

Informe final: desarrollo de la tecnología de inmovilización: estabilización / solidificación de desechos peligrosos en Costa Rica

Fecha de recepción: 12/02/2008

Fecha de aceptación: 06/06/2008

Luis Guillermo Romero Esquivel¹
Maricruz Vargas Camareno²

Palabras clave

Desechos peligrosos; lodos de metalmecánica; tratamiento de desechos; inmovilización; estabilización; solidificación; metales tóxicos, cemento.

Key words

Hazardous wastes; electroplating sludge; hazardous wastetreatment; immobilization; solidification; stabilization; heavy metals, cement.

Resumen

Se evaluó la tecnología de inmovilización en un lodo proveniente del tratamiento del agua residual del proceso de electrodeposición de cromo y níquel sobre cobre; dos reactivos químicos vencidos de metales tóxicos (plomo y cadmio); y dos residuos sólidos resultantes del

tratamiento de desechos líquidos del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Para la inmovilización de un lodo proveniente del tratamiento del agua residual del proceso de electrodeposición de cromo y níquel sobre cobre de la empresa Prolex S. A., se evaluó la eficacia de tres tipos de materiales cementantes: cemento Pórtland / carbonato de calcio (50/50 y 75/25); y cemento Pórtland/puzolana (85/15). Con el fin de determinar si el lodo se puede disponer en un relleno sanitario, se determinaron las características tóxicas de lixiviación del lodo mediante el método *Toxicity Characteristic Leaching Procedure* (TCLP), determinándose que los niveles de lixiviación del níquel están por encima de la norma nacional. Se encontró que todos los cementos logran la inmovilización satisfactoria del níquel, pero la mezcla cemento Pórtland/puzolana (85/15) presenta las mejores resistencias mecánicas para la disposición del material

1. Centro de Investigación en Protección Ambiental (CIPA) de la Escuela de Química del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR). Correo electrónico: lromero@itcr.ac.cr
2. Centro de Investigación en Protección Ambiental (CIPA) de la Escuela de Química del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR). Correo electrónico: mvargas@itcr.ac.cr

Todos los métodos mencionados, excepto la inmovilización, requieren de una gran inversión inicial para la construcción de la infraestructura requerida para tratar los residuos

tratado en un relleno sanitario; por lo tanto es la más recomendable para el tratamiento. Este tipo de material cementante también se evaluó a nivel piloto, utilizando una mezcladora del tipo empleado en construcción. La resistencia mecánica del material así preparado está cuatro veces por encima de la formulación que utilizaba la empresa Prolex S. A., que incluye un aditivo importado, cemento convencional y piedra.

La tecnología de inmovilización también resultó satisfactoria en el tratamiento de reactivos vencidos de metales tóxicos (plomo y cadmio). En este caso, los cementos convencional, Pórtland y Pórtland con puzolanas fueron eficaces al inmovilizar acetato de cadmio en un 11% y acetato de plomo en un 6% del total. Al tratar acetato de plomo en un 15%, fue posible la inmovilización del plomo hasta en un 15%. En estos experimentos se utilizó arena como agregado en un 65% y se esperaba que al evitar el uso de la arena la cantidad de material por inmovilizar sea mayor.

Finalmente, dos mezclas del residuo resultante del tratamiento de desechos líquidos fueron solidificadas con éxito. En este caso, el residuo inmovilizado no presentó lixiviación por encima de la norma para arsénico, cromo, mercurio, plomo y bario. Sin embargo, el tratamiento se realizó para alcanzar valores de resistencia mecánica suficientemente altas para permitir la disposición del residuo en un relleno sanitario.

Abstract

Three different types of cement mixtures: Portland cement / calcium carbonate (50/50 and 75/25) and Portland cement / pozolan (80/20); were used to immobilized an electroplating sludge. The Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) analysis of this sludge presented nickel contents above the requirements.

It was found that, all the cements used successfully immobilized the metal. The Portland cement / pozolan mixture presented the best mechanical resistance accordingly with the specifications of final disposal in a sanitary landfill.

Lead and cadmium acetates were also immobilized using Portland cement with pozolan. The residue of the treatment of laboratory wastes were immobilized as well.

Introducción

En Costa Rica se estima en 40 000 ton/ año la cantidad de lodos industriales generados (la mayoría contienen sustancias químicas orgánicas y metales pesados peligrosos)¹. Para dar un tratamiento y disposición final a este tipo de residuos, se debe optar por alguna de las tecnologías disponibles para el tratamiento de desechos peligrosos, entre las que destaca: descomposición térmica, fusión en plasma, inmovilización y relleno sanitario controlado.

Todos los métodos mencionados, excepto la inmovilización, requieren de una gran inversión inicial para la construcción de la infraestructura requerida para tratar los residuos. Por su parte, la inmovilización con materiales cementantes requiere solo de una mezcladora de cemento como equipo. El tratamiento con esta tecnología puede hacerse: in situ, ex situ, en planta e incluso en planta móvil. Esta tecnología es aplicable al tratamiento de desechos tóxicos por sus niveles de metales pesados, otras especies inorgánicas y recientemente ha sido utilizado para el tratamiento de algunas sustancias orgánicas^{2,3}.

El término general ‘inmovilización’ incluye métodos físicos y químicos tanto para solidificar como para estabilizar los residuos⁴.

La estabilización es un término general para describir técnicas o métodos mediante los cuales los residuos peligrosos son

El proceso de inmovilización es particularmente efectivo en el tratamiento de lodos residuales, que han sido contaminados con metales pesados, que provienen de plantas de tratamiento para líquidos electrolíticos utilizados en la electrodeposición de metales

convertidos en una forma más estable⁴. Normalmente, esto se logra mediante la adición de reactivos que mejoran el manejo y las características físicas del residuo, disminuyen la superficie a través de la cual se puede dar la liberación de los contaminantes, reducen o limitan la solubilidad de cualquier contaminante presente en el residuo y, finalmente, reducen la toxicidad de los contaminantes⁵.

La solidificación se refiere a las técnicas que inmovilizan los residuos en una masa sólida. Esta masa puede ser el residuo original o el residuo previamente estabilizado⁴. La adición de reactivos facilita la solidificación de dicha masa para obtener una mayor resistencia, menor compresibilidad y menor permeabilidad del residuo⁵.

Un proceso eficaz de inmovilización es aquel donde los potenciales agentes contaminantes son inmovilizados con éxito en una estructura de residuos estabilizados o solidificados y aislados del medio ambiente, mermando su potencial lixiviación⁴. Se debe entender por lixiviación el proceso mediante el cual los contaminantes se transfieren de una matriz estabilizada a un medio líquido como el agua⁵.

El proceso de inmovilización es particularmente efectivo en el tratamiento de lodos residuales, que han sido contaminados con metales pesados, que provienen de plantas de tratamiento para líquidos electrolíticos utilizados en la electrodeposición de metales. En este proceso se utiliza una corriente eléctrica para depositar una capa delgada de metal sobre la superficie de un material conductor⁶; finalizado el tratamiento se generan aguas residuales de su tratamiento se derivan lodos ricos en metales tóxicos. Estos lodos normalmente son depositados en rellenos sanitarios, siempre y cuando no se produzca una alta lixiviación de los metales. La inmovilización de este tipo de lodos permite que no se de la lixiviación

de los metales pesados y de esta manera se pueda llevar la deposición final del material en un relleno sanitario.

El objetivo de este estudio fue identificar materiales de origen local que se puedan aplicar en la inmovilización de residuos peligrosos y desarrollar la experiencia necesaria para utilizar la tecnología de inmovilización. Para lograr esto, se trabajó en la inmovilización en laboratorio y escala piloto de un lodo residual de la planta de tratamiento de líquidos electrolíticos de la empresa de electrodeposición, Prolex S. A., ubicada en el Parque Industrial de Cartago, Costa Rica; dicho lodo es potencialmente peligroso por su contenido de níquel, cromo y cobre. También en la inmovilización de metales tóxicos de reactivos químicos de laboratorio vencidos (acetato de plomo y acetato de cadmio). Finalmente, se solidificaron los residuos sólidos provenientes de los procesos de tratamiento aplicados a dos mezclas diferentes de desechos líquidos peligrosos de laboratorios del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Estos residuos sólidos se originan del tratamiento químico de líquidos peligrosos del ITCR que fueron tratados en el proyecto de investigación "Manejo de desechos peligrosos en ITCR, III fase". La tecnología de inmovilización se ensayó en los residuos peligrosos mencionados, utilizando cemento convencional, cemento Pórtland, cemento Pórtland con puzolanas (15%), y mezclas de este último y carbonato de calcio como materiales cementantes.

Materiales y métodos

Inmovilización de lodos de planta de tratamiento de electrodeposición (PROLEX S. A.) a escala de laboratorio

Con el fin de estimar si el lodo se puede disponer en un relleno sanitario, se determinaron las características tóxicas de lixiviación del lodo mediante el método

Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, EPA⁷. Este procedimiento consistió en poner el lodo en contacto con una disolución compuesta de 5,7 mL de ácido acético glacial por litro de agua destilada y 64,3 mL de hidróxido de sodio 1 mol L⁻¹. El pH de esta disolución fue de $4,93 \pm 0,05$. Las mezclas, muestras de lodo en contacto con esta disolución (en una relación sólido líquido de 20/1), fueron colocadas en un agitador rotatorio por 18 horas⁷. Al cabo de este período, se realizó la filtración de las mezclas y se analizó el contenido de cobre, cromo y níquel en el líquido obtenido (lixiviado). Los metales se analizaron de acuerdo con los métodos del Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater⁸, utilizando un espectrofotómetro de absorción atómica Perkin Elmer modelo Óptima 3300 de llama con detector de rejilla de difracción marca y lámpara de cátodo hueco. Al aplicar el método TCLP a cinco muestras de lodo, se determinó un coeficiente de variación del 3% para el níquel, 4% para el cobre y del 7% para el cromo.

Posteriormente, se realizaron mezclas del lodo con diferentes materiales cementantes: cemento Pórtland; cemento Pórtland / carbonato de calcio (50/50 y 75/25); y cemento Pórtland/puzolana (85/15). Con estas mezclas se realizaron bloques que se dejaron fraguar por 28 días, al cabo de los cuales se determinó su resistencia mecánica; todo lo anterior, siguiendo las normas ASTM C-109, C-305 y C-230⁹.

El material ya fraguado (28 días) fue sometido nuevamente al ensayo TCLP descrito con anterioridad. Se utilizó una disolución compuesta de 5,7 mL de ácido acético glacial por litro de agua destilada a pH $2,88 \pm 0,05$. Posteriormente, en el lixiviado se analizó el contenido de níquel siguiendo el método del Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater⁸. En este caso se analizó solamente níquel porque es el único metal

presente en el lodo que supera la norma para este tipo de ensayo.

Tanto en el lodo, como en las mezclas lodo/cemento fue necesario determinar el pH, con el fin de determinar cuál disolución extractiva utilizar al aplicar el método TCLP. El procedimiento⁷ consistió en pesar 5 g de material, y adicionarle 96,50 mL de agua destilada. Esto se agitó por 5 min, y se midió el pH. Si el valor de pH fue menor a 5, se utilizó la disolución número 1, que es la disolución de pH $4,93 \pm 0,05$, utilizada en el caso del lodo. Si el valor de pH fue mayor a 5, se agregó 3,50 mL de ácido clorhídrico 0,1 mol L⁻¹ y se agitó por 10 minutos a una temperatura de 50 °C. Se dejó enfriar y se midió nuevamente el pH. Si este fue menor a 5 se utilizó la disolución número 1, pero si fue mayor a 5, se empleó la disolución número 2, la cual es de pH $2,88 \pm 0,05$, utilizada en el caso de las mezclas cemento /lodo una vez fraguadas.

Las muestras fraguadas también fueron sometidas a la determinación del pH del poro, utilizando el método 9045D de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, EPA¹⁰. Este procedimiento consistió básicamente en pesar 10 g del desecho, y adicionar 20 mL de una disolución de cloruro de calcio 0,01M. Se agitó eventualmente por 30 minutos y se filtró la muestra y se determinó el pH. En todas las determinaciones de pH realizadas, se utilizó un electrodo de vidrio.

Inmovilización de lodos de planta de tratamiento de electrodeposición (PROLEX S. A.) a escala piloto

En las instalaciones de la empresa Prolex S. A. se realizaron dos pruebas a escala piloto utilizando una mezcladora del tipo empleado en el sector construcción. En ambas pruebas se usó alrededor de 55 kg de cemento Pórtland con puzolana (15%) y de 40 kg de lodo. Con estas mezclas se realizaron bloques que se dejaron fraguar

En el proyecto investigación “Manejo de desechos peligrosos en ITCR III fase”, fueron tratados varios líquidos peligrosos de diversas actividades del ITCR. Estos líquidos contenían elementos tóxicos (arsénico, cromo, plomo, mercurio y bario) que fueron concentrados en una fase sólida mediante un tratamiento físico-químico

por 28 días, al cabo de los cuales se determinó su resistencia mecánica; todo lo anterior, siguiendo las normas ASTM C-109, C-305 y C-230⁹. También al cabo del tiempo de fragua se determinaron las características tóxicas de lixiviación del material en cuanto a cadmio, mediante el método *Toxicity Characteristic Leaching Procedure* (TCLP) de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, EPA⁷. Las pruebas de resistencia mecánica y el método TCLP también se aplicó a dos muestras del material tratado siguiendo el procedimiento normalmente utilizado en la empresa. En Prolex S. A., normalmente se utilizaba 50 kg de cemento convencional, 42 kg de lodo, 3 litros de aditivo (silicato de sodio) importado de Estados Unidos y 40 kg de piedra cuartilla. Tanto en las pruebas donde se usó solamente cemento Portland con puzolana como en el procedimiento realizado por la empresa, normalmente se utilizaron moldes a escala de producción (área promedio 36 100 mm²).

Inmovilización de metales tóxicos de reactivos químicos de laboratorio vencidos (acetato de plomo y acetato de cadmio)

En la I fase del proyecto “Manejo de desechos peligrosos en ITCR”¹¹, se determinó la presencia en el ITCR de una gran cantidad de reactivos químicos de metales tóxicos vencidos. En este proyecto se evaluó la inmovilización directa de acetato de plomo y de acetato de cadmio.

Se realizó la inmovilización del acetato de cadmio, utilizando un 65% de arena, 25% de cemento (Portland, convencional y mezcla cemento Portland 85% y 15% puzolanas) y un 11% de acetato de cadmio. Con estas mezclas se realizaron bloques que se dejaron fraguar por 28 días, al cabo de los cuales se determinaron las características tóxicas de lixiviación del material en cuanto a cadmio mediante el método *Toxicity Characteristic Leaching Procedure* (TCLP) de la Agencia de

Protección Ambiental de Estados Unidos, EPA⁷.

Para el caso del acetato de plomo, la inmovilización se realizó utilizando dos mezclas diferentes: a) 69% de arena, 25% de cemento (Portland, convencional y mezcla cemento Portland 85% y 15% puzolanas) y un 6% de acetato de plomo. b) 62% de arena, 23% de cemento (Portland, convencional y mezcla cemento Portland 85% y 15% puzolanas) y un 15% de acetato de plomo. Al igual que para el caso del acetato de cadmio, se procedió a realizar los bloques y al cabo de 28 días se evaluaron las características tóxicas de lixiviación del material en cuanto a plomo.

Solidificación de los residuos sólidos derivados del tratamiento de líquidos peligrosos del ITCR

En el proyecto investigación “Manejo de desechos peligrosos en ITCR III fase”, fueron tratados varios líquidos peligrosos de diversas actividades del ITCR. Estos líquidos contenían elementos tóxicos (arsénico, cromo, plomo, mercurio y bario) que fueron concentrados en una fase sólida mediante un tratamiento físico-químico. A esta fase sólida se le determinaron las características tóxicas de lixiviación del material en cuanto a cadmio mediante el método *Toxicity Characteristic Leaching Procedure* (TCLP) de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, EPA⁷.

Resultados y discusión

Inmovilización de lodos de planta de tratamiento de electrodeposición (PROLEX S. A.) a escala de laboratorio.

Al realizar el ensayo de TLCP en el lodo de la empresa Prolex S. A. se determinó que este supera la norma nacional¹¹ en cuanto a la concentración de níquel, tal como se puede observar en el cuadro 1. Para el caso del cromo, la concentración en el lixiviado

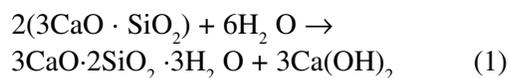
está muy por debajo de la regulación nacional¹¹ y el cobre no está regulado. En vista de lo anterior, al realizar el ensayo TCLP de los especímenes lodo/cemento una vez fraguados solamente se determinó la efectividad de la inmovilización mediante el análisis de níquel en el lixiviado.

En el cuadro 2 se observan los datos del metal de interés (níquel) en el lixiviado del lodo tratado con los diferentes tipos de cemento. Para todos los sistemas de cemento utilizado, se encontró una disminución en el contenido del metal en el lixiviado, incluso utilizando 6 partes de lodo por cada 4 partes de material cementante. Dicha disminución se puede deber a las siguientes tres razones:

I. Como se observa en el cuadro 2, el pH en el poro de las mezclas ya solidificadas está alrededor de 11 y 12 unidades. En este intervalo de pH, según se puede observar en la figura 1, el níquel presenta una solubilidad en el rango de 10^{-8} a 10^{-7} mol por litro, debido a la formación de hidróxidos metálicos¹². Conforme aumenta el pH dentro del poro, la solubilidad de los hidróxidos de níquel aumenta hasta valores de alrededor de 10^{-5} y 10^{-4} para valores de pH de 12,5 y 13,5 respectivamente. Estos valores de pH tan elevados son los que presenta el cemento Portland endurecido. Por esta

razón, el objetivo al utilizar mezclas de cemento Portland-carbonato y cemento Portland-puzolana es obtener un pH de la solución en el poro inferiores a 12,5 y de esta forma alcanzar una disminución en la solubilidad¹². En este sentido, los materiales puzolánicos (estos consisten en materiales silicios o aluminio-silicios) son adecuados porque reaccionan con el hidróxido de calcio liberado durante el proceso de hidratación del cemento Portland, disminuyendo el pH^{3,5}. Por su parte, el carbonato de calcio es apropiado porque disminuye el pH inicial del sistema y por lo tanto se da una disminución en la lixiviación de metales pesados¹³.

II. Las interacciones químicas entre los silicatos de calcio hidratados del cemento y los contaminantes¹³. El cemento Portland convencional consiste de cuatro fases: alita (Ca_3SiO_5 , 50-70% m/m), belita (Ca_2SiO_4 , 15-30% m/m), fase de aluminato ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$, 5-10% m/m), y ferrita ($\text{Ca}_2\text{AlFeO}_5$, 5-15% m/m). Estas fases reaccionan con el agua, de acuerdo con el mecanismo que se indica a continuación¹³:



Cuadro 1. Constituyentes inorgánicos de interés presentes en el lixiviado del lodo sin tratar y los valores de la norma nacional¹¹

Metal	Concentración del metal (mg L ⁻¹)		
	Norma	Lodo	Desviación estándar ^(b)
Níquel	5,0	31	1
Cromo	5,0	0,15	0,01
Cobre	N.R. ^(a)	18,3	0,8

^(a)El cobre no se encuentra regulado; ^(b) Desviación estándar de cinco determinaciones.

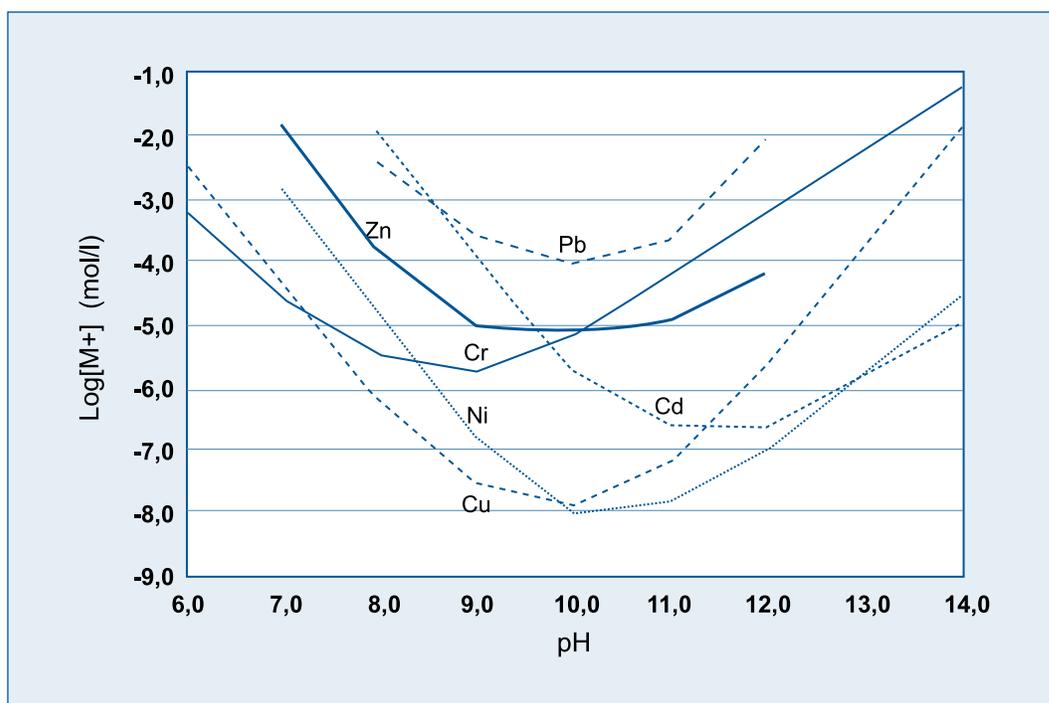
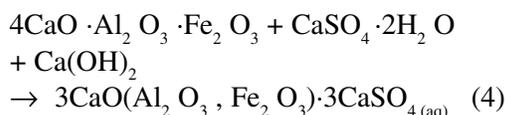
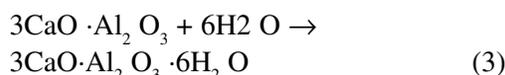
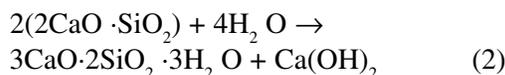


Figura 1. Solubilidad de algunos metales en función del pH¹².

Cuadro 2. Concentración de níquel en el lixiviado y pH en el poro de la muestra solidificada de lodo tratado con diferentes tipos de cemento

Tipo de cemento		Cemento masonry		Cemento Pórtland + 25 % CaCO ₃		Cemento puzolánico		Cemento Pórtland tipo I	
Proporciones		Conc.	pH	Conc.	pH	Conc.	pH	Conc.	pH
Cemento	Lodo	Ni (mg L ⁻¹)	(±0,01)	Ni (mg L ⁻¹)	(±0,01)	Ni (mg L ⁻¹)	(±0,01)	Ni (mg L ⁻¹)	(±0,01)
10	0	ND	12,17	ND	12,04	ND	12,44	ND	12,19
7	3	ND	11,87	ND	12,01	< 0,60	12,20	ND	12,20
6	4	ND	11,84	ND	11,71	< 0,60	12,17	< 0,60	12,17
5	5	ND	11,33	ND	11,74	< 0,60	11,92	< 0,60	12,11
4	6	< 0,6	11,09	ND	11,27	ND	11,81	< 0,60	12,08

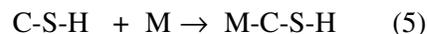
N.D. no detectable. Límite de cuantificación del níquel de 0,6 mg L⁻¹



Los silicatos cálcicos hidratados $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (en adelante C-S-H), son el producto de las reacciones (1) y (2). Estos silicatos son las fases que contribuyen, significativamente, a la matriz cementosa y a la estabilización química. C-S-H es un material coloidal microporoso con una alta área superficial de 100 a 700 m²/g, dependiendo de la técnica de medición usada¹³. La estructura de C-S-H es regular, semejante a la estructura de la arcilla (figura 2); y se ha encontrado que presenta propiedades de intercambio de cationes y de adsorción de iones. Se ha propuesto¹³ que el mecanismo para la inmovilización de un ion metálico (M) por

C-S-H puede ser por medio de reacciones de adición o de sustitución:

(a) Inmovilización por reacciones de adición:



(b) Inmovilización por reacciones de sustitución:



(c) Evidencia proveniente de difracción de rayos X también indica la posible formación de nuevos compuestos, que podrían inmovilizar metales.

III. La gran área superficial de C-S-H puede adsorber físicamente una gran cantidad de cationes; en algunos casos la adsorción física puede incluso ser mayor que el enlace químico¹².

Como se mencionó anteriormente, el níquel fue efectivamente estabilizado o retenido. Un material inmovilizado, además de la capacidad de retener los contaminantes, debe cumplir con requisitos de resistencia

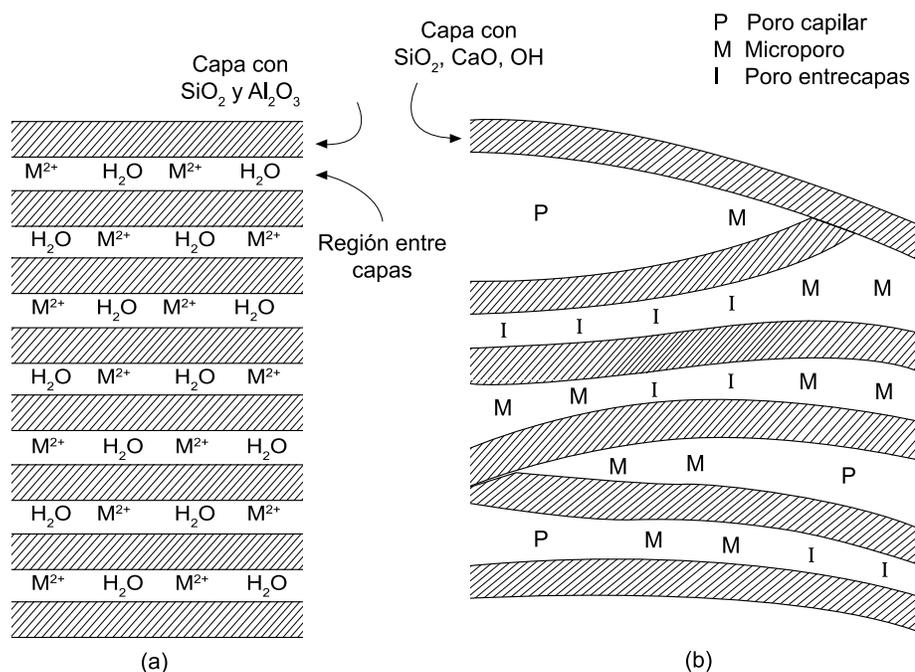


Figura 2. Modelo estructural de C-S-H¹⁴.

mecánica a la compresión para disponerse adecuadamente en un relleno sanitario. La norma de la USEPA recomienda un valor de 0,35MPa (3,51kg cm⁻²)⁴. En el cuadro 3 se observa que ambos cementos con carbonato de calcio presentan una resistencia mecánica aceptable solamente en el caso de las mezclas 7/3 cemento/lodo. Para el caso del cemento con materiales puzolánicos todas las mezclas presentan valores de resistencia mecánica apropiadas, a excepción de la mezcla 4:/6 de cemento:/ lodo. Es de esperar valores de resistencia mayores al usar cemento con adiciones puzolánicas porque este tipo de cemento presenta la formación de conglomerados con propiedades cementosas¹³.

Inmovilización de lodos de planta de tratamiento de electrodeposición (PROLEX S. A.) a escala piloto

En el cuadro 4 se observan los resultado obtenidos al realizar los ensayos a escala piloto, utilizando el procedimiento que aplicaba la empresa con cemento convencional, aditivo importado y piedra y el procedimiento recomendado con solamente cemento Pórtland con puzolanas. En todos los casos, se llevó a cabo la inmovilización del níquel con éxito. Para

el caso de la resistencia mecánica, las muestras tanto en moldes pequeños como en moldes industriales utilizados para la fragua presentaron valores superiores a la norma (0,35 Mpa⁴). Sin embargo, el procedimiento recomendado presenta una resistencia cuatro veces mayor al que usaba la empresa. Lo cual, como se menciona en la sección anterior, es de esperar para el caso de los cementos con adiciones cementantes. Además, en la formulación utilizada por la empresa se utilizaba piedra y como es de esperar esta no presenta propiedades cementantes. Finalmente, con el uso de solamente cemento Pórtland (de mayor calidad que el cemento convencional) con adiciones puzolánicas; ambos de origen local; se evitan los costos y trámites de importación de los Estados Unidos del aditivo.

Inmovilización de metales tóxicos de reactivos químicos de laboratorio vencidos (acetato de plomo y acetato de cadmio)

En el cuadro 5 se pueden observar los resultados de la inmovilización de plomo y cadmio utilizando tres tipos diferentes de cemento. Para el caso del cadmio tanto el cemento convencional como el Pórtland y el Pórtland con puzolanas fue

Cuadro 3. Resistencia mecánica para el lodo inmovilizado utilizando varios tipos de cemento

Tipo de cemento		Resistencia mecánica, MPa (± desv. Est)			
Proporciones		Cemento Pórtland + 50 % CaCO ₃	Cemento Pórtland + 25 % CaCO ₃	Cemento Pórtland + 15 % puzolanas	Cemento Pórtland
Cemento	Lodo				
10	0	31,26 ± 3,16	40,08 ± 3,13	62,92 ± 4,34	105,99 ± 2,45
7	3	1,15 ± 0,07	3,43 ± 0,27	11,28 ± 1,21	11,03 ± 1,92
6	4	0,18 ± 0,02	1,02 ± 0,08	5,89 ± 0,69	6,36 ± 0,66
5	5	0,17 ± 0,01	0,40 ± 0,03	2,77 ± 0,32	2,72 ± 0,19
4	6	N.R.	0,13 ± 0,01	0,54 ± 0,02	0,36 ± 0,06

N.R. no realizado. No hubo fragua.

Cuadro 4. Lixiviación y resistencia mecánica de los ensayos utilizando cemento Pórtland con puzolanas y del procedimiento utilizado normalmente por Prolex S. A.

Ensayo	Cantidad (kg)		Conc.	pH	Resistencia mecánica, MPa (± desv. Est)
	Cemento	Lodo	Ni (ppm)	(± 0,01)	
1	50	38	N.D.	11,80	2,57 ± 0,11
2	50	42	N.D.	11,90	0,60 ± 0,02

N.D. No detectable.

Cuadro 5. Lixiviación del cadmio y del plomo al inmovilizar con cemento convencional, cemento Pórtland y cemento Pórtland con puzolanas (15%)

Reactivo (acetato de)	Concentración del metal en lixiviado (mg L ⁻¹)			
	Norma	Convencional	Pórtland + 15% puzolanas	Pórtland
Cadmio (11%)	1	0,18	0,18	0,21
Plomo (6%)	5	1,13	3,77	2,38
Plomo (15%)		28,3	0,60	22,36

exitoso y hasta niveles similares en los tres casos. En el caso del plomo, los tres tipos de cemento funcionó al inmovilizar el plomo en una concentración de acetato de plomo del 6%. Sin embargo, los cementos Pórtland y convencional no lograron alcanzar los límites de la norma al utilizar un 15% de acetato de plomo. El cemento Pórtland con adiciones puzolánicas resultó más eficaz porque, como se mencionó para el caso del níquel en el lodo de Prolex S. A., los materiales puzolánicos reaccionan con el hidróxido de calcio liberado durante el proceso de hidratación del cemento Pórtland, bajando el pH^{3,5}. En general, los mecanismos de inmovilización son los mismos ya discutidos para el caso del níquel. En todos los casos es de esperar un aumento en la eficacia si se evita el uso de arena, que en este caso representó un 65% del total de la masa solidificada.

Solidificación de los residuos sólidos derivados del tratamiento de líquidos peligrosos del ITCR

Las sustancias líquidas del ITCR que fueron tratadas por métodos fisicoquímicos presentaban compuestos de los metales tóxicos arsénico, cromo, plomo, mercurio y bario. Al realizar el tratamiento de estos residuos líquidos, los metales fueron concentrados (reducción con hierro) en una fase sólida. Para clasificar esta masa sólida como material peligroso, se debió aplicar a esta el ensayo de características de toxicidad (TCLP). Los datos de la concentración de los metales en el lixiviado se encuentran en el cuadro 6. Como se observa, las concentraciones están por debajo de la norma para todos los metales, lo cual significa que dicho residuo no se clasifica como peligroso. Sin embargo,

se realizó la solidificación para poder obtener un material con la resistencia mecánica apropiada para su disposición en el relleno sanitario. En este caso, se utiliza el concepto solidificación porque no fue necesario inmovilizar los metales, aunque al aplicar el ensayo TCLP a este material se esperarían concentraciones en el lixiviado mucho menores.

Cuadro 6. Lixiviación de metales del sólido derivado del tratamiento de líquidos peligrosos del ITCR. Resistencia mecánica de los sólidos tratado con cemento

Metal analizado	1 (mg L ⁻¹)	2 (mg L ⁻¹)	Norma (mg L ⁻¹)
Arsénico	0,178 ± 0,038	0,022 ± 0,057	5
Cromo	0,5 ± 0,12	N.D.	5
Plomo	menor 0,2	N.D.	5
Mercurio	0,05 ± 0,01	menor a 0,002	0,2
Bario	menor a 2	menor a 2	100
Resistencia mecánica (MPa)	37,25 ± 1,42	24,34 ± 2,52	0,35

N.D.: No determinado.

Conclusiones

Los metales se lograron inmovilizar satisfactoriamente a valores por debajo de la norma nacional, debido, probablemente, a: la formación de hidróxido insoluble al pH del poro entre 11 y 12; reacciones de adición y sustitución; posible formación de nuevos compuestos, y la adsorción física en los silicatos cálcicos hidratados del cemento.

En general, al inmovilizar un material peligroso, el material resultante debe cumplir con las normas en cuanto a lixiviación de los contaminantes y resistencia mecánica.

El cemento Pórtland con y sin carbonato de calcio y/o materiales puzolánicos, demostró ser eficaz en la tecnología de inmovilización.

En el país existen materiales cementantes con capacidad suficiente para la inmovilización de metales tóxicos.

Las mezclas con materiales puzolánicos presentaron una mayor resistencia mecánica y una tendencia a una mayor capacidad de inmovilización.

El uso de una mezcladora de cemento de las utilizadas en construcción mostró ser eficaz en la inmovilización de lodos con cemento.

Es necesario realizar más ensayos para determinar la capacidad máxima de inmovilización de los cementos utilizados.

Agradecimiento

Un agradecimiento a la Agencia de Cooperación Japonesa (JICA), empresa de cemento Holcim (Costa Rica) S. A. y a la empresa de electrodeposición, Prolex S. A., por su valiosa colaboración en la realización de esta investigación.

Bibliografía

- Araya, W. 2002. Reporte Nacional de Manejo de Materiales Costa Rica-2002, PROARCA, USAID, CNP+L; Costa Rica.
- Harada, K. 2005. Waste Processing Technologies and Risk of Hazardous Wastes. Centro de Investigación en Protección Ambiental (CIPA)-Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR). Costa Rica.
- Wiles, C. 1997. Solidification and Stabilization Technology, En Standard Handbook of Hazardous Waste Treatment and Disposal, Freeman, H. (Editor): pp 7.31-7.46. McGraw-Hill, New York.
- Wilson, D., Balkau, F. y Thurgood, M. (2002). Solidificación y Estabilización. *Manual de Formación en gestión de residuos peligrosos para países en vías de desarrollo*. Disponible: www.uneptie.org/pc/hazardouswaste/menu.htm (mayo, 2005).

5. LaGrega, M., Buckingham, P. y Evans, J. 1996. Gestión de Residuos Tóxicos: Tratamiento, Eliminación y Recuperación de Suelos Vol. II. España, McGraw Hill.
6. Wikipedia The free encyclopedia. Electroplating. Disponible: <http://en.wikipedia.org/wiki/Electroplating>. (diciembre 2007).
7. USEPA 1990 Method 1311. Test Method for Evaluating Solid Waste (SW 846). Disponible: <http://www.epa.gov/sw-846/main.htm>.
8. Greeberg, A. 2005. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21st Edition. American Water Works Association.
9. ASTM C-109, C-305 y C-230. American Standard Test Methods. ASTM. USA.
10. USEPA 1990 Soil and waste pH. Test Method for Evaluating Solid Waste (SW 846). Disponible: <http://www.epa.gov/sw-846/main.htm>.
11. Gobierno de la República de Costa Rica. 1998. Reglamento de Desechos Peligrosos de Costa Rica. En: *La Gaceta* N.º 124, pp. 2-9. Costa Rica.
12. Shi, C. y Spence, R. 2004. Designing of Cement-Based Formula for Solidification/ Stabilization of Hazardous, Radioactive, and Mixed Wastes. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 34:391-417.
13. Shi, C 2004 Hydraulic Cement Systems for Stabilization/Solidification. En: *Stabilization and Solidification of Hazardous, Radioactive, and Mixed Wastes*. Editado por R.D. Spence y C. Shi, pp 49-77, CRC Press, Boca Raton, USA.
14. Mindness, S; y Young, J.F. "Concrete". Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J. USA (1981).