.-

Los residuos cianurados proceden fundamentalmente de la industria de galvanizado, donde se utilizan en los procesos de electrodeposición. Debido a la peligrosidad de su manejo, las condiciones de seguridad que impone su toxicidad y las dificultades en su gestión como residuo, están siendo sustituidos en muchos procesos por otros reactivos en base ácida. Sin embargo aún mantienen su presencia en la industria y por tanto no es infrecuente encontrar sistemas de tratamiento y eliminación de cianuros.

Su tratamiento se realiza por oxidación química e implica la rotura del enlace C-N y su descomposición en CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>.

a) Cloración alcalina

Es el tratamiento más ampliamente empleado, utiliza cloro, el reactivo más empleado es el hipoclorito sódico, su objeto es oxidar el cianuro a cianato y posteriormente a CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>.



Consumo teórico de cloro en la 1ª etapa 2,7 gr/Cl<sub>2</sub>

Consumo teórico de cloro de la 2ª etapa 2,5 grCl<sub>2</sub>/CNO<sup>-</sup>

Consumo total 6,8 gr Cl<sub>2</sub>/gr CN<sup>-</sup>

El hipoclorito también se aplica para eliminación de amoníaco mediante la oxidación a nitrógeno. Para ello es necesario mantener un exceso de oxidante de 6 veces y valores de pH entre 8 y 10.

La velocidad de reacción depende del pH, del exceso de hipoclorito y de la constante de formación del complejo cianuro-metal.

El cloruro cianógeno formado en la primera reacción es todavía más tóxico y volátil, sin embargo si la reacción se realiza a pH fuertemente alcalino y en exceso de Cl<sub>2</sub> la reacción de hidrólisis es muy rápida (ver Figura 1).

Para el control de la reacción en los tanques de reacción se requiere disponer de un pHmetro y un electrodo redox. El pHmetro controlara la adición de álcali para garantizar el avance de la reacción y el electrodo redox permite identificar el fin de la reacción al producirse el salto del potencial.

Como medida de prevención el tratamiento se realiza en una nave cerrada y como sistema de seguridad se instala un sistema de renovación de aire que finaliza en un lavador de gases, así se garantiza que en el caso de que, por error, se produjera un desprendimiento de cianhídrico, todo el aire de la nave donde se realiza el tratamiento sería extraído y dirigido a un lavador que evitará su salida al exterior. El lavador se dota de un sistema de ducha con hipoclorito sódico.

La 2ª reacción consiste en la hidrólisis del cianato formado, esta reacción prácticamente no tiene lugar a pH básico, sin embargo es instantánea a pH neutro o ligeramente ácido.

Es importante destacar que los complejos de ferrocianuro son estables y por tanto no pueden ser tratados mediante cloro, Para su eliminación es necesario tratarlos a 70°C y aplicar el hipoclorito en medio alcalino. El tiempo empleado es muy superior al del resto de los complejos, por ello para su eliminación es más conveniente la utilización de tratamientos térmicos (incineración).

Otros procesos de eliminación de los cianuros son la ozonización (sólo aplicable a concentraciones muy bajas) y la oxidación electrolítica.

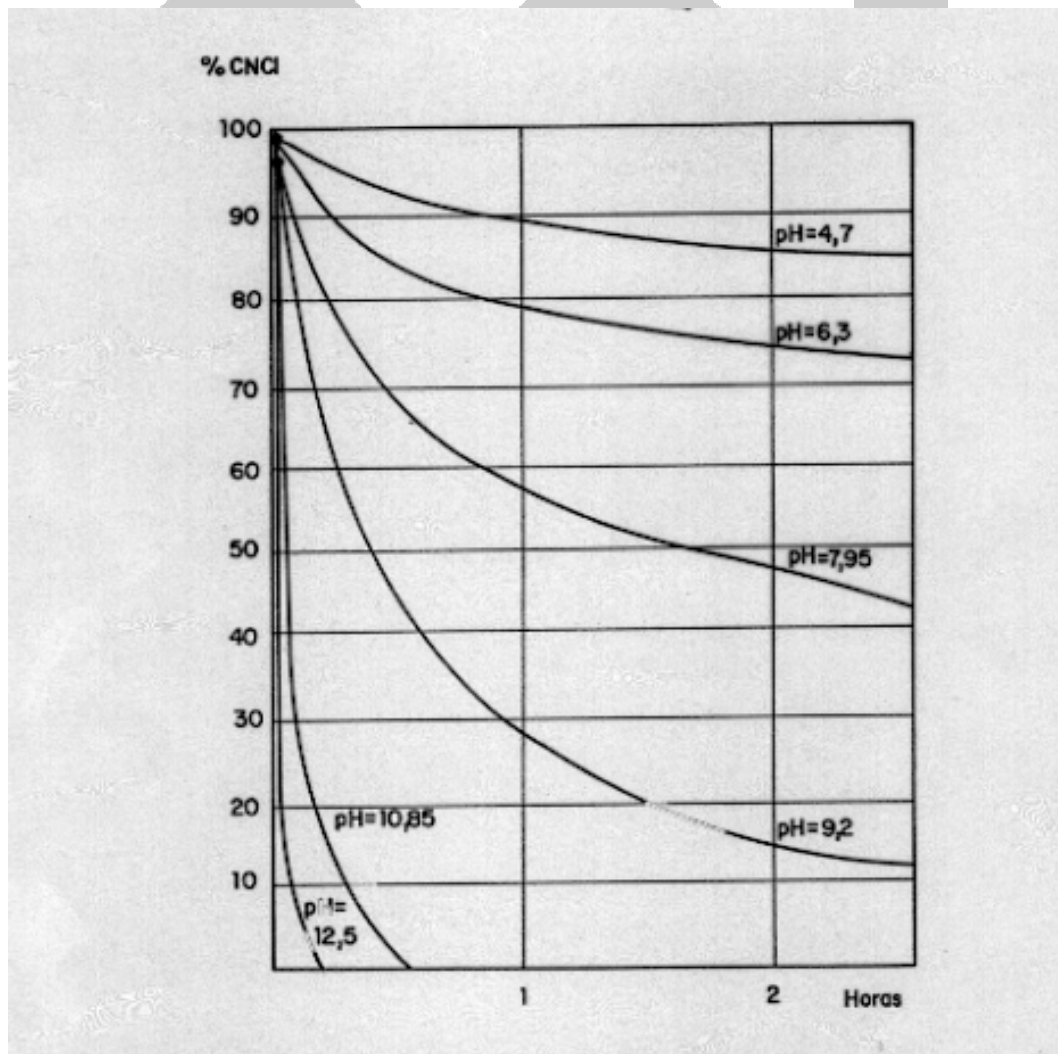


Figura 3.- Hidrólisis del cloruro de cianógeno en función de pH

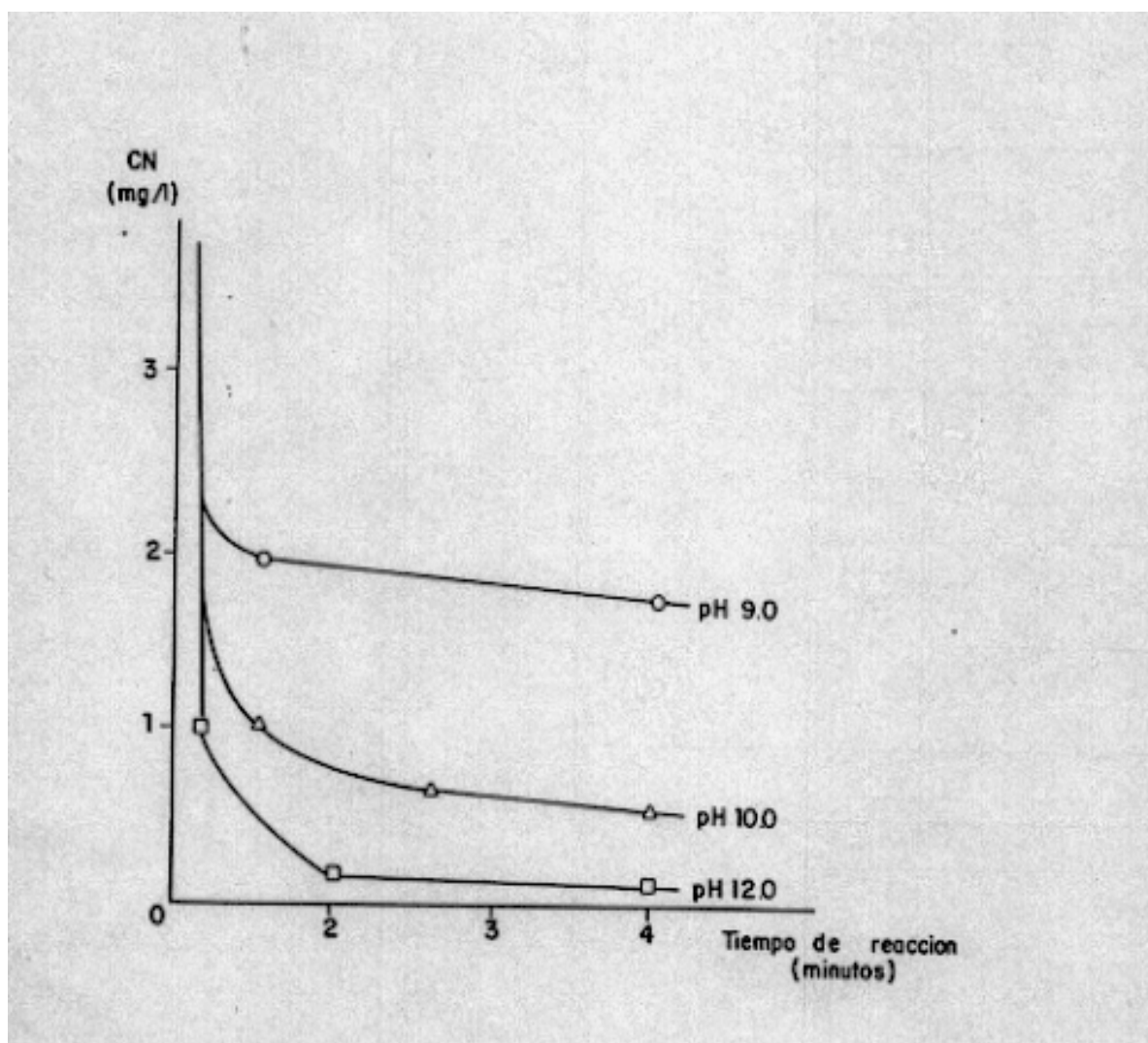


Figura 4.- Efecto del pH en la velocidad de eliminación del  $\text{CN}^-$

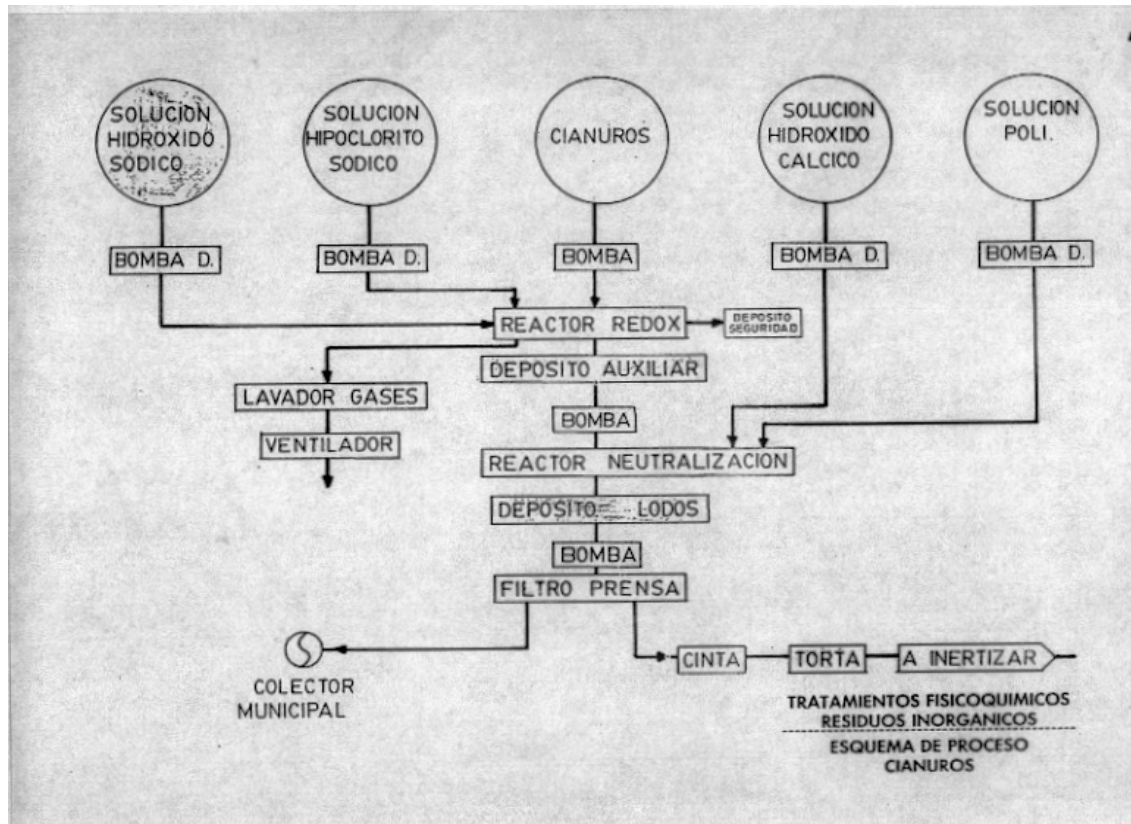


Figura 5.- Esquema de una instalación de tratamiento de cianuros

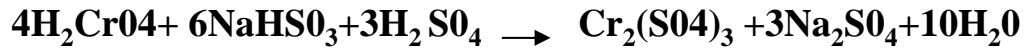
#### 4. REACCIONES REDUCCIÓN. CROMO HEXAVALENTE

Las reacciones de reducción química son muy poco empleadas en los procesos de tratamiento físico-química el ejemplo más común es el tratamiento de cromo VI o cromo hexavalente. El método más empleado es su reducción a cromo trivalente y su posterior precipitación como hidróxido.

Como agente reductor podemos utilizar entre otros: bisulfito sódico, sulfito sódico, metabisulfito sódico y sulfato ferroso (éste último es el más empleado).

Las reacciones tienen lugar a pH ácido. La velocidad de reacción es muy sensible al pH, así a pH fuertemente ácidos es muy rápida, sin embargo en cuanto aumenta el pH, la velocidad decae.

### Con bisulfito



### Con sulfato ferroso



El consumo de bisulfito es de 1,3 gr de  $\text{NaHSO}_3$ /gr  $\text{H}_2\text{CrO}_4$

La reacción igual que en el caso de los cianuros se controla instalando en el tanque de reacción un pHmetro y un electrodo redox, en este caso el pHmetro controlará la dosificación de ácido para que el pH se mantenga próximo a 1 y el electrodo redox de nuevo nos indicará el final de la reacción. Una vez reducido el CrVI se procede a su precipitación química

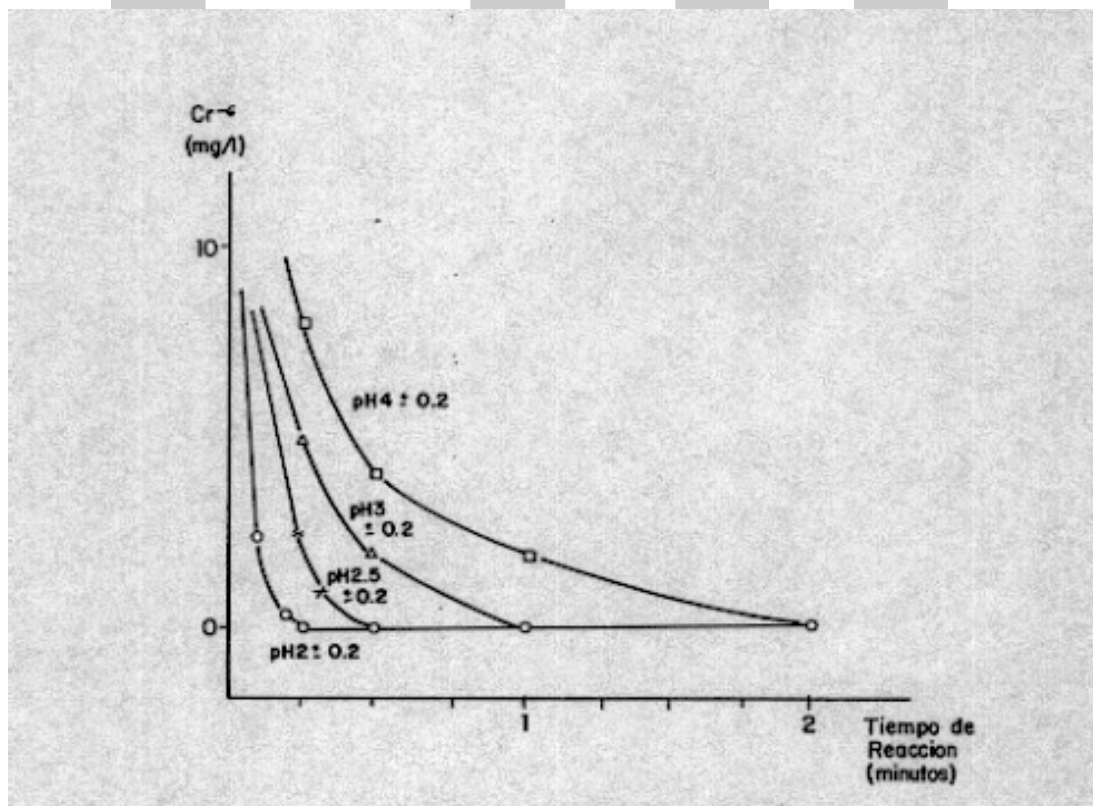


Figura 6.- Influencia del pH en la reducción del Cr VI.-

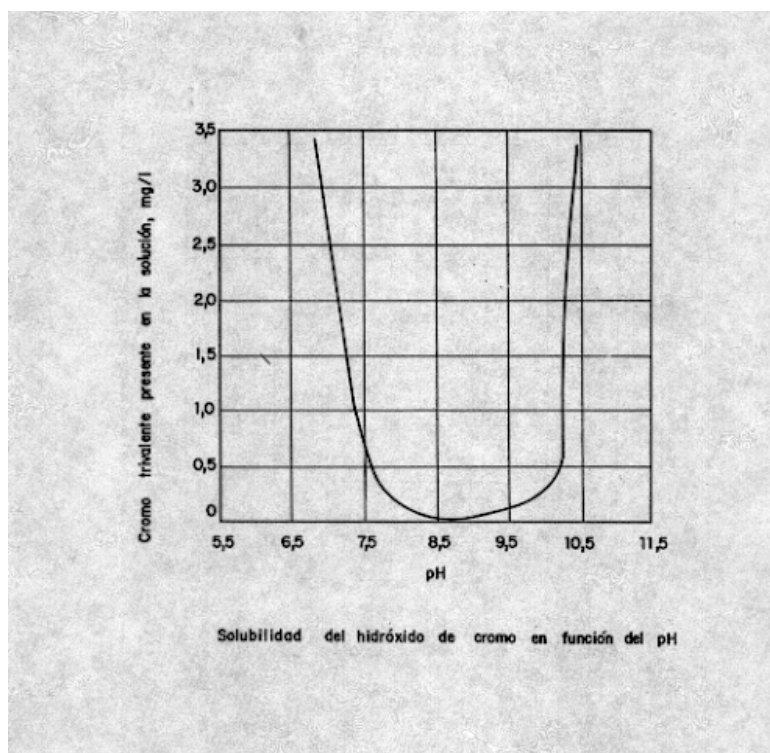


Figura 7.- Curva de Solubilidad del hidróxido de cromo III en función del pH

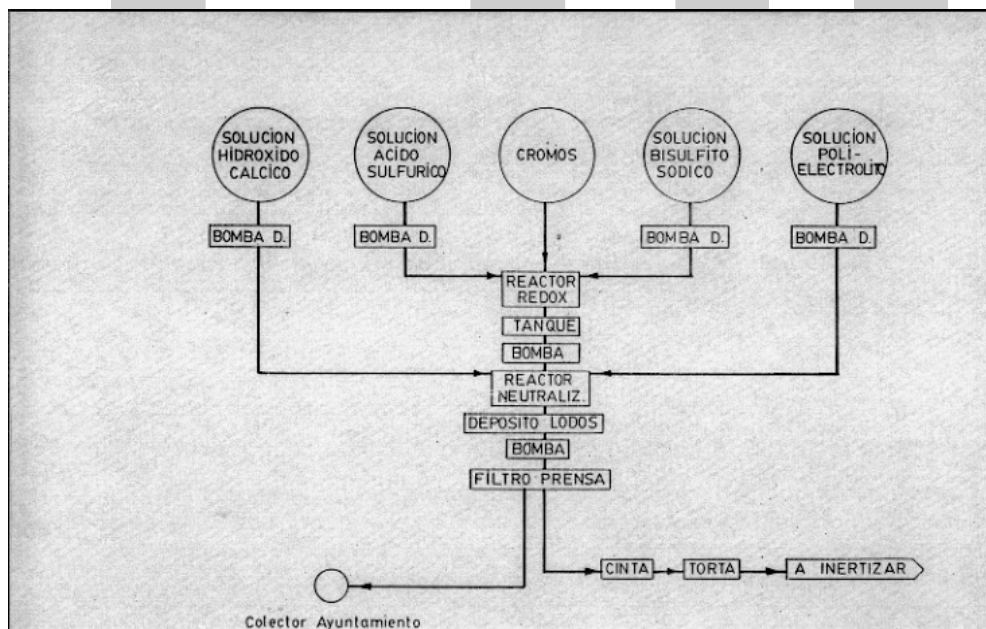


Figura 8.- Esquema de una instalación de reducción de cromo VI.-

## **5 PROCESOS DE SEPARACIÓN. ROTURA DE EMULSIONES.-**

Los residuos característicos de este tipo de tratamiento son las emulsiones agua-aceite y los residuos de deslastres (MARPOL). Los residuos a tratar proceden de diversas fuentes: refrigeración, corte, lubricación, etc. El residuo más característico es la taladrina emulsionable, las cuales presentan la siguiente composición:

- Base mineral: aceite mineral
- Emulgente: aniónico (sulfonato sódico) , no iónico (mercaptobenzo tiazol)
- Aditivos: anticorrosivos, antiespumantes, bactericidas, fungicidas.

La composición habitual de este tipo de taladrinas es un emulsión de un 2-15% de aceite en agua, siendo el pH de esta disolución aproximadamente 8- 9,5. En tre los aditivos empleados cabe destacar derivados del cloro, azufre y fósforo.

Existen diferentes metodos de tratamiento de estas emulsiones, en general, el proceso consiste en la separación de la fase aceitosa y de la fase acuosa. La fase aceitosa, puede, entonces, ser valorizada energéticamente siempre que su contenido en cloro y azufre lo permita. En caso contrario será incinerada.

El tratamiento se basa en la desestabilización de las emulsiones mediante un cambio de pH para separar la suspensión coloidal de los compuestos orgánicos en agua.

El ácido sulfúrico es el más empleado junto con los poli electrolitos específicos que hay para este tipo de suspensiones.

La separación de las fases se ve favorecida con la temperatura, por eso a veces, el tratamiento se realiza en caliente (60-70°C).

La centrifugación posterior optimiza la separación de las fases, así como la calidad de cada una de ellas.





## 6 TRATAMIENTOS DE ORGÁNICOS E IONES.--

Las cada vez más restrictivas condiciones de vertido tanto a cauce como a saneamiento municipal están obligando a las instalaciones donde se llevan a cabo procesos de tratamiento físico-químico a incorporar tratamientos de cola o de mejora de la calidad final. Así hemos visto como los procesos de precipitación eliminaban los metales pesados en disolución, sin embargo es evidente que los iones solubles como por ejemplo, el calcio, el sodio, los cloruros, los sulfatos etc. se van a encontrar presentes en el efluente una vez que éste ha sido sometido a los distintos procesos de floculación y filtración. Así la alta salinidad de estos efluentes de una planta de tratamiento físico químico es una de sus características principales, otra es la presencia de compuestos orgánicos a nivel de trazas y que estaban presentes en los residuos para conferirles una mayor estabilidad, resistencia a la oxidación, etc con el fin de prolongar la vida de los baños de reacción de la industria de galvanoplastia.

Estas tecnologías que vamos a ver a continuación se han incorporado al tratamiento de los residuos mucho más recientemente, las ventajas que reportan a los sistemas tradicionales de tratamiento son:

- Permiten hacer frente a la creciente presión de la regulación jurídica (límites más restrictivos de vertido).
- Reciclan el agua tratada.

Los inconvenientes más característicos son:

- Aumentan el coste de tratamiento
- El residuo que generan es muy difícil de tratar por técnicas no térmicas.

Los tratamientos más empleados para este ajuste final de la calidad de los vertidos son la evaporación y las técnicas de membrana.

## Tratamiento por membranas.-

Una membrana se define como un film delgado (fino) que separa dos fases y actúa como barrera selectiva al transporte de materia, debido a la existencia de una diferencia de potencial químico entre las dos fases.

La membrana debe considerarse un material funcional no pasivo.

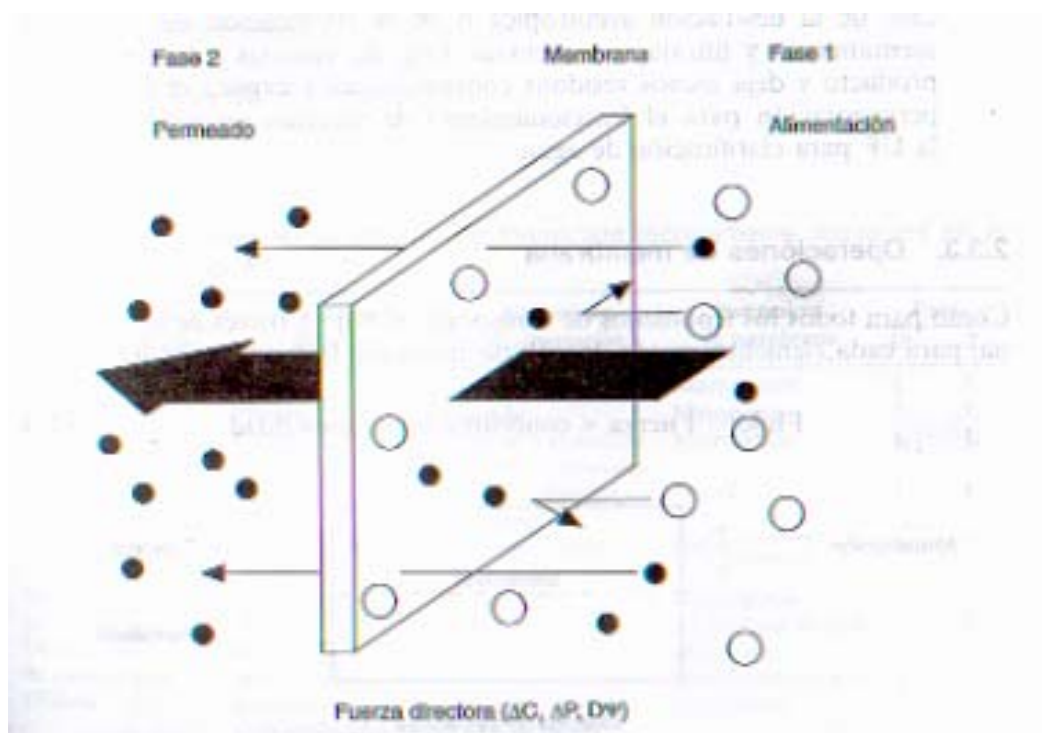
La operación de membrana se define como una operación donde la corriente de alimentación se divide en dos: el permeado y el retenido por la membrana. Se utilizan para purificar o concentrar una solución o una suspensión (solvente:soluto o separación de partículas) y para fraccionar una mezcla (separación soluto-soluto).

Sus principales limitaciones son:

- Insuficiente selectividad de las membranas
- Caudales relativamente pobres por problemas de ensuciamiento de las membranas.
- Problemas económicos (más difícil predecir los costes).
- El rechazo suele situarse en el entorno del 30-40%.

Entre sus ventajas frente a los procedimientos tradicionales destacamos las siguientes:

- No hay acumulación de productos en las membranas.
- No requiere la adición de reactivos.
- Su incorporación suele implicar el reciclado del agua depurada



Las membranas más utilizadas trabajan mediante una diferencia de presión, así tenemos:

Ósmosis inversa.- Por medio de una presión el solvente de una solución se transfiere a través de una membrana, la diferencia de potencial químico promueve la difusión del agua a través de la membrana. P trabajo= 5 a 8 MPa

Nanofiltración.- la membrana es selectiva para la eliminación de iones polivalentes (calcio y magnesio), más recientemente se emplea para eliminar materia orgánica. P trabajo= 0,5 a 1,5 Mpa.

Ultrafiltración.- Permiten el rechazo de solutos gruesos (macromoléculas), los de bajo peso molecular no son retenidos por la membrana. P<sub>trab</sub> = 50 a 500 kPa

Microfiltración.- Presentan mayor tamaño de poro que la UF. (clarificación).

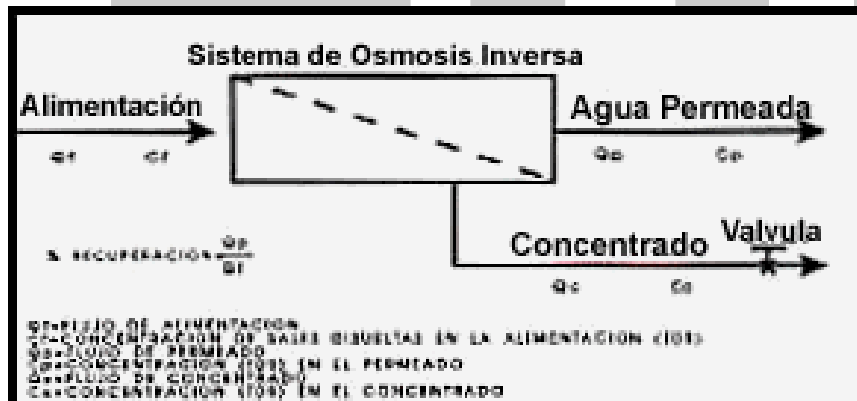
Las membranas se clasifican de acuerdo a la técnica que utilizan como:

- Separación fundamentada en grandes diferencias de tamaño: MF, UF, y DIA. Requieren membranas porosas.

- Separación fundamentada en diferencias de solubilidad y difusividad (solución-difusión): PG, PV y OI. Requieren membranas no porosas o densas.
- Separación fundada en diferencias en las cargas de las especies a separar: efecto electroquímico como en ED y diálisis DONNAN. Llevan membranas de intercambio iónico.

#### Aplicaciones en tratamiento de efluentes industriales:

- Soluciones con iones disueltos difícilmente precipitables (efluentes de otros procesos). Por ejemplo, aguas con  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  etc.
- Soluciones con trazas de compuestos orgánicos (aguas con aceites, aguas con pigmentos, aguas con disolventes, etc).



## Evapocondensación.-

La tecnología alternativa a las membranas son los tratamientos de evaporación y condensación posterior del agua.

Su principal limitación es que requiere la ausencia de compuestos orgánicos volátiles ya que en este caso se destilarían con la fase acuosa (sólo aplicable en el caso de evapooxidación).

Consisten en la evaporación del agua presente en la corriente a tratar de forma que los contaminantes se quedan en el concentrado. El agua evaporada se condensa para su reutilización.

El evaporador/concentrador utiliza el efecto combinado de la tecnología a vacío y una bomba con calentador para obtener una destilación a bajas temperaturas.

En muchos casos, la aplicación de un proceso industrial de evaporación, permite conseguir una importante reducción del volumen de aguas residuales, además de una eventual recuperación de las sales y materias primas que éstas contienen en solución.

Se aplican al mismo tipo de corrientes que las que se han visto para las membranas.

Los factores decisivos para la toma de decisiones ente un método basado en las membranas y la evaporación son:

- % de rechazo obtenido en las membranas
- % de concentrado obtenido con el evaporador
- Caudales a tratar
- Consumo energético
- Costes de operación y mantenimiento
- Personal requerido
- Coste de gestión del evaporado-concentrado

La evaporación se puede llevar a cabo utilizando las siguientes tecnologías.

- -Evaporación al vacío mediante bomba de calor. Se realiza vacío en la cámara de ebullición, con lo que se consiguen  $T^a$  de destilación de  $30^{\circ}$  a  $40^{\circ}\text{C}$ .
- -Evaporación al vacío mediante fluidos de calefacción y enfriamiento externos. Útil para caudales altos.
- Evaporación por termocompresión: trabaja a vacío y el vapor destilado se comprime hasta  $P$  atmosférica sobrecalentándose, siendo la fuente de energía para la evaporación y el precalentamiento del líquido a tratar.

Los métodos más empleados en tratamiento de residuos se comentan a continuación:

**Termocompresión.** Recuperación del calor mediante la compresión y reutilización como fluido calefactor del vapor obtenido.

Características:

Consumo de electricidad reducido

Caudal de evaporación entre 20 y 1000l/h

Inversión ligeramente superior

**Bomba de calor:** se basa en un ciclo cerrado de compresión y expansión de freón. El freón se calienta y evapora al líquido, al expandirse se enfría y condensa el líquido.

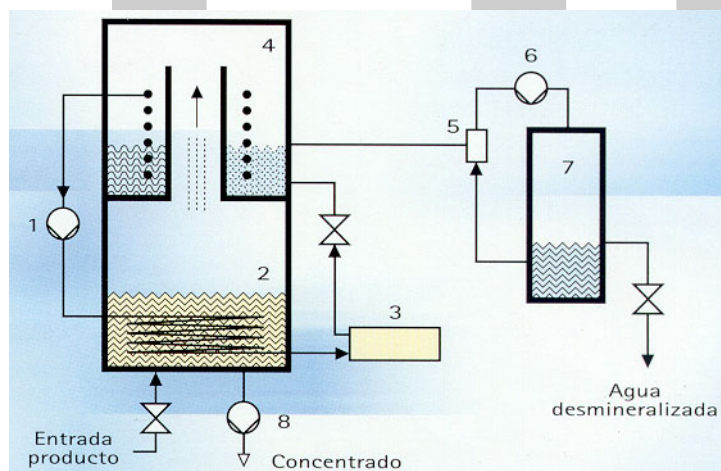
Características:

Consumo de electricidad mayor

Caudal de evaporación entre 15 y 700 l/h

Inversión ligeramente inferior

Más versátil



- 1.- Compresor
- 2.- Ebullición
- 3.- Refrigerador
- 4.- Condensación
- 5.- Inyector
- 6.- Bomba
- 7.- Depósito destilado
- 8.- Bomba de concentrado

## ***ESTABILIZACIÓN.-***

Se define la estabilización como el proceso en el cual los residuos sólidos peligrosos son modificados hasta perder las características que le confieren su peligrosidad pasando por tanto a ser considerados no peligrosos.

Los procesos de estabilización son métodos “no destructivos” para inmovilizar los componentes peligrosos de un residuo. Se consideran “no destructivos” ya que no eliminan, o reducen, la cantidad de dichos componentes peligrosos, sino que absorben físicamente, encapsulan o cambian la forma fisicoquímica del componente contaminante del residuo, lo que se traduce en un producto menos lixiviable

No debe confundirse con la solidificación cuyo objeto es reducir la humedad de los residuos sólidos.

Los procesos de estabilización se utilizan para:

- a) minimizar la velocidad de migración de los contaminantes al medio ambiente.
- b) reducir el nivel de toxicidad.
- c) mejorar el manejo y las características físicas del residuo.
- d) disminuir la superficie a través de la cual puede tener lugar la transferencia o pérdida de contaminantes.
- e) limitar la solubilidad de cualquier contaminante presente en el residuo.
- f) reducir la toxicidad de los contaminantes.
- g) aumentar la resistencia.
- h) disminuir la compresibilidad.
- i) disminuir la permeabilidad del residuo.

El potencial de pérdida de contaminantes de una masa estabilizada se determina generalmente mediante los ensayos de lixiviado. **La lixiviación** es el proceso por el cual los contaminantes se transfieren de una matriz estabilizada a un medio líquido como el agua.

Esta tecnología actúa de dos formas distintas según la naturaleza, orgánica o inorgánica, del residuo a tratar:

- Los residuos de naturaleza orgánica se tratan, principalmente, con reactivos tales como cal y sepiolita, que producen la fijación e insolubilización de los componentes contaminantes orgánicos y la configuración de un estado sólido que tenderá a compactarse con el tiempo.

Al mismo tiempo, el carácter alcalino de los reactivos y la carbonatación con el tiempo del exceso de cal que presenta el resultante, conducirán también a una estabilización de los elementos inorgánicos que pudiera llevar el residuo.

- En cambio, con los residuos de naturaleza inorgánica se actúa con reactivos a base de silicatos y aluminatos de calcio, que producen dos tipos de efecto:

Al principio se obtiene una solidificación del medio por formación de una matriz cristalina, obtenida por el fraguado de los reactivos incorporados, que engloba a los elementos contaminantes. Esto se entiende si se considera que los silicatos poseen una estructura tetraédrica, y que éstos pueden acoplarse de dos en dos formando octaedros, los cuales poseen un volumen interior suficiente para acoger los átomos más gruesos de los elementos contaminantes .

Posteriormente, se producen una serie de reacciones, bien de unión de los elementos contaminantes a la estructura cristalina mediante enlaces covalentes, o bien el desplazamiento de átomos de Al y Ca de dicha estructura por otros átomos de dichos elementos contaminantes. Con ello se consigue que los citados elementos contaminantes se integren en la estructura, obteniéndose su inmovilización por formación de compuestos minerales estables.

Estos comportamientos se traducen en un progresivo aumento de las características mecánicas y en una disminución de la permeabilidad del resultante obtenido.

En la práctica, los reactivos que se vienen utilizando son: la cal para conseguir el pH adecuado; la sepiolita o la atapulgita como absorbentes/adsorbentes; y cemento, silicatos, cenizas, escorias, arenas, etc. como ligantes.



Las dosificaciones de estos reactivos serán variables, dependiendo el tipo y cantidades de factores tales como la naturaleza del residuo, tipo de sus componentes, concentraciones, contenido en agua, etc. Por ello, previamente al procesamiento en la línea, será preciso realizar a nivel de laboratorio los ensayos de tratabilidad correspondientes.

Para lograr la estabilización los procesos que intervienen son los siguientes:

**a) Macroencapsulación:** es el mecanismo por el cual los constituyentes del residuo peligroso quedan atrapados físicamente en una matriz estructural de mayor tamaño, es decir, los constituyentes del residuo peligroso se retienen en los poros discontinuos del material estabilizante. Los contaminantes así estabilizados pueden aparecer en el medio ambiente si no se conserva la integridad de la masa, pues ésta puede descomponerse con el tiempo debido a las tensiones medioambientales: ciclos repetitivos de humectación y desecación o congelación y deshielo, penetración de fluidos de percolación y tensiones físicas de carga, quedando los compuestos atrapados libres para migrar.

El grado de macroencapsulación aumenta según el tipo y la energía por unidad de masa de la mezcla. Los estudios en laboratorio deben realizarse simulando las condiciones de mezcla en campo.

**b) Microencapsulación:** en éste caso los constituyentes del residuo peligroso quedan atrapados en el interior de la estructura cristalina de la matriz solidificada a nivel microscópico, así si los materiales estabilizados se degradan a partículas de tamaño relativamente pequeño, la mayor parte del residuo peligroso permanece atrapado. Sin embargo al no estar el residuo alterado o ligado químicamente, la velocidad de liberación del contaminante de la masa estabilizada puede aumentar al disminuir el tamaño de partícula y quedar expuesta una superficie mayor. Para los estudios de laboratorio sucede lo mismo que en el caso de la macroencapsulación.

**c) Absorción:** es el proceso por el cual los contaminantes son tomados por el sorbente de manera similar a como una esponja toma el agua. La absorción precisa de un material sólido (absorbente) que empape o absorba los líquidos libres del residuo. Este proceso se emplea principalmente para eliminar los líquidos libres de manera que se mejoren las características de manejo del residuo, es decir para solidificar el residuo. Como los líquidos pueden escurrir del material al someter a la masa a tensiones de consolidación se utiliza la absorción como una medida temporal, para mejorar las características de manejo. Los absorbentes más comunes son suelo y cal.

**d) Adsorción:** fenómeno por el cual los contaminantes quedan ligados (adsorvidos) de manera electroquímica a los agentes de estabilización de la matriz teniendo menor probabilidad de quedar libres en el medio ambiente. En este caso se necesita una fuerza físico-química adicional para desorber el material de la superficie de adsorción, por ello este tratamiento se considera más permanente.

**e) Precipitación:** algunos procesos de estabilización precipitan los contaminantes del residuo dando lugar a una forma más estable de los constituyentes dentro del residuo. Los precipitados, tales como hidróxidos, sulfuros, silicatos, carbonatos y fosfatos quedan así contenidos en la masa estabilizada como parte de la estructura del material.

En la evaluación de la eficacia de la estabilización deben considerarse adecuadamente las condiciones medioambientales presentes y futuras.

**f) Detoxificación:** es cualquier mecanismo que modifica un constituyente químico en otro (u otra forma del mismo constituyente) no tóxico o menos tóxico.

### MATERIALES MÁS COMÚNMENTE UTILIZADOS

El término **aglomerante** se utiliza para aquellos reactivos que aumentan la resistencia asociada a la estabilización. El término **sorbente** se utiliza para aquellos reactivos que principalmente retienen los contaminantes en la matriz estabilizada

En el mercado están disponibles una amplia gama de sorbentes y aglomerantes, incluidos algunos reactivos patentados. Por lo tanto se describirán aquellos no patentados:

- a) **Cemento:** se mezcla con el residuo y en caso de que el residuo no tenga agua suficiente se añade agua para su hidratación. Esta hidratación origina una estructura cristalina, de aluminosilicato cálcico, formando una masa dura, monolítica de aspecto rocoso. Este tipo de estabilización se adapta mejor a residuos inorgánicos, fundamentalmente los que contienen metales pesados. Como resultado del elevado pH del cemento, los metales son retenidos como hidróxidos insolubles o carbonatos en la estructura endurecida. Los estudios demuestran que el plomo, cobre, zinc, estaño y cadmio probablemente se unen a la matriz por fijación química, formando compuestos insolubles, mientras que el mercurio es retenido de

manera predominante por microencapsulación física. Los contaminantes orgánicos interfieren el proceso de hidratación y no son fáciles de estabilizar, para mejorar esto se pueden incorporar junto con el cemento otros aditivos como arcillas modificadas orgánicamente o naturales, vermiculita y silicatos de sodio solubles. Además los contaminantes orgánicos reducen la resistencia final y la formación de la estructura cristalina originando un material más amorfo.

Ventajas de la estabilización con cemento: su tecnología, manejo, mezcla, fraguado y endurecimiento son bien conocidas. Costo, equipo y personal accesibles. La estabilización con cemento puede llevarse a cabo con el agua suficiente para que el material sea bombeable. El sistema tiene capacidad para admitir variaciones en la composición química del residuo.

Desventaja: la sensibilidad del cemento a la presencia de ciertos contaminantes que pueden retardar o inhibir la hidratación adecuada, el fraguado y endurecimiento del material. También se utilizan cementos con adiciones, tal es el caso de los cementos puzolánicos.

**b) Cal:** se utiliza para la estabilización de lodos, la que al reaccionar con los materiales presentes en el residuo puede dar lugar a silicato cálcico, alúmina cálcica o aluminosilicato cálcico hidratados, materiales que se forman a partir de la reacción del calcio de la cal y los aluminosilicatos del residuo. Puede realizarse una estabilización adicional con el uso de otros ingredientes en menor cantidad. Se recomienda para contaminantes inorgánicos y lodos metálicos. También se utilizan cales modificadas, silicatos solubles, etc.

**c) Polímeros orgánicos termoestables y termoplásticos:** se mezcla un monómero, como la urea con formaldehído que actúa como catalizador, para formar un material polímero, formándose una masa tipo esponja que retiene en la matriz partículas sólidas del residuo peligroso (macroencapsulación). Este proceso deja, sin embargo, algunos residuos sin retener, en especial residuos líquidos, por lo que el producto del residuo final debe dejarse secar y conservar en contenedores.

Ventajas: el material obtenido es de baja densidad, se requieren pequeñas cantidades de aditivos para solidificar los residuos, por lo que esta técnica tiene mayor aplicación de residuos orgánicos, no volátiles, líquidos. Utilizándose también para solidificar residuos de baja radioactividad antes de su eliminación definitiva.

Desventajas: no son aplicables a la recuperación de terrenos debido a su coste, peligro de incendio, producción de agua a partir de la matriz del residuo y volatilización de compuestos orgánicos.

Los materiales termoplásticos se combinan con asfalto, parafina, betún, polietileno, polipropileno y azufre, fundidos con los residuos a altas temperaturas.

**d) Vitrificación:** se obtiene un residuo estructuralmente más estable con un potencial de migración de contaminantes al medio reducido. Puede ser desarrollada in situ o en planta.

La evaluación de la eficacia de la estabilización necesita valorar las propiedades físicas, técnicas y químicas del material estabilizado, para ello se utilizan una gran cantidad de ensayos de laboratorio entre los que citamos.

**Ensayos de extracción y lixiviación** (estos términos se usan indistintamente): proceso por el que los contaminantes son transferidos de una matriz sólida o estabilizada al lixivante. El fluido al cual son lixiviados los contaminantes se denomina **lixivante**, luego de que éste se haya contaminado se denomina **lixiviado**. La capacidad de un material estabilizado para lixiviar contaminantes se denomina **lixiviabilidad**.

Al circular el lixivante, los contaminantes de la muestra pasan de la masa estabilizada al lixivante pudiendo disolverse en el lixivante, ser lavados de la superficie del material estabilizado o difundirse desde la masa estabilizada al lixivante, por lo que la lixiviabilidad depende de las propiedades físicas y químicas, tanto del material estabilizado como del lixivante. Los principales factores que afectan este fenómeno son la alcalinidad del producto estabilizado, la relación superficie-volumen del residuo y la tortuosidad, la medida de la longitud del camino para la difusión.

El método de ensayo afecta a la lixiviabilidad de la muestra a través de las siguientes **variables**:

- Relación lixivante residuo
- Superficie del residuo (por ejemplo triturar la masa estabilizada a pequeñas partículas)
- Tipo de lixivante (por ejemplo agua destilada, ácido acético, lluvia ácida simulada)
- PH del lixivante
- Tiempo de contacto
- Tiempo de agitación
- Número de reposiciones con lixivante nuevo

- Recipiente de extracción
- Temperatura

**Ensayos químicos:**

El tipo de análisis y el procedimiento analítico a menudo se especifican en el procedimiento de lixiviación citando los Métodos Estándar (Standard Methods) o los protocolos de la EPA Estados Unidos. Estos ensayos se reducen al análisis del fluido extractado o a la identificación de los contaminantes en el residuo.

**Los distintos métodos de ensayos químicos son:**

- a) Análisis de residuo total
- b) Metales por espectrometría de plasma acoplado inductivamente o absorción atómica
- c) Compuestos orgánicos por cromatografía de gases (CG) y espectrometría de masas (MS)
- d) Carbono orgánico total
- e) Pérdida al fuego
- f) pH
- g) Transformación de Fourier del espectro de infrarrojos (FTIR)
- h) Calorimetría de exploración diferencial y análisis gravimétrico térmico

**Ensayos de propiedades físicas, técnicas y durabilidad:****De propiedades físicas:**

- a) **Contenido en humedad:** determina la cantidad de agua o líquido presente en una cantidad dada de material. Se determina el peso húmedo de una muestra pequeña, de pocos gramos, se deja secar por 24hs a 105 °C y se pesa nuevamente. Luego se obtiene el contenido de humedad en porcentaje dividiendo el peso de agua por el peso de la masa seca.
- b) **Densidad másica seca y húmeda (peso unitario):** el peso unitario másico se determina midiendo y pesando las muestras estabilizadas. Se calcula como el peso de sólidos más el fluido de los poros por unidad de volumen de material. El peso unitario seco se determina a partir del peso de sólidos tras secado en horno por unidad de volumen, las unidades son gr/cm<sup>3</sup>.
- c) **Peso específico:** mide la relación masa-volumen del componente sólido individual del material de tres fases, y es la densidad de sólidos dividida por la densidad del agua. El método para deter-

minarlo es de difícil ejecución y generalmente no puede aplicarse a un material solidificado que contenga distintos materiales, cada uno de ellos con un peso específico distinto.

**d) Límites de Atterberg:** miden el índice de plasticidad de los suelos.

e) **Granulometría:** es importante para el diseño de alternativas de estabilización. Se utilizan tamices para la fracción gruesa. Para la fracción fina (partículas entre 0,0074mm a micras) se usan métodos gravitacionales que emplean hidrómetros (las partículas mayores se depositan más rápido en el agua y el hidrómetro permite medir las diferencias de tamaño). No se aplica al material estabilizado pues éste generalmente es un monolito.

f) **Índice de cono en laboratorio:** se realiza sobre el material estabilizado inmediatamente después de la mezcla de los reactivos y antes del fraguado. Habla sobre la resistencia de los materiales en la mezcla e interviene en la toma de decisiones acerca del manejo de los materiales y la capacidad para resistir el tráfico rodado durante la construcción. Se deja caer un cono desde una altura (ambos estandarizados) sobre el material y se mide la distancia de penetración.

g) **Penetrómetro de campo:** permite valorar las propiedades de la mezcla del lodo estabilizado antes de su curación. Es un cilindro estandarizado que se empuja sobre el material para medir su resistencia a la penetración, obteniendo la resistencia a la compresión libre en kg/cm<sup>2</sup>. Se puede realizar en campo.

h) **Examen de microestructura:** mediante: difracción de rayos x y microscopía: óptica electrónica y dispersiva. Se utiliza para conocer mejor la naturaleza de los procesos de estabilización.

i) **Formación de sobrenadante durante curación y velocidad de fraguado:** caracterizan el comportamiento de los residuos tratados en las primeras horas tras la mezcla. Se utilizan preferentemente para materiales tipo hormigón y no se adaptan a materiales tipo suelo. Informan sobre la aceptabilidad de la mezcla. Se coloca una muestra recién mezclada en un vaso graduado de un litro de capacidad, y al sedimentar los sólidos y el sobrenadante quedar flotando, se pueden medir las cantidades de cada uno de ellos. El tiempo de fraguado puede medirse con una aguja Vicat: midiendo la penetración a diferentes tiempos.

**De propiedades técnicas:**

a) **Ensayo de resistencia a compresión libre:** determina la resistencia de los materiales cohesivos, los comprendidos entre las arcillas ligeras y el hormigón. Un cilindro de 7,1cm de diámetro por 14,2cm de altura se carga axialmente, midiendo esta carga y su deformación, pudiendo calcularse así la tensión aplicada y la deformación resultante.

b) **Consolidación:** evalúa el asentamiento del residuo estabilizado. Se aplica una carga axial y se impide la deformación lateral, midiendo los tiempos de deformación para cada carga aplicada. Se realiza el diagrama de consolidación.

c) **Conductividad hidráulica:** a veces se la denomina permeabilidad. Se utiliza para obtener información sobre la velocidad a la que los compuestos químicos presentes en el residuo tratado migran al medio. Se utiliza el ensayo de permeabilidad triaxial, la muestra se encapsula en una membrana flexible que permite que la muestra se contraiga o expanda bajo las tensiones aplicadas en confinamiento.

**De propiedades de durabilidad:** Estos ensayos evalúan el rendimiento de la masa estabilizada a largo plazo, para resistir ciclos repetitivos de erosión.

a) **Durabilidad Húmedo-seco (ASTM D4843):** son doce ciclos de humectación-deseccación, de inco horas bajo el agua y 42 hs en horno bajo condiciones de secado a baja temperatura (71°C), cada uno. Evaluando luego la variación de volumen, contenido de humedad y pérdida de peso. Después de los doce ciclos se determina la pérdida total de peso de la muestra, o bien se determina el número de ciclos que provocan la disgregación si la muestra no permanece intacta al completarse los doce ciclos.

b) **Durabilidad Hielo-deshielo (ASTM D4842):** condiciones de erosión de congelación y deshielo. Las muestras se someten a doce ciclos, cada uno consta de un período de congelación de 24 hs a -20 °C y otro de deshielo de 24hs en agua. El rendimiento se evalúa igual que en el ensayo anterior.

**PROCESO DE ESTABILIZACIÓN.-**

Los residuos se descargan desde una tolva e impulsados por los tornillos helicoidales situados en el fondo de la misma, los cuales disponen de velocidad ajustable mediante un variador de frecuencia, los residuos caen a una cinta transportadora que los transporta hasta la boca de la mezcladora. Esta cinta dispone de una báscula para pesaje automático del producto. Cuando se alcance la cantidad a tratar, se detendrán tanto la cinta como los tornillos alimentadores, los cuales volverán a arrancar, temporizadamente cuando lo precise el sistema de control.

La dosificación de los reactivos sólidos se realiza, secuencialmente, desde los silos de almacenamiento mediante tornillos sin-fín que alimentan a una tolva pesadora.

A partir de los datos introducidos por el operador (producto a tratar y % de aditivos sólidos), se seleccionará la mezcla a realizar.

Cuando se alcance el peso prefijado del reactivo que se esté alimentando, se detendrá el sistema de alimentación correspondiente y se pondrá en marcha el del siguiente reactivo, si lo hubiera. Al producirse la parada, los tornillos sin-fín pueden quedar con aditivo en su interior.

Una vez cargada la tolva con la totalidad del aditivo necesario para la fórmula, permanecerá así hasta que se de el orden de vaciado de la tolva de pesaje sobre la inertizadora. A continuación, una vez que el sistema de pesaje detecte que la tolva está vacía, se procederá a cerrar la compuerta e iniciar un nuevo ciclo de llenado.

Una vez introducida la cantidad de producto establecido en la mezcladora, con los reactivos preparados en las tolvas de pesaje, se dejan entrar éstos últimos, empezando a contar el tiempo prefijado de mezcla, dato que se habrá introducido en el ordenador como entrada del proceso a realizar.

Transcurrido el mismo, se abrirá la compuerta de descarga de la mezcladora, durante un tiempo variable, también prefijado por el operador. De nuevo, transcurrido éste, se cerrará la mezcladora y volverá a repetirse el ciclo de tratamiento, en el caso de que se disponga de producto.



Una vez descargados los residuos tratados, y dependiendo de su composición, puede ser necesario dejar reposar la mezcla durante un periodo de tiempo que no suele ser superior a 24 horas, antes de realizar las pruebas que permitan comprobar que se han producido las reacciones previstas y que el producto solidificado cumple con las especificaciones de vertido.

En este caso, el estabilizado se almacenará en los cubetos de maduración hasta su envío a vertedero.

Tanto la zona de recepción de residuos como la de almacenamiento y trituración de residuos se encontrarán en depresión, para lo que se empleará un lavador de gases.

### **MEZCLADORA**

El modelo más adecuado para la estabilización de residuos es la de eje vertical, las capacidades oscilan entre 700 a 1500 l., están dotadas de paletas de mezcla, construidas en aleación Cr- Ni o similar, y de un agitador de accionamiento hidráulico, de velocidad variable entre 0 y 200 vueltas por minuto, que facilita la mezcla íntima del producto y el reactivo. Tanto las paredes como el fondo deben estar recubiertas de acero especial antidesgaste para evitar su rozamiento.

En la tapa superior de la mezcladora estarán situadas las aberturas para entrada de residuos, de reactivos sólidos, de reactivos líquidos y la conexión del filtro de aire.

En la parte inferior, la mezcladora estará dotada de una trampilla accionada hidráulicamente, que permite la salida directa del producto tratado.



## 5. **RECUPERACIÓN DE DISOLVENTES**

Los disolventes orgánicos son compuestos volátiles que se utilizan solos o en combinación de otros agentes para disolver materias primas, productos o materiales residuales. Una vez que los disolventes han sido empleados y, tal y como se cita en la ley 10/98, además de sus envases vacíos, trapos o cualquier otro material que se haya utilizado para su aplicación, son considerados residuos peligrosos, por lo que deben ser gestionados por un gestor autorizado.

El sector industrial que emplea este tipo de productos es muy amplio. Cabe destacar la fabricación de automóviles, fibras artificiales, pinturas, barnices y similares, papel, tintas, vidrio, poliuretanos y piel artificial, electrodomésticos y aparataje eléctrico, laminados metálicos, lubricantes y aditivos, resinas y pigmentos, a lo que se debe añadir el sector del transporte y distribución de disolventes, la industria farmacéutica y laboratorios, procesos de impresión y artes gráficas, talleres de reparación de vehículos, industria química en general, centros de gestión de residuos municipales como puntos limpios o similares, etc.

En todos estos sectores, este tipo de disolventes se emplea mayoritariamente como agente limpiador y desengrasante de piezas y maquinaria, a lo que hay que sumar sus aplicaciones como agente tensoactivo, plastificante, conservante, portador de otras sustancias, pegamento, lubricante, etc.

El empleo de estas sustancias es en muchos casos completamente necesaria, pero la dificultad del manejo de los disolventes, los riesgos potenciales sobre la salud de los trabajadores y sobre el medio ambiente, así como la obligatoriedad del almacenamiento y procesado de los residuos generados, aconseja en muchos casos el estudio de alternativas, como por ejemplo, la sustitución de materias primas, procesos o productos. En concreto, en el caso del empleo en limpieza de materiales, los disolventes orgánicos serían viables únicamente si no es posible la aplicación de agua o aire, agentes de base vegetal, elementos abrasivos con agua o aire, disoluciones acuosas de detergentes, disoluciones alcalinas y ácidos.

Además, otra medida preventiva que se aplica en la industria es la optimización de la aplicación del disolvente incorporando mejoras en los hábitos y en la organización del trabajo, como por ejemplo el empleo de los disolventes orgánicos menos peligrosos, maximizar la eficacia de su empleo, normalizar el uso de los disolventes, controlar las pérdidas por evaporación, mantener los residuos de disolventes lo menos contaminados posible para facilitar su reciclaje, evitar acumulación de sedimentos en los tanques de disolventes, etc. En cualquier caso, al final se obtendrá un

residuo de disolvente que será preciso manipular y tratar adecuadamente. En este sentido, al igual que el resto de residuos peligrosos, la legislación vigente mantiene la figura del productor de residuos para aquel que genere ciertas cantidades de residuos en sus procesos y, la del gestor, para aquel que recoge, transporta y/o procesa o elimina el residuo.

Sobre el medio ambiente, el efecto se deriva principalmente de los compuestos orgánicos volátiles COV, liberados a la atmósfera que dañan la capa de ozono, contribuyen a la formación de ozono ambiental, etc. Por otro lado, sobre la salud humana influyen directamente al ser absorbidos a través de la piel y por inhalación, causando efectos a corto y largo plazo, como por ejemplo aborto espontáneo, malformaciones congénitas, lesiones cerebrales, reduce la capacidad reproductiva del hombre, cáncer infantil, lesiones neurológicas, etc. Además, al ser inflamables y explosivos, conllevan un riesgo inherente por combustión y/o desprendimiento de compuestos altamente tóxicos al alcanzar altas temperaturas.

Una vez recogidos y conducidos a una instalación de tratamiento adecuada, lo habitual es que sean sometidos a tratamientos basados en su recuperación por destilación, especialmente los disolventes procedentes de limpiezas y, recuperación por rectificación o destilación fraccionada, para disolventes residuales de procesos químicos en general. En estos procesos de destilación se consiguen finalmente dos fracciones; la principal es la del disolvente regenerado, preparado para ser empleado de nuevo ya que cumple los requisitos exigidos a estos productos y, por otro lado, una fracción residual compuesta por los residuos y elementos extraños contenidos en el disolvente usado y una parte mínima de este.

Este tipo de instalaciones, convenientemente autorizadas por el órgano competente de cada Comunidad Autónoma, se encuentran repartidas por la práctica totalidad de las provincias, abarcando los focos más importantes de generación de residuos. Por ejemplo, cabe citar en Cataluña, entre otras, las empresas Derpin S.A. y Valls Química S.A., ubicadas respectivamente en Montornés del Vallés en Barcelona, y Valls en Tarragona.

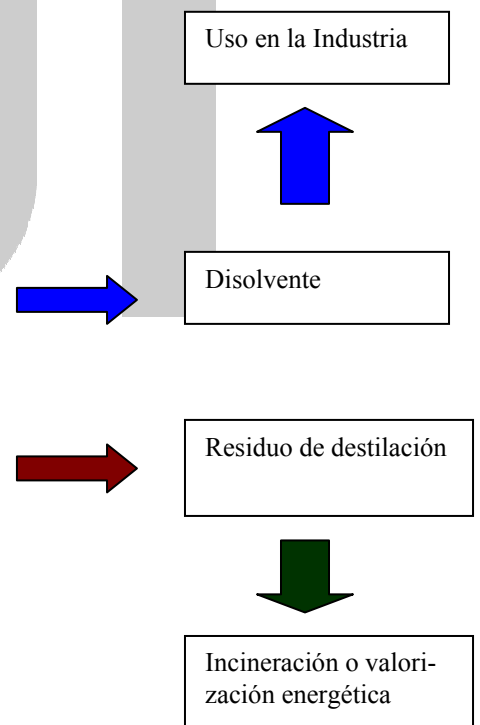
De este modo, el reciclado de disolventes se convierte en una solución viable y rentable a la generación de este tipo de residuos. El ahorro de costes se refleja en un doble sentido; por un lado, la cantidad de residuos a eliminar de forma controlada o por destrucción se reduce enormemente y, por otro, cabe la posibilidad por parte del productor de optar por emplear disolvente reciclado y reducir al mínimo la adquisición de nuevos productos en el mercado.

Sí a todo esto sumamos el menor gasto energético que implica el reciclaje frente a la fabricación (10 veces menos) es evidente que el reciclado de disolventes es una técnica muy competitiva que permite la reutilización de materias primas.

Los disolventes y residuos tratados en las instalaciones provienen de actividades como: fabricación de pinturas, lacas, esmaltes, barnices, artes gráficas, fabricación de tintes, industria farmacéutica de base, laboratorios farmacéuticos, industria química, fabricación de resinas, fabricación de automóviles, industria galvanotécnica y fabricación de colas y adhesivos.

#### Tratamientos

- **Recuperación por destilación:** Procesos de destilación simple de disolventes de limpieza, en instalaciones de fabricación de pinturas, tintes, barnices, etc.
- **Recuperación por rectificación:** Procesos de destilación fraccionada de disolventes residuales, de procesos químicos, en la industria de base de las empresas químicas y farmacéuticas.



## 9.- INTERRELACIÓN ENTRE LOS DISTINTOS PROCESOS DE TRATAMIENTO FÍSICO-QUÍMICO.-

La selección de un método de tratamiento determinado no depende sólo del tipo de residuo, sino también de sus características físicas y químicas y de las condiciones de tratamiento. Determinadas condiciones como la humedad, el contenido en sólidos pueden ser determinantes para la selección de un proceso u otro.

En una instalación centralizada los procesos de tratamiento se interconectan entre sí permitiendo una mayor eficacia y rendimiento como demuestra la figura adjunta.

