

**Proyecto Desarrollo Institucional
para la Gestión de Sitios Contaminados
PN: 99.21.34.3**

Inmovilización de residuos peligrosos

Dipl. Ing. Ulises Ruíz Saucedo

Mexico, D.F. Noviembre 2004

Inmovilización de residuos peligrosos

Objetivo de esta medida es la disminución de la movilidad o la disminución del potencial de movilidad de materiales contaminantes o residuos peligrosos y con ello el evitar que dichos contaminantes sean emitidos al medioambiente.

El concepto de inmovilización se refiere a las medidas que inhiben la movilidad de contaminantes en el sitio mismo de depósito del contaminante. Para inmovilizar a los contaminantes se utiliza usualmente materiales auxiliares como lo son: pegamentos, endurecedores, activadores, cementos, cal o yeso con adición de agua. Para alcanzar los objetivos de la inmovilización son utilizados los siguientes procesos físico-químicos:

1. Unión química como consecuencia de reacciones químicas.
2. Unión física por incrustación de los contaminantes en una matrix durable y resistente.
3. Disminución de la solubilidad del contaminante a través de la adición de materiales auxiliares que aumentan la absorción.

Con la inmovilización se persiguen los siguientes fines y efectos a largo plazo:

1. Disminución de la capacidad de lixiviación o de la capacidad de solubilidad a través de una transformación química o incrustación física.
2. Disminución de la superficie específica por ejemplo a través de la formación de conglomerados.
3. Disminución de la capacidad de formación de polvos a través de un aumento de la dureza.
4. Disminución de la permeabilidad del agua a través de una reducción de la porosidad por compactación o aumento de la densidad.
5. Aumento de la resistencia mecánica a la presión y de la capacidad de almacenamiento y de la capacidad mecánica de soporte.
6. Transformación de materiales de un estado fluido a un estado sólido.
7. Después de un tratamiento debe de yacer el material contaminado inmovilizado en forma sólida

Los materiales auxiliares para inmovilización (inmovilizantes) están constituidos básicamente por pegamentos o materiales con la propiedad de unir química o físicamente al contaminante.

Dichos materiales reactivos (orgánicos o inorgánicos) reaccionan con los materiales contaminados formando polímeros, los cuales forman redes y aglomerados sólidos, los cuales rodean por completo a los materiales contaminantes.

Estos materiales inmovilizantes constituyen durante la aplicación una matriz, la cual encierra y retiene los contaminantes dentro de la red de polimerización y aumenta la dureza del material. De acuerdo con el estado del material contaminado y su estructura química estos cambios pueden repercutir también en una disminución de la toxicidad.

Las reacciones que son provocadas por la combinación del material contaminante y del inmovilizante son dependientes de la constitución de ambos materiales y por ello las fuerzas de unión químicas o físicas, que inmovilizan, pueden variar dentro del material. Por ello es de tomarse en consideración que el proceso de inmovilización puede ser por ello reversible en cierta medida.

Es de ponerse atención que cambios bruscos del medioambiente en el cual se almacenan o depositan los materiales inmovilizados pueden conducir a que los efectos inmovilizantes se reduzcan, sin que la estructura del material endurecido sea cambiada. En las siguientes tablas se describen los distintos materiales utilizados en la inmovilización, así como su adecuación a los distintos casos de contaminación.

Tabla 1 Principios y procesos de inmovilización (Rat SVUF, 1998)

Principio del proceso	A través de o por medio de:	Medida se aplica a el caso:	Objetivo	Sitio de aplicación	Ejemplo
Endurecimiento	Mezclado del material contaminado con un Pegamento o Inmovilizador, lo cual conduce a una incrustación física en la matrix del pegamento. Reacción química con un inmovilizador e incrustación física en la matriz de inmovilizante	Cuerpos de basura, o residuos Lodos Suelos contaminados	Reducción de la capacidad de lixiviación de los materiales contaminantes	In-situ	Inyección de cemento, suspensiones de bentonita, soluciones poliméricas en los espacios huecos del cuerpo de materiales
				On-site o Ex situ	Endurecimiento de lodos o suelos por medio de inyección de agentes reactivos
Estabilización	Adición y mezcla de reactantes Reacciones químicas como por ejemplo precipitación, oxidación reducción o cambio del pH	Suelos contaminados Cuerpos de residuos	Disminución de la solubilidad	In-situ	Precipitación por medio de inyección de reactivo en el suelo
				On-site o Ex situ	Precipitación del Hidróxido o del Sulfido
Encapsulamiento	Cubrimiento con un estrato o sistema de cubrimiento del sitio completo o de los aglomerados y partículas	Residuos Suelos contaminados Escombros	Reducción de la capacidad de lixiviación de los materiales contaminantes	On-site o Ex situ	Recubrimiento de escombros con Polietileno fluido
					Recubrimiento de partículas finas dispersas (por ejemplo aceites con PCB) con cal o yeso
Fijación	Mezclado y dispersión de aditivos o absorbentes en grandes cantidades	Residuos líquidos Lodos	Retención	On-site o Ex situ	Aceite en asfalto
Compactación o elevación de densidad	Reducción de el volumen de porosidad, la permeabilidad y de la superficie especifica Por compresión, Por aglomeración	Residuos Suelos contaminados Polvos Escombros	Disminución de la permeabilidad	In-situ eventualmente On-site	Compactadores Aplanadoras
Cristalización	Fundido térmico o eléctrico del material	Residuos Suelos contaminados Polvos Escombros Volátiles son evaporados	Lixiviación a largo plazo es casi eliminada	In-situ con limpieza de gases On-site	Residuos o suelos contaminados son convertidos por fundido en materiales vidriosos
Enladrillamiento	Calcinamiento con arcillas	Suelos contaminados Lodos Escorias de chimeneas o de producción		On-site o Ex situ	Polvos, escorias, lodos de galvanización Sedimentos contaminados con metales pesados son quemados y fijados en ladrillos

Tabla 2 Materiales para inmovilización y endurecimiento (DVWK, 1996)

Material aditivo	Ventajas	Desventajas	Área de aplicación
Cemento	Barato Técnica de mezclado sencilla Equipo, técnica y material se consiguen fácilmente	Aumento de peso y volumen Los productos del endurecimiento pueden ser atacados por ácidos Una descomposición del material endurecido así como una lixiviación de contaminantes es posible Componentes del suelo pueden influir sobre el endurecimiento y sobre el templado del cemento A veces es necesario la aplicación de aditivos	Residuos de plantas de tratamiento de aguas Lodos
(Na ₂ SiO ₃)	cantidades reducidas del aditivo son necesarias entre 5 bis 10% Aumento mínimo de peso y volumen gran capacidad de retención de agua Reducción posterior de volumen por pérdida de agua por evaporación iones metálicos de valencias altas son fijados químicamente en medio ácido o son fijados electro estáticamente	No es aplicable a compuestos que contienen Cloritos y cationes de valencia 1	Lixiviados de residuos sólidos Lodos Suelos contaminados
Puzzolan Silicato de Calcio Aluminato de calcio Ferrita de calcio Cenizas volátiles de incineradores Polvos de sementeras Escorias de altos hornos	Costos bajos Ningún aditivo es necesario Volumen de rellenos o de confinamientos es ahorrado Problemas de desalojo de ceniza y escorias es resuelto Reacción alcalina del material de endurecimiento conduce a la estabilidad de metales pesados en forma de compuestos no solubles como son Hidróxidos y carbonatos	Tiempos relativos largos de endurecimiento Durante confinamiento final es necesaria una compactación adicional Impurezas influyen en el comportamiento de endurecimiento La degradación de impurezas con el tiempo puede conducir a la disminución de la dureza por aumento de la porosidad y a un aumento de la permeabilidad	Materiales inorgánicos contaminados Lodos y materiales provenientes de empresas de galvanización que contienen Cianuro y metales pesados Lodos rojos de la producción de aluminio Lodos y escorias que contienen cromo Lodos del lavado de gases provenientes de la producción de plomo residuos de la industria eléctrica y electrónica

Tabla 2 Materiales para inmovilización y endurecimiento (continuación)

Material aditivo	Ventajas	Desventajas	Área de aplicación
Cal Ca(OH) ₂	Por reacción con CO ₂ se endurece mas lentamente Contaminantes y residuos así como aceites son incrustados firmemente en la matrix de hidrato de calcio	Desarrollo de calor durante mezcla lo cual puede conducir a que compuestos volátiles como lo son benzol, fenoles o solventes sean evaporados Cal tiene una solubilidad relativamente alta para agua en comparación con otros inmovilizantes 1. Reacciona con ácidos y no representa por ello un producto final estable	Lodos aceitosos 1. Derivados de ácidos grasos
Polímeros orgánicos Urea-Formaldehído Resinas de poliéster Resinas de epoxido	Cantidades mínimas de aditivos, por lo común hasta 3 % en peso de la mezcla Aplicable tanto a suelos contaminados secos como húmedos Densidad baja del producto de endurecimiento 1. Buena resistencia contra lixiviación de contaminantes	Contaminante solamente incrustado en una matrix de resina porosa Urea-Formaldehído es biodegradable productos de reacción deben de endurecer en un contenedor antes de ser confinados 1. Catalizadores necesarios para la reacción de endurecimiento pueden influir en la solubilidad de metales pesados	Residuos que contienen cianuro residuos que contienen arsénico 1. residuos que contienen metales pesados
Materiales termoplásticos como: Asfalto, betumen, polietileno	Buena adherencia a los materiales recubiertos Resistencia contra soluciones ácidas o alcalinas 1. La inmovilización en la matrix termoplástica es mayor que con otros materiales inmovilizadores	Aditivo es caro necesidad de personal entrenado solo para residuos secos solventes orgánicos y sustancias oxidantes descomponen la matrix termoplástica 1. Altas necesidades de tiempo y de proceso	Sustancias muy peligrosas sustancias radioactivas 1. pequeñas cantidades de contaminantes altamente concentrados
Yeso anhídrido	No hay desarrollo de calor No son liberadas sustancias volátiles 1. Se forma una matrix cristalina fijo que envuelve al contaminante	no son conocidas	Sustancias radioactivas