

° No degrada los compuestos orgánicos clorados de bajo peso molecular, el gas de salida debe recibir un tratamiento si tiene ozono presente.

° Esencialmente no existen oxidantes remanentes.

2.7.10 Consideraciones de diseño

Los generadores de ozono y las tuberías de salida normalmente se construyen de acero inoxidable, aún cuando algunas partes se pueden hacer de PVC si sólo se utiliza un sistema de alimentación de aire. Los dieléctricos generalmente se usan de un vidrio especial y los electrodos pueden ser de acero inoxidable o de una aleación especial de aluminio. Los sellos se deben hacer de teflón, etileno-propileno o de hule silicón. Los tanques de reacción se construyen de acero inoxidable, concreto, fibra de vidrio o PVC. Algunos materiales específicos que se deben evitar son el hule natural, PVC (tipo I), cobre, latón, bronce y acero galvanizado.

Los siguientes criterios de diseño incrementan la producción del generador de ozono

- Un gas de entrada muy seco, con un punto de rocío de -45°C .
- Baja temperatura del gas de entrada. Menor de 4°C .
- Suficiente flujo de agua de enfriamiento, 2 litros/gramo de ozono a 16°C o más baja.
- Un material con una constante dieléctrica alta y de espesor de pared mínima.
- Una relación crítica con amplio intervalo de descarga para las presiones.
- Alto voltaje y frecuencia.

2.7.11 Monitoreo y control

El equipo de monitoreo se utiliza para proporcionar información relacionada con la eficiencia y confiabilidad.

Se incluyen potenciómetros, medidores de concentración de ozono para la corriente de gas y monitores para el flujo de agua de enfriamiento, la temperatura de entrada y el punto de rocío. El equipo de control se utiliza para ajustar o suspender el sistema de ozono y así asegurar la protección de los generadores, el ambiente y de los operadores de la planta (Novak, 1989).

2.7.12 Efectos ambientales

Aire

Todos los sistemas de ozono incluyen algunos tipos de equipo de destrucción de ozono, esto para impedir que el exceso de ozono entre al ambiente. Los sistemas de aire diseñados por control de olor deben proveer de ozono suficiente para reaccionar con el

contaminante, así como también mezclas turbulentas y un tiempo de reacción adecuado. No es práctico adicionar continuamente mezclas estequiométricas de ozono provocando ozono libre y/o gas de salida con halógeno.

El equipo de control y de monitoreo se emplea para verificar la salida del gas. Las descargas excesivas de ozono al ambiente son corrosivas para los componentes eléctricos y para ciertos metales, así como es perjudicial para el follaje.

Agua y residuos

El ozono reaccionará con casi todos los materiales oxidables en un sistema acuoso. Por lo tanto, se inyecta una leve sobredosis de ozono a sistemas acuosos para provocar una cantidad residual de ozono. Si se adiciona un exceso de ozono se revierte el proceso a oxígeno en un período de tiempo relativamente corto.

2.7.13 Evaluación económica.

Es difícil obtener los costos capitales específicos debido a la naturaleza competitiva de las industrias. Los costos capitales pueden variar hasta un 50%, dependiendo de las especificaciones del generador de ozono.

Los factores principales que deben evaluarse incluyen la producción máxima de ozono a una concentración específica, la producción variable de ozono a una concentración específica, equipo auxiliar (por ejemplo, tanques de reacción), instrumentación de monitoreo y control, piezas de repuesto, costos de instalación, costos del arranque y las garantías de funcionamiento.

Los costos de operación de generación de ozono dependen primordialmente de los costos de energía eléctrica. Otros factores que afectan estos costos incluyen la demanda de energía eléctrica para secadores, ventiladores y compresores y los tipos de inyectores utilizados. El consumo de potencia está en el intervalo de 6.8 a 11.8 KW h/lb (15 a 26 KWh/g) para un sistema de alimentación de aire a 1.5% O₃ en peso incluyendo la preparación de aire y la inyección de ozono.

Se reducen los costos de energía aproximadamente un 50% con alta frecuencia (2000 KHz) y alimentación de oxígeno (Novak, 1989).

2.8 ESTABILIZACION / SOLIDIFICACION

En el manejo de residuos peligrosos, la solidificación/ estabilización es un término normalmente utilizado para designar una tecnología que emplea aditivos para reducir la movilidad de los contaminantes, haciendo así al residuo aceptable a los requerimientos actuales de disposición en el suelo (Wiles, 1989).

La solidificación y estabilización son procesos de tratamiento designados para mejorar el manejo de residuos y las características físicas, disminuir el área superficial a través de la

cual los contaminantes se pueden transferir o infiltrar, limitar la solubilidad o desintoxicar los constituyentes peligrosos (Wiles, 1989).

En la solidificación, estos resultados se obtienen primordialmente por la producción de un bloque monolítico de residuo tratado con una integridad estructural muy alta. La estabilización describe procesos que limitan la solubilidad o desintoxican el contaminante; las características físicas pueden o no mejorarse o modificarse. El término fijación se usa para proponer estabilización o solidificación. La encapsulación superficial se define como una técnica para separar el residuo con una chaqueta o membrana de material impermeable que se coloca entre el residuo y el ambiente (Malone y Jones, 1982).

Para un entendimiento más claro de la tecnología es necesario conocer los términos que se emplean. A continuación se dan algunas definiciones: (Wiles, 1989).

Solidificación: Es un proceso en que ciertos materiales se adicionan al residuo para generar un sólido. Puede o no presentar enlaces químicos entre el contaminante tóxico y el aditivo.

Estabilización: La estabilización se refiere a un proceso por el que un residuo se convierte a una forma químicamente más estable. El término comprende la solidificación y el uso de una reacción química para transformar el componente tóxico a nuevos componentes o sustancias no tóxicas. Los procesos biológicos no están considerados.

Fijación química: La fijación química denota la transformación de contaminantes tóxicos a nuevas formas no tóxicas.

El término ha sido mal empleado para describir los procesos que no involucran enlaces químicos del contaminante al aglutinante.

Encapsulación: La encapsulación es un proceso que comprende el recubrimiento total o cercamiento de una partícula tóxica o un aglomerado de residuos con una cierta sustancia (el aditivo o el aglutinante). La microencapsulación se refiere al encierro de partículas individuales. La macroencapsulación a la contención en una recubierta de una aglomeración de partículas residuales o materiales microencapsulados.

2.8.1 Clasificación de los procesos estabilización/solidificación

Los sistemas de solidificación/estabilización o fijación actuales pueden agruparse en las siguientes clases de procesos: (Poon et al. 1983).

- 1) Solidificación por medio de adición de cemento.
- 2) Solidificación por medio de adición de cal u otros materiales puzolánicos.
- 3) Fijación de residuos en materiales termoplásticos como betún, parafinas o polietileno .
- 4) Micro-encapsulación.
- 5) Macro-encapsulación de residuos en una cubierta inerte.

Los primeros dos métodos son comúnmente empleados para una gran mayoría de residuos inorgánicos. Los siguientes están reservados para residuos radioactivos o aquéllos con un alto contenido orgánico.

2.8.1.1 Procesos basados en cementación

Las técnicas basadas en cementación generalmente utilizan Cemento Portland (CP) con aditivos para mejorar las características físicas y reducir el lixiviado proveniente del residuo solidificado resultante (World Bank Technical Paper Number 93, 1989).

Los residuos peligrosos se mezclan en una suspensión con agua y polvo de cemento anhidro. El mecanismo de estabilización es la formación de productos de hidratación a partir de compuestos de silicato y agua, produciéndose un gel de silicato de calcio hidratado que va creciendo y forma la matriz de cemento compuesta de fibras de silicato entrelazadas y productos de hidratación.

Algunos compuestos pueden interferir con los procesos de solidificación (USEPA, 1981), como las sales solubles de manganeso, estaño, cobre y plomo, pueden incrementar los tiempos de fraguado y reducir de una forma considerable las fuerzas físicas. Impurezas como la materia orgánica, sedimentos y algunas arcillas pueden ocasionar un retraso considerable en el fraguado.

Las variaciones en el proceso pueden afectar o mejorar las características físicas químicas del residuo. Por ejemplo, aún cuando el agua es esencial para la hidratación y fraguado del cemento, un excedente de ella dificultará su unión. Para líquidos y suspensiones residuales, se adicionan agentes aglutinantes, generalmente cenizas finas para proporcionar una consistencia conveniente para la adición del cemento (World Bank Technical Paper Numer 93, 1989). Estos mecanismos de aglutinamiento se explican más adelante.

Un problema frecuente se presenta con los residuos ácidos, ya que siendo el cemento alcalino, limpiará la acidez libre antes de cambiar el pH a 11; por consiguiente, la adición del Cemento Portland a dichos residuos es inútil debiéndose agregar cal o cenizas finas para espesar su residuo e incrementar su pH superior a 7. Se requiere generalmente un mínimo aproximado del 10% de cemento sobre una base peso/peso para producir la fuerza mecánica necesaria.

Los minerales arcillosos, como la bentonita con su capacidad de intercambio catiónico y gran superficie específica, reaccionará con compuestos orgánicos; por esta razón se han utilizado para aumentar la extensión de residuos apropiados para la fijación de residuos inorgánicos que contienen más del 5% de compuestos orgánicos (World Bank Technical Paper, 1989).

El agente de sedimentado, generalmente el Cemento Portland reforzará la acción de gelatizado de la arcilla produciendo así un material físicamente estable que tiene la habilidad de atrapar y unir los residuos contenidos. El material residual se transforma entonces en un sólido física y químicamente estable simulando un suelo que pretende ser substancialmente insoluble en agua (World Bank Technical Paper, 1989).

2.8.1.2 Procesos basados en cal

La cal y los materiales puzolánicos en combinación producen matrices cementosas que atrapan al residuo física y químicamente.

Las puzolanas se definen como materiales que no producen cementación por sí mismos, contienen constituyentes que en combinación con cal a temperatura normal y en presencia de agua forman compuestos insolubles estables (Lea, 1970).

Pueden utilizarse materiales naturales, incluyendo el polvo volcánico y las cenizas y las puzolanas artificiales como las arcillas quemadas, la lutita, mortero quemado y la ceniza fina (FA). Los materiales puzolánicos más empleados en los procesos de fijación química son las cenizas finas (fly ash) y el polvo del horno de cemento (Pojasek, 1979).

2.8.2 Caracterización de las tecnologías S/E

La tecnología de solidificación/estabilización puede caracterizarse por el aglutinante empleado, por el mecanismo de aglutinamiento o por el tipo de proceso (Wiles, 1989).

2.8.2.1 Aglutinantes

Los sistemas aglutinantes pueden colocarse en dos categorías generales: Inorgánicos y orgánicos. La mayoría de los sistemas aglutinantes inorgánicos en uso incluyen varias combinaciones de cementos hidráulicos, cal, materiales puzolánicos, sulfato de calcio (yeso) y silicatos. Los aglutinantes orgánicos más usados son: epoxy, poliésteres, asfalto, poliolefinas (principalmente polietileno y polietileno-polibutadieno) y urea-formaldehído. Se han utilizado combinaciones de sistemas orgánicos e inorgánicos; por ejemplo, tierras diatomáceas con cemento y poliestireno, poliuretano y cemento, geles poliméricos con silicato y cemento de cal (Telles y Lubowitz, 1984).

2.8.2.2 Mecanismos de aglutinamiento de los contaminantes.

Los sistemas de solidificación/estabilización pueden clasificarse o identificarse por los mecanismos que envuelven los residuos o el tipo de reacción. Estos son: (Cullinane y Jones, 1986).

Sorción: La sorción involucra la adición de un sólido para separar un líquido en un residuo. Algunos ejemplos son: carbón activado, silicato de sodio anhidro, sulfato de calcio, arcilla y materiales similares. La mayoría de los procesos de sorción, remueven solamente el líquido sobre la superficie del sólido (similar a la absorción de agua en una esponja) y no reduce el potencial de lixiviado del contaminante. La sorción se ha usado para remover los líquidos del residuo para satisfacer los requerimientos de no-líquidos en un relleno sanitario. Sin embargo, por las estipulaciones de las Enmiendas de los Residuos Sólidos y Peligrosos de Estados Unidos de Norteamérica (HSWA), el uso de sorbentes que sólo absorben los

líquidos no estará permitido por mucho tiempo, aún cuando algunos solventes seleccionados pueden utilizarse para mejorar el funcionamiento de los procesos de solidificación y estabilización.

Reacciones puzolánicas: Este proceso utiliza una ceniza de sílica muy fina, no cristalina y el calcio en cal para producir una cementación de baja resistencia. El principal mecanismo de contención es la trampa física del contaminante en la unión de la matriz concreto-material puzolánico. El agua se remueve en la hidratación del concreto cal-material puzolánico. Algunas características de los procesos de ceniza fina puzolánica-cal son:

- Se requiere que el residuo se mezcle con ceniza muy fina reactiva (u otro material puzolánico) hasta tener una consistencia pastosa. También se necesita agua libre para las reacciones.

- La cal se adiciona a la mezcla residuo-ceniza. Generalmente se requiere de 20 a 30% de cal para obtener una resistencia aceptable, pero ésta varía con el tipo de ceniza utilizada.

- La unión depende de la formación de silicato de calcio y de los hidratos de aluminato.

- Una interpretación de las reacciones puzolánicas principales se deben a la formación de nuevos compuestos hidratados, llamados silicatos tricálcicos hidratados como en la hidratación del cemento (World Bank Technical Paper no. 93).

- El sistema es altamente alcalino. Con ciertos residuos puede causar liberación de gas o lixiviados indeseables.

- Un exceso de agua es tan indeseable como en los procesos basados en cemento (World Bank Technical Paper, 1989).

- Materiales como el borato de sodio, carbohidratos y dicromato de potasio pueden interferir químicamente con las reacciones de enlace. Los aceites y las grasas pueden interferir físicamente para reducir el contenido de contaminante.

- Sin aditivos especiales o pretratamiento de residuos, los residuos peligrosos tratados con la mezcla cal-ceniza probablemente se clasifiquen nuevamente como peligrosos de acuerdo al procedimiento para caracterizar a un lixiviado por su toxicidad (TCLP) de la USEPA.

- El sistema es relativamente económico.

- Los compuestos de unión de ceniza-cal y residuo probablemente no sean tan durables o no sea un control de lixiviado contaminante como lo son los compuestos de cemento Portland.

Reacciones material puzolánico-cemento Portland: En estos procesos el cemento portland se combina con ceniza muy fina o con otros materiales puzolánicos para producir

una matriz de concreto y residuo de relativa alta resistencia. Como primer paso, el contenido residual se lleva a una trampa de partículas residuales. Se pueden adicionar silicatos solubles para auxiliar el proceso y ayudar a la retención de metales a través de la formación de geles de silicato. El agua se remueve en la hidratación del cemento Portland. Como variaciones de esta tecnología se pueden utilizar yeso o cemento aluminoso con o sin cemento Portland. Algunas características de este proceso son:

1.- Los productos puzolánicos adicionados al cemento Portland reaccionan con hidróxido de calcio libre para aumentar la resistencia química de los productos solidificados.

2.- Existen varios tipos de cemento Portland que se pueden seleccionar para una reacción específica. El cemento Portland tipo I ha sido el más utilizado.

3.- Se han adicionado una gran variedad de materiales (por ejemplo, silicato soluble, geles de sílica hidratadas y arcillas) para incrementar o cambiar el funcionamiento deseado. En algunos casos, se requiere el uso de sorbentes selectivos para así poder ayudar a que el contaminante quede atrapado en la matriz sólida. Muchos de los aditivos se consideran patentes del vendedor. Sin embargo, algunos de los aditivos más comunes y sus funciones se describen a continuación.

a) Silicatos solubles, como el silicato de sodio o el silicato de potasio. Estos agentes generalmente se colocan instantáneamente al cemento Portland, lo que produce un concreto de baja resistencia. Este tipo de materiales ayudan para la reducción de interferencia proveniente de los iones metálicos contenidos en la solución residual.

b) Arcillas seleccionadas especialmente para absorber líquido y enlazar aniones o cationes específicos.

c) Emulsificantes y surfactantes que permiten la incorporación de líquidos orgánicos inmiscibles.

d) Adsorbentes patentados que enlazan residuos específicos selectivamente. Este tipo de materiales incluyen carbón, silicatos, materiales zeolíticos, así como sorbentes celulósicos; estos tienen constituyentes tóxicos y se encapsulan con el residuo.

e) Cal (CaO), se puede emplear para aumentar el pH y la temperatura de reacción y para mejorar las características de fijación

4.- Los procesos basados en el cemento son más versátiles que los procesos con ceniza-cal, se pueden formular para una resistencia excepcional y además retiene efectivamente contaminantes específicos.

5.- Ciertos componentes residuales pueden interferir con la fijación y estabilidad de los procesos que se basan en cemento. Estos materiales abarcan los boratos, sulfato de calcio, fenol, aceites y grasas. Los ácidos pueden reaccionar con el concreto y destruir la matriz después de su fijación, lo cual induce la liberación de contaminantes al ambiente.

Microencapsulación termoplástica. Los materiales termoplásticos son plásticos orgánicos capaces de ablandarse y endurecerse reversiblemente bajo calentamiento y enfriamiento. Estos materiales son polímeros orgánicos lineales con algunas uniones cruzadas o son solubles en solventes orgánicos. Los materiales termoplásticos incluyen asfalto, betún, polietileno polipropileno y nylon. Los materiales más utilizados son el asfalto y el betún. Este proceso mezcla residuos particulares con asfalto fundido o materiales similares. La trampa física es el mecanismo de contención principal para líquidos y sólidos. A continuación se describe este proceso: (Wiles, 1989).

El residuo se seca y se mezcla con un material plástico caliente, como asfalto, polietileno o cera.

El proceso es efectivo para algunos materiales solubles y tóxicos que no se tratan fácilmente con otros procesos.

La compatibilidad del residuo con el enlazante plástico es más importante que en otros procesos debido a que algunas mezclas de reductores y oxidantes son potencialmente reactivos a altas temperaturas. Por ejemplo, las grasas pueden suavizar el asfalto, el xileno y el tolueno se dispersan en él. Los procesos termoplásticos son sensibles a altas concentraciones de sal.

El residuo puede requerir de un pretratamiento más amplio para algunos procesos termoplásticos que para los procesos combinados cementación-material puzolánico. Sin embargo, la contención del contaminante puede mejorarse para algún residuo compatible específico.

El proceso es más complicado (es decir, requiere de altas temperaturas, equipo especializado) que para los materiales puzolánicos y las mezclas cemento Portland-material puzolánico y por lo tanto más caros.

Macroencapsulación. Este proceso separa un gran volumen de residuos con una cubierta de cualquier material aceptable. Se están realizando estudios sobre procesos de macroencapsulación más sofisticados y más efectivos que emplean polietileno y resinas similares.

Aún cuando la macroencapsulación no ha sido ampliamente utilizada, excepto para el empaque, se considera para dar una idea de su potencial de ayuda para eliminar los problemas de retención de contaminantes que pueden ocurrir con otros procesos. La aproximación involucra el uso de un proceso generalmente aplicable de estabilización/solidificación (por ejemplo, material puzolánico, ceniza-cal, y mezcla de cemento-material puzolánico) para microencapsular el contaminante, para compensar la separación del contaminante incompleto y éste continúa con una macroencapsulación de la matriz que contiene al contaminante.

Se pueden emplear tres métodos para la macroencapsulación por el proceso de fusión de resina (Lubowitz y Wiles, 1981): (1) microencapsulación de residuos particulares con polibutadieno y su subsecuente macroencapsulación de la matriz con el polietileno de alta densidad, (2) el uso de agentes cementosos de bajo costo para formar un bloque de residuo

DOCUMENTO ORIGINAL INCOMPLETO

2.8.4 Aplicaciones del proceso

Estos procesos se han aplicado a una gran variedad de residuos incluyendo residuos de acabado de metal, galvanoplastia, desechos de minas, lodos de efluentes de tratamientos; lodos, sedimentos y suelos ácidos o que contienen metales pesados; cenizas de incineración, lodos de la producción de alimentos y residuos de las emisiones de gas, suelos contaminados con residuos radioactivos, residuos que contienen compuestos orgánicos y en el tratamiento de suelos contaminados con policloruros de bifenilo. Los procesos de cementación son más propicios para residuos inorgánicos, especialmente aquellos que contienen cationes. Los residuos orgánicos y los residuos inorgánicos aniónicos son más apropiados para los procesos de encapsulación orgánica (World Bank Technical Paper, 1989).

2.8.5 Tipos de proceso.

Existen varios esquemas de procesos de solidificación/ estabilización, algunos de ellos son: (Wiles, 1989).

- Procesos en tambor: En este proceso, los aglutinantes se adicionan al residuo contenido en un tambor o en otro contenedor. Después del mezclado y la fijación, la matriz aglutinante-residuo se dispone normalmente en el tambor.
- Procesos en planta: El proceso en planta se refiere a una planta y/o un proceso específicamente diseñado para la solidificación y estabilización de un material residual de gran volumen. El proceso puede conducirse en el interior de una planta para manejar el residuo en una operación industrial interna o se puede hacer el diseño específico de una planta y se puede operar para solidificar y estabilizar residuos de fuentes externas.
- Procesos en planta móvil: El proceso en una planta móvil se refiere al proceso de solidificación/estabilización y al equipo que sea móvil o se pueda transportar de un sitio a otro fácilmente.
- Procesos in situ: La adición directa de aglutinantes a una laguna o la inyección de materiales solidificantes o estabilizantes a la subsuperficie del suelo para provocar la solidificación y estabilización del lodo contaminado y/o el suelo se somete a un proceso in situ. Este tipo de proceso se puede aplicar a la recuperación de suelos contaminados.

2.8.6 Evaluación del funcionamiento de la tecnología estabilización/ solidificación

La mayoría de los procesos utilizados para probar las propiedades físicas del residuo solidificado involucran pruebas normales para concreto, como son pruebas de tensión compresiva confinada y no confinada, de humedad y secado, pruebas de durabilidad de congelado y deshielado y procedimientos similares que permiten determinar la integridad y durabilidad estructural. Estos procedimientos parecen ser aplicables a las pruebas de productos residuales solidificados; sin embargo, el reglamento de producto-funcionamiento

y el criterio de aceptación para propiedades físicas aún no se ha establecido. Por lo tanto, es difícil predecir un producto de resultados de prueba aunque son posibles las comparaciones entre los diferentes procesos y los distintos aglutinantes.

2.8.7 Factores que afectan la selección y el funcionamiento de las tecnologías de estabilización/solidificación

Los factores que afectan la selección, diseño, implementación y funcionamiento de los procesos de solidificación/estabilización son: (Pojasek, 1979).

- Objetivos del tratamiento
- Características del residuo (químicas y físicas)
- Tipo y requerimientos del proceso
- Requerimientos del manejo de residuos de estabilización/solidificación
- Requerimientos de reglamentación
- Economía

Estos y otros factores específicos del sitio (por ejemplo, las condiciones de la localidad, clima, hidrología, etc.) se deben considerar cuidadosamente para asegurar un funcionamiento aceptable.

2.8.7.1 Objetivos del tratamiento.

En la evaluación y selección de las técnicas de estabilización/ solidificación, se deben considerar el objetivo del tratamiento del residuo y el criterio usado para evaluar el funcionamiento del proceso. Esta tecnología de tratamiento de residuos peligrosos tiene tres niveles.

El nivel I tiene como objetivo separar los líquidos libres del residuo y por lo tanto se puedan disponer en rellenos sanitarios. Se requiere más de la solidificación que de la sorción. Por consiguiente, si la solidificación no es aparente, el producto se puede sujetar a un examen de compresión como prueba de que la solidificación se realizó.

Para el tratamiento del nivel II, el objetivo es convertir al residuo en aceptable para su disposición en la tierra. Esto quiere decir que el residuo no contiene líquidos libres. Por lo que el objetivo del tratamiento es separar estos líquidos libres y el criterio de aceptación es el mismo del nivel I.

En el nivel III, el objetivo es tratar al residuo para que se pueda clasificar como "no peligroso" y así hacer aceptable su disposición en las instalaciones de residuos no-peligrosos.

2.8.7.2 Características del residuo

Las características del residuo se encuentran entre los factores más importantes que afectan la solidificación y estabilización de residuos. Generalmente el residuo debe ser compatible y se debe basar solamente en la característica de toxicidad por su peligrosidad. Pequeñas cantidades de algunos compuestos pueden reducir seriamente las características

de resistencia y de contención de las mezclas residuo-aglutinante. Las impurezas pueden afectar la resistencia, durabilidad y permeabilidad del cemento Portland y de las mezclas de asfalto (Jones y Bricka, 1985).

Debido a que el cemento tiene un papel importante en las tecnologías de estabilización/solidificación pueden esperarse los mismos efectos. Aún cantidades muy pequeñas de algunos compuestos residuales actúan como aceleradores o retardadores y pueden causar un bajo rendimiento en los productos de estabilización/solidificación (World Bank Technical Paper No. 93, 1989).

Algunos compuestos orgánicos afectan las fuerzas de compresión y las características del lixiviado de las formulaciones de la tecnología de estabilización/solidificación con cal-ceniza. El ácido adípico afecta adversamente las fuerzas compresivas. El metanol, xileno y benceno actúan como retardadores, pero en menor grado. Estos compuestos incrementan las concentraciones de constituyentes tóxicos en el lixiviado de muestras solidificadas y estabilizadas (Wiles, 1989).

Ya que se ha concluido que existe una importante correlación entre los efectos de compuestos orgánicos en los sistemas puzolánicos cal-ceniza y en la hidratación del cemento Portland, la información concerniente a aditivos y a las interferencias en el uso del cemento Portland debe aplicarse a los sistemas de estabilización/solidificación que emplean reacciones puzolánicas. Aún así, algunos residuos orgánicos e inorgánicos contaminados con compuestos orgánicos son probablemente aceptables para la solidificación y estabilización empleando materiales puzolánicos. Se han tratado residuos como los lodos de talleres de laminado, electrogalvanizado o lodos aceitosos provenientes de refinerías de petróleo. Sin embargo, se puede esperar que los residuos orgánicos con los grupos funcionales hidroxilo o ácido carboxílico como los residuos biológicos, lodos de pinturas y algunos solventes, inhiban parcial o totalmente las reacciones basadas en cemento Portland o en materiales puzolánicos responsables de la solidificación (Wiles, 1989).

La tabla (2.8.1) lista compuestos químicos seleccionados que ejercen efectos adversos en los procesos que aplican cemento Portland o con materiales puzolánicos. Adicionalmente a los efectos químicos, la temperatura y las condiciones de humedad durante el mezclado son importantes. Temperaturas inferiores a 0°C causan un retardo en la fijación, mientras aquellas superiores a 30°C la aceleran. Temperaturas superiores a 66°C destruyen completamente la reacción. Una humedad alta, puede también acelerar la fijación. Una mezcla extensiva, especialmente después de la formación de la fase gelatinosa puede destruir los sólidos y provocar un producto de muy baja resistencia (Wiles, 1989).

Generalmente, los compuestos inorgánicos se solidifican y estabilizan más fácilmente que los compuestos orgánicos (Ver tabla 2.8.2). Además es más fácil dar un pretratamiento a la corriente residual para mejorar los compuestos inorgánicos duros de manejar. Tal parece que los compuestos orgánicos no presentan las reacciones químicas que formen compuestos orgánicos-inorgánicos o complejos que puedan enlazar químicamente los contaminantes orgánicos, así que éstos se retienen en las trampas físicas; en algunos casos pueden estar presentes en la fase gelatinosa del cemento (Walsh et. al., 1986).

Las características físicas del residuo son también muy importantes. El tamaño y la forma de la partícula en el residuo y la dureza del aglutinante desempeñan un papel

importante en el funcionamiento de los procesos de tratamiento. La viscosidad de las mezclas puede cambiar con el tamaño y la forma de la partícula y afectar el agua disponible para las reacciones. Para las mezclas producidas que originan la resistencia aceptable es importante una relación agua/aglutinante adecuada. Un sobremezclado o un submezclado puede afectar adversamente la resistencia del producto final o también obstruir la fijación inicial.

Un retardo en la fijación (fraguado) puede o no ser perjudicial. Si el fraguado se retarda al punto que la resistencia es inaceptable o la contensión del contaminante se extiende, resultará un producto de menor calidad que no funcionará satisfactoriamente. Sin embargo, si el retardo en el fraguado es muy pequeño, entonces no representa un problema importante. En esta situación, la economía y el programa del proceso se convierten en los factores determinantes.

2.8.7.3 Tipos y requerimientos del proceso

El tipo de proceso de S/E requerido (por ejemplo, en tambor, en planta, etc.) y las condiciones específicas del proceso (como pueden ser: modificaciones del residuo, tipos de mezclado, transportación, colocación y almacenamiento de los residuos tratados) son factores importantes que deben considerarse en la evaluación y selección de la tecnología de solidificación/estabilización. Es más fácil controlar y proporcionar una mezcla conveniente del aglutinante con la matriz del residuo en un tambor o proceso de planta que cuando se solidifica un pozo, remanzo o una laguna. También afectan la evaluación y selección de la tecnología los requerimientos del proceso especiales como el tratamiento para remover los agentes de interferencia, el uso de aglutinantes de fraguado térmico y de macroencapsulación.

El manejo del producto tratado (por ejemplo, su disposición en un relleno sanitario, almacenamiento, transporte etc.) es también importante en la selección de la tecnología de solidificación/estabilización (Dependiendo de los requerimientos de la reglamentación). Esto requiere que el material no sea peligroso. Asimismo, otros esquemas utilizados, como su colocación en tambores (plástico o metal) para el almacenamiento en bodegas o en minas subterráneas, inyección in situ en minas deben tomarse en cuenta.

2.8.8 Economía

El costo de solidificación y estabilización se considera bajo comparado con otras técnicas de tratamiento. Esto se debe a que la materia prima para este proceso es muy económica (por ejemplo, ceniza muy fina, cementos y cal); en la mayoría de estos procesos, los requerimientos son muy sencillos y el uso, así como el equipo que es fácilmente disponible en industrias de concreto y otras industrias de construcción. Los objetivos iniciales de este tratamiento se enfocaron a la necesidad de producir un residuo más manejable, en vez de tener un producto que cumpla los requerimientos de reglamentación más estrictos (Wiles, 1989).

No es posible dar costos exactos para solidificación y estabilización. Los costos finales dependerán de las condiciones específicas del sitio. Factores importantes que intervienen en los costos son los siguientes:

- Características del residuo. Las formas físicas y químicas características del residuo que se somete al tratamiento de estabilización/solidificación. Si se requiere pretratamiento para remover y/o alterar constituyentes de interferencia, los costos se incrementarán.
- Transporte. Los requerimientos de transporte de materias primas a plantas o sitios y el transporte de productos finales para su disposición afectarán también a los costos.
- Otros factores. Los requerimientos especiales de salud y seguridad, así como cualquier reglamentación especial. El aseguramiento de calidad y el control de calidad (QA/QC) y los costos analíticos asociados deben tomarse en cuenta para estimar los costos.

2.8.9 Conclusiones

El papel que tiene la tecnología de estabilización/solidificación en el manejo de residuos peligrosos depende en gran forma de las acciones reglamentarias, en su subsecuente interpretación legal y en la capacidad de la tecnología para cumplir con los criterios de funcionamiento que puedan desarrollarse posteriormente.

Debido a que las restricciones de rellenos sanitarios son más estrictas y se rechazan los residuos para su disposición en la tierra, esta tecnología puede ser una alternativa muy importante en orden de tratar al residuo y convertirlo en aceptable para este tipo de disposición. Una baja permeabilidad, menor cantidad de lixiviado y características similares, hacen a un residuo peligroso aceptable para su disposición en la tierra después de su estabilización.

2.9 INTERCAMBIO IONICO

2.9.1 Generalidades

El intercambio iónico (II) es un intercambio de iones reversible entre las fases líquida y sólida. Los iones sostenidos por fuerzas electrostáticas en grupos funcionales cargados en la superficie de un sólido insoluble se reemplazan por iones de carga similar en una solución. El intercambio iónico es estequiométrico, reversible y selectivo en la remoción de especies iónicas disueltas. Los materiales de intercambio iónico deben tener sitios ión-activos en toda su estructura, alto rendimiento, selectividad por las especies iónicas, capacidad de regeneración, estabilidad física y química y baja solubilidad (Wentz, 1989).

El intercambio iónico es muy útil en el tratamiento de los residuos peligrosos. Algunas aplicaciones comunes son, la desalación, la separación de amonio y el tratamiento de aguas residuales con metales pesados, donde por medio del proceso de intercambio iónico, los

iones de metales pesados se concentran en el regenerado gastado. El ablandamiento de agua por intercambio de iones sodio por calcio y magnesio es comúnmente practicado en el tratamiento de agua.

Los primeros intercambiadores iónicos fueron los aluminosilicatos de sodio inorgánicos llamados zeolitas. Estos materiales tienen estructuras relativamente abiertas con canales y cavidades interconectadas disponibles para movimiento iónico. La red tiene una carga eléctrica negativa balanceada por cationes que pueden reemplazarse por otros. Algunos aluminosilicatos también intercambian aniones.

Los intercambiadores iónicos sintéticos imparten mejores características dentro de las resinas que aquéllos ofrecidos por las zeolitas.

Las resinas orgánicas de intercambio iónico son las resinas sintéticas más importantes; generalmente, éstas son geles con una matriz de cadenas de hidrocarburos que tienen grupos iónicos capaces de intercambiarse. Las uniones cruzadas se llevan a cabo con enlaces carbón-carbón dando a la resina una buena estabilidad química, térmica y mecánica. La selectividad del ión puede controlarse con los grupos iónicos estables y fijos a la matriz. Las resinas sintéticas tienen capacidad de intercambio catiónico y aniónico. Las resinas orgánicas catiónicas tienen una alta capacidad de intercambio iónico y contienen grupos reactivos como sulfónicos, fenólicos y carboxílicos que pueden cargarse con cationes intercambiables. Las resinas de intercambio aniónicas tienen grupos ionizables como amonio cuaternario o grupos amino que pueden cargarse con aniones intercambiables.

La mayoría de los intercambiadores iónicos son polímeros sintéticos insolubles en agua. El intercambio iónico tiene una capacidad de intercambio limitada para almacenamiento de iones y eventualmente se satura. Entonces se lavan con una solución regeneradora, para reemplazar los iones indeseables acumulados y así el material intercambiable vuelve a tener una condición utilizable. Esta operación es un proceso cíclico, que involucra el intercambio iónico en servicio, lavado a contracorriente, regeneración y enjuague. Gran parte de las unidades de intercambio iónico contienen un lecho de resinas de intercambio iónico que se operan a flujo descendente. La unidad está en servicio para un predeterminado nivel de derrame, primero se lava con un flujo ascendente y entonces se regenera por una solución química de flujo descendente. El lecho resinoso se enjuaga con flujo descendente.

La solución alimentada a la columna de intercambiadores iónicos y la región de intercambio se moverá a través de la columna hasta agotamiento del lecho. Posteriormente, la columna se lava con agua a contracorriente para quitar los sólidos retenidos.

Durante el período de regeneración, la solución regeneradora fluye a través del lecho, desplazando iones indeseables y restaurando la resina a su condición original. Una corriente residual se generará durante esta fase y requerirá de disposición. En la operación de enjuagado el agua desplaza el remanente gastado en el lecho. Este efluente de agua se descarta mientras haya contaminación del regenerante.

Una consideración importante en la selección de cualquier proceso de intercambio iónico es el residuo creado por la regeneración del lecho de intercambio iónico. El residuo puede reutilizarse o puede presentar un problema de disposición, como el ácido gastado en

la regeneración de un intercambiador catiónico. Para un tratamiento apropiado de estos residuos, se debe determinar el flujo residual del paso de regeneración y la concentración de contaminantes.

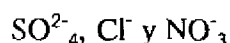
La solución cáustica gastada en la regeneración de un intercambiador aniónico fuerte se puede utilizar para regenerar el intercambiador aniónico básico débil. Si los regenerantes gastados no pueden reutilizarse, deben tratarse para producir un efluente que no trastorne el sistema de tratamiento residual.

Para determinar el rendimiento de una resina intercambiadora con un ión particular en solución, se deben realizar pruebas de sorción.

Los intercambiadores iónicos típicos tienen de 2 a 8 pies de profundidad de lecho y operan de 2 a 6 gal/(min)(pie). La relación de altura-diámetro es aproximadamente 2 a 1, la altura debe ser suficiente para permitir una expansión del lecho durante el lavado a contracorriente, ya que las zeolitas se expanden aproximadamente 25% y los polímeros pueden duplicar en profundidad. La capacidad de intercambio se expresa generalmente como miliequivalentes por mililitro (meq/ml) (Wentz, 1989).

2.9.2 Tipos de intercambiadores

Existen intercambiadores con sitios cargados negativamente, llamados intercambiadores catiónicos debido a que admiten iones cargados positivamente. Los intercambiadores aniónicos tienen sitios cargados positivamente y atraen iones negativos. Las resinas de intercambio catiónico que tienen sitios reactivos de ácidos fuertes, como los grupos sulfónicos (SO_3H), remueven cationes fácilmente. Las resinas de intercambio catiónico de ácidos débiles que tienen grupos carboxílicos (COOH) remueven cationes como Ca^{2+} y Mg^{2+} pero tienen una capacidad limitada para remover Na^+ y K^+ . Las resinas de intercambio aniónico de base fuerte que poseen grupos amonio remueven fácilmente todos los aniones. Las resinas de intercambio aniónico de base débil con grupos amino, remueven principalmente ácidos minerales fuertes como:



Las resinas de intercambio iónico tienen un número finito de sitios de intercambio. Una ecuación generalizada para el intercambio de cationes es la siguiente:



donde C_1^+ y C_2^+ son cationes y X es la resina intercambiadora.

La constante de equilibrio se representa como:

$$K = \frac{(\text{XC}_1)(\text{C}_2^+)}{(\text{XC}_2)(\text{C}_1^+)} = \left(\frac{\text{C}_1}{\text{C}_2} \right)_{\text{resina}} \left(\frac{\text{C}_2}{\text{C}_1} \right)_{\text{solución}}$$

donde:

K = constante de equilibrio

$\left(\frac{C_1}{C_2}\right)_{resina}$ = concentración de equilibrio de la resina

$\left(\frac{C_2}{C_1}\right)_{resina}$ = concentración de equilibrio de la solución

K representa la preferencia relativa de la resina para atraer y retener cationes C^+_1 en comparación con los cationes C^+_2 .

La constante de equilibrio es directamente proporcional a la preferencia del ion por el intercambiador. Las resinas de intercambio catiónico generalmente prefieren cationes de altas valencias que reaccionan fuertemente con los sitios de intercambio de las resinas y son menos propensos para formar complejos. Para resinas fuertes, la clasificación de selectividad preferente para cationes comunes son:

- | | |
|--------------|---------------|
| 1) Ba^{2+} | 9) Zn^{2+} |
| 2) Pb^{2+} | 10) Mg^{2+} |
| 3) Sr^{2+} | 11) Ag^+ |
| 4) Ca^{2+} | 12) Cs^+ |
| 5) Ni^{2+} | 13) K^+ |
| 6) Cd^{2+} | 14) NH_4^+ |
| 7) Cu^{2+} | 15) Na^+ |
| 8) Co^{2+} | 16) H^+ |

Por ejemplo, la selectividad de intercambio de cationes indica que el Pb^{2+} tiene preferencia sobre el Mg^{2+} .

Los intercambiadores aniónicos son polímeros que incluyen intercambiadores de base débil y base fuerte. El grupo funcional es una amina. Los intercambiadores de base débil contienen un grupo amino secundario o terciario que puede absorber ácidos fuertes; los intercambiadores de bases fuertes contienen una amina cuaternaria. Estos únicamente pueden remover ácidos minerales fuertes, como el HCl , H_2SO_4 , HNO_3 y tienen una capacidad de intercambio mínima para ácidos débiles. Los intercambiadores de base fuerte remueven la alcalinidad del agua por substitución de iones cloro

Para resinas de base fuerte, la clasificación preferente de selectividad para aniones comunes es:

SO_4^-
 I^-
 NO_3^-
 CrO_4^{2-}
 Br^-



Por ejemplo, la selectividad de intercambio aniónico indica que el SO_4^{2-} tiene preferencia sobre el Cl^- (Wentz, 1989).

2.9.3 Aplicaciones

En operaciones de galvanizado de metales, se utilizan resinas de intercambio aniónico para recuperar ácido crómico de aguas de enjuague, también para intercambiar cianuro y complejos de cianuro metálico.

Comercialmente, se han demostrado los procesos de recuperación de compuestos químicos provenientes de los baños de electrogalvanizado ácido-cobre, ácido-zinc, níquel, estaño, cobalto y cromo. El proceso también se utiliza para purificar soluciones del galvanizado y así, dar un período de vida más largo (Higgins, 1989).

2.9.4 Equipo

Un sistema de intercambio iónico, generalmente consiste de un tanque de almacenamiento de agua residual, prefiltros, recipientes de intercambio aniónico o catiónico y equipo de regeneración ácido-básico (Higgins, 1989).

2.9.5 Economía

En un estudio, la USEPA en 1979 estimó que el sistema de II operando 5000 h/año costaría \$31 000 dls estadounidenses en gastos de instalación y \$6 000 dls en gastos de operación, con un período de recuperación de 5.2 años (Higgins, 1989).