

**ESTUDIO DE LA ESTABILIZACION DE UN CAOLIN CARGADO CON Cu, Ni Y
Zn PARA SER DEPUESTO EN UN VERTEDERO DE SEGURIDAD**

**DIANA MILENA PUENTES MONTOYA
LILIANA PATRICIA SANCHEZ IGLESIAS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
BUCARAMANGA**

2008

**ESTUDIO DE LA ESTABILIZACION DE UN CAOLIN CARGADO CON Cu, Ni Y
Zn PARA SER DEPUESTO EN UN VERTEDERO DE SEGURIDAD**

**DIANA MILENA PUENTES MONTOYA
LILIANA PATRICIA SANCHEZ IGLESIAS**

**Proyecto de grado para optar al título de
Ingeniero Químico**

Director

Ph. D HUMBERTO ESCALANTE HERNANDEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
BUCARAMANGA**

2008

*Al dueño de la vida por concederme cuanto le he pedido,
por haberme dado la oportunidad de pertenecer a mi familia, a ellos
les debo haber cumplido esta meta tan importante,
ya que desde que empecé a vivir son ellos quienes han velado por mí,
quienes se han preocupado porque mi bienestar
y me han demostrado todo su amor con su incondicionalidad,
con su paciencia, perseverancia, ánimo, consejos y alegría.
Esto va para especialmente para mis papitos por ser mi mayor
inspiración y motivación en este caminar, de verdad con el corazón
muchas gracias por desempeñar como los mejores
su papel de padres.*

*Gracias mi señor por haber permitido que mi adorado novio estuviese de
principio fin en el transcurso de mi carrera, y aún continúe
apoyándome y deleitando cada momento de mi vida con su maravillosa
forma de ser y por compartir conmigo el amor de su familia.
A todas esos seres que me brindaron su compañía y admiración para
hacer realidad cada uno de los consejos que me han dado.*

Liliana Patricia

*Al dueño de la vida por concederme cuanto le he pedido,
por haberme dado la oportunidad de pertenecer a mi familia, a ellos
les debo haber cumplido esta meta tan importante,
ya que desde que empecé a vivir son ellos quienes han velado por mí,
quienes se han preocupado porque mi bienestar
y me han demostrado todo su amor con su incondicionalidad,
con su paciencia, perseverancia, ánimo, consejos y alegría.
Esto va para especialmente para mis papitos por ser mi mayor
inspiración y motivación en este caminar, de verdad con el corazón
muchas gracias por desempeñar como los mejores
su papel de padres.*

*Gracias mi señor por haber permitido que mi adorado novio estuviese de
principio fin en el transcurso de mi carrera, y aún continúe
apoyándome y deleitando cada momento de mi vida con su maravillosa
forma de ser y por compartir conmigo el amor de su familia.
A todas esos seres que me brindaron su compañía y admiración para
hacer realidad cada uno de los consejos que me han dado.*

Liliana Patricia

TABLA DE CONTENIDO

	Pag.
1. INTRODUCCIÓN	12
1.1 Fundamentos Teóricos	15
1.2 Caracterización Tecnológica	19
1.3 Procesos Basados en Cemento	20
2. DESARROLLO EXPERIMENTAL	23
2.1 Materiales y Equipos	23
2.2 Variables de Operación en el Proceso E/S del Caolín	24
2.3 Diseño Factorial para el Proceso E/S del Caolín	25
3. RESULTADOS	28
3.1 Cobre	30
3.2 Níquel	31
3.3 Cinc	33
4. CONCLUSIONES	35
5. BIBLIOGRAFIA	36

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Concentración inicial de metales en la arcilla y valores permisibles de la norma Nacional.	23
Tabla 2. Niveles máximos y mínimos para las variables de operación del proceso S/E de caolín saturado de metales	25
Tabla 3. Valores de experimentación para las variables del diseño del proceso de S/E de caolín contaminado con metales.	26
Tabla 4. Concentraciones en los lixiviados (TCLP) de los monolitos después de 28 días de fraguado.	29
Tabla 5. Resistencia a la Compresión de los monolitos después de 28 días de fraguado.	29

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Variación de la Resistencia en los monolitos caolín/concreto saturados con Cu con el tiempo.	30
Figura 2. Concentración liberada por los monolitos caolín/concreto saturados con Cu.	31
Figura 3. Variación de la Resistencia en los monolitos caolín/concreto saturados con Ni con el tiempo.	32
Figura 4. Concentración liberada por los monolitos caolín/concreto saturados con Ni.	33
Figura 5. Variación de la Resistencia en los monolitos caolín/concreto saturados con Zn con el tiempo.	34
Figura 6. Concentración liberada por los monolitos caolín/concreto saturados con Zn.	34

TITULO:
**ESTUDIO DE LA ESTABILIZACION DE UN CAOLIN CARGADO CON Co, Ni Y Zn PARA SER
DEPUESTO EN UN VERTEDERO DE SEGURIDAD.¹**

AUTORES:²

Puentes Montoya Diana Milena
Sánchez Iglesias Liliana Patricia

e-mail: dimipuentes85@hotmail.com
e-mail: lipasani@hotmail.com

Palabras claves: Estabilización, Caolín, tratamiento de aguas residuales.

Resumen:

El estudio en este trabajo se centró en proporcionar a diferentes sectores industriales, tales como el sector de recubrimientos metálicos, la explotación minera y petrolera, la petroquímica, la industria siderúrgica, la farmacéutica, etc., una tecnología que se adecue a sus necesidades en el tratamiento de sus vertimientos líquidos antes de ser arrojados al sistema de alcantarillado, para ello se usó la técnica de estabilización con cemento, incluyendo en una matriz el residuo, que corresponde a una arcilla caolinita utilizada previamente en adsorción mediante un proceso batch de efluentes industriales con altas concentraciones de metales Cu, Ni y Zn cada uno por separado, esto con soluciones sintéticas de 200 ppm simulando las concentraciones de los efluentes de un sector industrial, hasta su saturación. La eficiencia del proceso se estudió analizando los resultados de las pruebas de laboratorio TCLP (Procedimiento de lixiviación característico de toxicidad), resistencia a la compresión, pH, realizadas después de un tiempo de fraguado de 28 días, obteniendo altos porcentajes de retención de metales (con concentraciones de metales mínimas permisibles por la normatividad nacional) y sólidos monolíticos de resistencia elevada, ya sea a la compresión (resistencia mecánica) y especialmente a la lixiviación del residuo contaminante (resistencia química). Lo anterior para su deposición en vertederos de seguridad o para una posible aplicación en obras civiles.

¹ Trabajo de Grado

² Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química. Director: Ph.D. Humberto Escalante Hernández.

TITLE:
STUDY OF THE STABILIZATION OF A KAOLIN WHICH HAS BEEN CHARGED WITH Cu, Ni AND Zn TO BE PUT ASIDE INSIDE A SECURITY DRAIN³

AUTORES:⁴

Puentes Montoya Diana Milena
Sánchez Iglesias Liliana Patricia

e-mail: dimipuentes85@hotmail.com
e-mail: lipasani@hotmail.com

Key Words: Stabilization, Kaolin, Sewage Water Treatment.

Abstract:

The study in this paper got focused on providing to different industrial divisions such as the metallic coating division, the mining operation, the oil exploitation, the petrochemistry, the iron-and-steel, the pharmaceutical chemist one, etc., a technology which can fit for their particular needs of treatment of their liquid wastes before being thrown out into the sewing system; to do so; a cement-based stabilization technique was implemented, including the leftover into a matrix; this leftover corresponds to a kaolinita clay which has been used in the absorption of metals through a batch process of industrial effluents in synthetic solutions of Cu, Ni and Zn of 200 ppm, simulating the effluents concentrations of an industrial division, until its saturation. The efficiency of the process was carried out through the analysis of the findings of the laboratory tests TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure), resistance to compression, pH, carried out before a setting time of 28 days, obtaining high percentages of retention of metals and high retention monolithic solids, either to compression (mechanical resistance) or specially to lixiviation of polluting leftover (chemical resistance). All the mentioned above was designed in order to facilitate its deposition into security drains or to its possible application in civil constructions.

³ Grade Project

⁴ Ability of Physiochemical Engineerings. School of Chemical Engineering. Director: Humberto Escalante Hernandez.

INTRODUCCIÓN

El sector de los recubrimientos metálicos genera efluentes líquidos con elevadas concentraciones de metales pesados, tales como Cu, Ni, Zn [1]. La explotación minera y petrolera, la petroquímica, genera efluentes que poseen concentraciones de bario que sobrepasan la normatividad ambiental [2]. La industria siderúrgica produce descargas de aguas con niveles altos de concentración de materia orgánica, fenoles, alquitranes, cianuros libres y complejos, sulfuros, materias en suspensión, hierro, aceites y grasas [3]. De la industria farmacéutica puede decirse que los residuos principales son los disolventes usados (metanol, cloruro de metileno, acetona, tolueno, dimetilformamida, acetonitrilo, xilenos, metil isobutil cetona y metil *terc*-butil éter), las tortas de filtración y las materias naturales sobrantes de la extracción de sustancias naturales. También se generan grandes cantidades de ácido clorhídrico, ácido sulfúrico y amoníaco [4]. Los metales pesados están presentes en la mayoría de efluentes industriales, a concentraciones que sobrepasan los límites de vertimiento permitidos por la normatividad ambiental [5]. En muchas ciudades, las pequeñas y medianas empresas vierten sus efluentes a la red urbana de alcantarillado, sin ningún tipo de tratamiento; ocasionando problemas que se traducen en deterioro del medio ambiente, daños a la salud del hombre diversas formas de vida.

Metales como el cobre, níquel y cinc son reconocidos como nocivos por la Organización Mundial de la Salud [6]. Así mismo la Agencia de Protección Ambiental Americana (EPA) [7] clasifica al Cu, Ni y Zn como compuestos peligrosos, por el daño que pueden ocasionar a la salud humana (irritación de las mucosas, náusea, vómitos, diarrea [8], enfermedades dermatológicas de tipo no infeccioso como: dermatosis arsenical, erupción papulovesicular, dermatitis de contacto, dermatitis seborreica, y xerosis) [9], y potencialmente peligrosos (deben mantenerse bajo control). Aun cuando algunos metales son esenciales para

mantener el metabolismo del hombre, las elevadas concentraciones en el organismo pueden conducir al envenenamiento cuando las cantidades de estos son inhaladas como polvo, gases o vapores, ingeridas a través de comidas o bebidas, ingeridas en sobredosis y puede tener lugar a lo largo de los años (plomo) o en cuestión de minutos (vapores de mercurio) [10].

La reducción de la concentración de metales pesados, presentes en efluentes líquidos industriales, ha sido abordada mediante tecnologías como la precipitación [11,12], el intercambio iónico [13,14], la electrólisis [15], la Osmosis inversa [16]. En las últimas décadas se ha profundizado en el estudio de materiales arcillosos, para la adsorción de metales presentes en efluentes líquidos. Caolines, bentonitas, zeolita natural y esmectitas; montmorillonita, beidelita, nontronita, saponita, hectorita, están siendo utilizados como adsorbentes para metales como Ni [17, 18,19, 20, 21], Cu [18, 20, 21, 22, 24], Zn [21, 23, 24], Co [17, 20], Cr [17], Mg [20], Fe [22], Al [22], Na [25]. Estas tecnologías resultan atractivas ya que por las características fisicoquímicas de las arcillas, se obtienen excelentes porcentajes de adsorción, los materiales son de fácil consecución y los costos de operación son bajos [26].

El proceso de adsorción de metales de vertimientos industriales mediante una arcilla, generan dos corrientes: un efluente "limpio" (con concentraciones de metales mínimas, permisibles) y un residuo sólido (mineral saturado con los metales) de gran toxicidad y de carácter inorgánico. El mineral sólido que se convierte en un residuo de difícil gestión medio ambiental es el problema a resolver en esta investigación, además de tener un manejo problemático por su elevado contenido en humedad. Este material podría ser tratado nuevamente, con el fin de retirar los iones metálicos, proceso que involucra dificultades tecnológicas y elevados costos. Estas características le confieren al residuo una gran particularidad lo que justifica estudiar su gestión ambiental. Para dar tratamiento y disposición final a este tipo de residuos se debe optar por alguna de las

tecnologías disponibles, entre las que se destaca: descomposición térmica, fusión en plasma, inmovilización y relleno sanitario controlado. A excepción de la deposición segura en relleno sanitario, las anteriores soluciones presentan costos elevados de tratamiento [27], por lo que el principal objetivo de esta investigación es evaluar la factibilidad de aplicar la técnica de Estabilización/Solidificación (TE/S) de este tipo de residuos, usando cemento como agente aglomerante antes de la disposición en un vertedero de seguridad.

Una alternativa para los residuos sólidos, que contienen elevadas concentraciones de contaminantes, es su deposición segura en un vertedero o celda de seguridad [28]. Los materiales sólidos que son depuestos en el vertedero, deben ser tratados para garantizar que se elimina la migración de contaminantes hacia las corrientes de lixiviados [29].

La inertización es una alternativa tecnológica para tratar materiales sólidos, que contienen contaminantes tóxicos y peligrosos y que requieren ser depuestos en forma segura; para garantizar la completa gestión de los mismos. No obstante, para minimizar las filtraciones de los contaminantes y evitar problemas ambientales, los desechos deben ser estabilizados antes de su deposición [30].

La Tecnología de inmovilización: Estabilización/Solidificación (TE/S) es aplicable al tratamiento de residuos tóxicos con elevados niveles de metales pesados; Cr, Ni, Co, Plomo [31], especies inorgánicas, entre las que se encuentran lodos de la hidrometalurgia del zinc, cenizas de centrales térmicas, escorias y cenizas de plantas incineradoras [27,32] y recientemente ha sido utilizado para el tratamiento de sustancias orgánicas [33]. La TE/S es un tratamiento efectivo, tanto económica como técnicamente, para el encapsulamiento de residuos en los cuales no sea económicamente viable la reutilización o reciclado.

La TE/S se basa en la adición de uno ó más agentes aglomerantes para convertir el residuo en un sólido con integridad estructural y evitar la migración de contaminantes [34]. El objetivo de estas técnicas es mejorar la manipulación del residuo y reducir la movilidad de los contaminantes por inmovilización física o química de los constituyentes del mismo. Por tanto, a través de la TE/S, el residuo es químicamente estabilizado y físicamente modificado en una matriz sólida de baja permeabilidad, reduciendo su lixiviación y obteniendo un producto más sencillo de manejar y transportar.

1.1 Fundamentos Teóricos

Al trabajar con residuos es conveniente destacar tres características fundamentales asociadas al trato de los mismos, ellas son: los riesgos y la emisión propios del residuo y la reducción inherente al tratamiento.

Los riesgos

Normalmente la sociedad no es consciente del alto potencial contaminante de los depósitos de residuos, por dos razones importantes, el desconocimiento de su existencia, y las formas de propagación que el residuo posee. Si, es más consciente de la contaminación ambiental generada por vehículos, pesticidas, etc, ya que estos últimos tienen una acción directa en valores medibles atmosféricos.

Las razones que estipulan que un residuo sea o no peligroso son fundamentalmente las determinaciones de laboratorio en donde se obtiene su composición y se compara con los valores estándar reglamentada por la ley. Haciendo una adecuada recopilación de antecedentes que dieron origen al residuo se puede orientar la búsqueda de sus componentes contaminantes.

En Colombia se sigue el criterio establecido por la EPA de los Estados Unidos para establecer la toxicidad de un residuo. Con algunas modificaciones, la técnica propuesta es la de LIXIVIACION, para simular la migración de contaminantes en distintos medios. Se conoce como Test de Toxicidad (TT) y somete una muestra a condiciones de molienda, temperatura y presión en una solución acuosa ácida. Al observar los elementos transferidos si superan ciertos límites fijados el residuo o muestra es considerado tóxico [5]. Todos los programas reguladores tienen clasificados de distintas formas los contaminantes, de acuerdo a su origen, a sus características químicas, o también según la velocidad de migración de las sustancias tóxicas [5,6,7].

La emisión

La emisión de contaminantes al medio es inevitable, cuando la industria realiza transformaciones físicas o químicas a la materia. Las emisiones se pueden producir en cualquiera de los tres estados de la materia. Los mecanismos de transporte se darán de acuerdo a la naturaleza del contaminante y al medio que lo lixivia; entre los cuales se tienen [35]:

- Mecánicos: soluciones, disoluciones, advección (transporte horizontal de masa de agua por corrientes), flujos fracturados.
- Químicos: Sorción, reacción de oxidación y reducción, precipitación, etc.
- Procesos Biológicos: Degradación, absorción biológica, etc.

La reducción

A los residuos para disminuir su acción contaminante se les puede aplicar algunas de las siguientes técnicas:

- Minimización o reducción
- Desviación
- Prevención
- Reciclaje o reutilización.

Estos criterios aplicados a una política de gestión sirven para establecer órdenes de prioridades en el tratamiento del residuo. Las técnicas utilizadas para la reducción en general de un residuo podrán desarrollarse in situ al momento de ser generado, o posteriormente ser tratado en otro lugar y/o ser sumados como adición activa o no de un proceso. Las técnicas más usuales que se desarrollan para tratar un residuo contaminante se realizan mediante procesos como [35]:

- Procesos físico-químicos: Incluyen scripting (separación o fraccionamiento) por aire, por vapor, adsorción por carbón, procesos por membranas, etc..
- Métodos biológicos: sistemas de tratamiento en lechadas, en fase sólida, biorrecuperación, etc.
- Estabilización y solidificación: encapsulamientos, inhibiciones en fases aglutinantes y dispersantes.

La Agencia de Protección Ambiental, U.S. EPA [7], es la encargada de establecer los procedimientos que permitan identificar cuando un residuo es peligroso, y para ello establece 3 criterios de peligrosidad [36]:

- Cuando se trate de un residuo contenido en la lista de RCRA (Conservación y Recuperación de Recursos).
- Cuando presente alguna de las características de peligrosidad: corrosividad, reactividad, inflamabilidad y toxicidad.
- Cuando sea considerado por su generador como peligroso.

La característica de toxicidad es uno de los riesgos más importantes asociados a los residuos por la migración de contaminantes a las corrientes acuosas. Además de los ensayos normalizados, se ha considerado imprescindible estudiar el comportamiento del residuo estabilizado/solidificado bajo condiciones de acidez, utilizando un ensayo homologado que permita evaluar el comportamiento de la movilidad de los elementos tóxicos en medios de agresividad creciente (acidez).

Es pertinente matizar las siguientes definiciones:

INERTIZACIÓN O ESTABILIZACIÓN: Es el proceso que trata químicamente los contaminantes, formando en el residuo enlaces estables en el tiempo y químicamente resistentes a las agresiones producidas tras su deposición [26]. La estabilización es un término general para describir técnicas o métodos mediante los cuales los residuos peligrosos son convertidos en una forma más estable [37].

SOLIDIFICACIÓN: Es la técnica mediante la cual el residuo adquiere características mecánicas, perdiendo su condición líquida o pastosa, lo que además de mejorar su manejo, le confiere características resistentes [35]. La solidificación es el proceso en el que se añade cantidad suficiente de material solidificante, incluidos sólidos, a los materiales peligrosos para originar una masa solidificada.

La inertización y la estabilización/solidificación son utilizados para [35]:

- 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; en este proceso los

contaminantes se transfieren de una matriz estabilizada a un medio líquido como el agua.

1.2 Caracterización Tecnológica

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

Ensayos de extracción y lixiviación [26] estos términos se usan indistintamente, y es un proceso por el cual los contaminantes son transferidos de una matriz sólida o estabilizada al fluido extractor, por lo que la lixiviabilidad depende de las propiedades físicas y químicas, tanto de este como del material estabilizado. Se denomina fluido extractor o lixivante el fluido al cual los contaminantes son lixiviados; luego de que éste se haya contaminado se denomina lixiviado. La capacidad de un material estabilizado para lixiviar contaminantes se denomina lixiviabilidad. Los principales factores que afectan este fenómeno son la alcalinidad del producto estabilizado, la relación superficie-volumen del residuo y la tortuosidad, 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 lixiviante nuevo
- Recipiente de extracción
- Temperatura

Ensayo de toxicidad, procedimiento de extracción (EP) [26]: se utiliza para generar un extracto líquido a partir de residuos sólidos. Un residuo se considera EP tóxico si su extracto presenta alguno de los ocho metales legislados y seis pesticidas en concentraciones superiores al nivel umbral especificado en la normativa federal.

1.3 Procesos Basados en Cemento

El tratamiento de E/S basado en cemento es un proceso químico que tiende a enlazar o complejar los compuestos de los residuos en formas estables insolubles (estabilización) y/o atrapar residuos dentro de una matriz cementante sólida (solidificación). Este proceso y variaciones de él fue el primer sistema utilizado de E/S en residuos nucleares en los años 50. Desde entonces, el cemento Portland es el ingrediente más utilizado dentro de los procesos E/S [38].

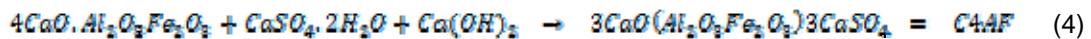
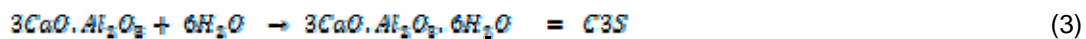
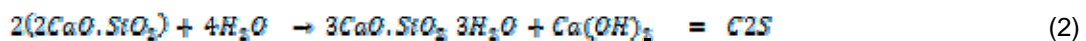
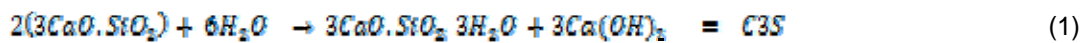
Además, hay que tener en cuenta los siguientes aspectos:

- ✓ Elimina algunas variables de estudio en procesos E/S porque su composición es muy consistente.
- ✓ Se conocen las reacciones del cemento en el fraguado y el manejo y, más recientemente, en la fijación de metales.
- ✓ Buenos datos en el modelado de lixiviación.
- ✓ Se han realizado numerosos estudios.

En los procesos E/S con cemento, los metales se convierten en hidróxidos y/o silicatos insolubles dentro de la matriz. Por tanto, los principales mecanismos son

la precipitación y el atrapamiento físico. Con el cemento, el agua del residuo reacciona químicamente para formar silicatos y aluminatos hidratados. La parte sólida del residuo actúa como agregado, aunque puede producir baja resistencia [38]. El cemento Pórtland 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 al mecanismo que se indica a continuación [31]:

Las reacciones de hidratación, que forman el *proceso de fraguado* son:



Donde:

C3S: Silicato tricálcico.

C2S: Silicato dicálcico.

C3A: Aluminato tricálcico.

C4AF: Ferroaluminato tetracálcico.

Los silicatos cálcicos hidratados $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 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. El Silicato tricálcico es un material coloidal micro poroso con una alta área superficial de 100 a 700 m^2/g , dependiendo de la técnica de medición usada [39], su estructura es regular, semejante a la estructura de la arcilla y se ha encontrado que presenta propiedades de intercambio de cationes y de adsorción de iones [31].

El proceso cemento Portland/silicatos se basa en las reacciones entre los silicatos solubles y el cemento para producir una matriz sólida. Se utiliza mucho en los lodos metálicos para producir silicatos insolubles [38] Se puede seleccionar el tipo de cemento que favorezca las reacciones de cementación, evitando interferencias de compuestos incompatibles. Los tipos de cemento más habituales son [40]:

- ✓ Tipo I: cemento Portland común.
- ✓ Tipo II: cemento bajo en alúmina, moderadamente resistente a los sulfatos.
- ✓ Tipo III: cemento de fraguado rápido, de alta resistencia.
- ✓ Tipo IV: cemento de fraguado lento, para su empleo en grandes macizos.
- ✓ Tipo V: cemento muy bajo en alúmina, resistente a sulfatos.

Debido al costo y disponibilidad, el tipo I es el más utilizado para la solidificación de residuos [26]. El principal problema de los procesos E/S con cemento Portland son los efectos que producen numerosos compuestos en las reacciones del cemento. Los contaminantes presentes en el residuo quedan incluidos dentro de la estructura cristalina que se forma por la hidratación del cemento. En el procedimiento utilizado para metales pesados: el níquel y el cobalto sustituyen al calcio; el cromo sustituye al silicio; el cadmio, plomo y zinc precipitan como hidróxidos y carbonatos; el mercurio es encapsulado como óxido de mercurio [41].

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

2.1 Materiales y Equipos

La materia prima para este estudio fue una arcilla caolinítica previamente utilizada en absorción, mediante un proceso batch de efluentes industriales que tenían altas concentraciones de cobre, níquel y cinc, cada uno por aparte. En la tabla 1 se presenta la concentración de metales absorbida por la materia prima (caolín) y los niveles permisibles por la normatividad ambiental nacional [5], ya que estos son superados, es un residuo que se clasifica como tóxico y peligroso [7].

Tabla 1. Concentración inicial de metales en la arcilla y valores permisibles de la norma Nacional.

Metal	Concentración inicial (ppm)	Concentración Max. Decreto 1594/84
Cu	199.4	3.0
Ni	187.6	2.0
Zn	175.5	5.0

Fuente: Autoras

Los reactivos utilizados para la elaboración de la matriz encapsulante fueron cemento Portland marca Diamante, arena fina (pasada por un tamiz N° 10), gravilla (pasada por un tamiz N° 4), y agua destilada. Las probetas se elaboraron en moldes de tubo de PVC de de 2,54 cm de diámetro y 5 cm de altura conservando una relación altura/diámetro de $2 \pm 0,1$ [42].

Se preparo una mezcla de arena, gravilla, caolín cargado, cemento Portland y agua, mezclando cuidadosamente hasta que esta fuera homogénea llenando los moldes de PVC en cuatro fases iguales aplicando 20 golpes usando una varilla de $\frac{1}{2}$ pulgada de diámetro en diferentes partes de la superficie del concreto para tener una compactación uniforme. La resistencia es función del tiempo de

fraguado, alcanzándose su valor máximo aproximadamente a 28 días [42], desencofrando y realizando 5 rupturas distribuidas a los 4, 7, 14, 21 y 28 días con su respectiva replica. En cada ruptura de las probetas fue medida la resistencia a la compresión en una máquina universal de ensayos marca Trebel y posteriormente se realizó la prueba TCLP.

2.2 Variables de operación en el proceso de S/E del caolín.

La dosificación de cada uno de los componentes de la matriz encapsulante acota el valor de resistencia del concreto. Por esta razón se estudio la dosificación apropiada de las variables: Matriz (M), Cemento: arena: gravilla, % de Residuo (R), relación agua/cemento (A/C), que garantizara un valor de resistencia adecuado. El concreto debe dosificarse para desarrollar resistencia suficiente con el fin de sostener de modo adecuado las cargas que se le van a imponer en servicio [43] y teniendo en cuenta que la finalidad de las probetas es la deposición en un vertedero de seguridad, la propiedad de resistencia a la compresión no exige valores altos, ya que no estarán sometidos a cargas o esfuerzos.

Es muy importante la adición apropiada de agua, se requiere una mínima cantidad para que la mezcla sea trabajable. Sin embargo, la adición exagerada de agua puede formar una capa libre en la superficie del producto, disminuyendo su resistencia y aumentando la permeabilidad [38].

En cuanto a la cantidad de residuo se realizaron numerosos ensayos ya que lo más importante fue adicionar la mayor cantidad posible en las probetas, inicialmente se definió un mínimo arbitrario de 10%, y para el máximo se probaron diferentes mezclas hasta encontrar que con 25% la probeta continuó con buen aspecto, una buena consistencia y resistencia, verificando que por encima de este

valor el monolito presento un fraguado defectuoso y por ende un valor de resistencia deficiente.

2.3 Diseño factorial para el proceso de E/S del caolín.

En la búsqueda de las mejores condiciones de operación para el proceso de S/E del caolín, se planteo un diseño factorial de 2^n , donde n es el número de variables de entrada. Los niveles mínimos y máximos, de las variables de operación se relacionan en la tabla 2.

Tabla 2. Niveles máximos y mínimos para las variables de operación del proceso S/E de caolín saturado de metales.

Variabales	Valor Máximo (+)	Valor Mínimo (-)
Matriz (M) Cemento : arena : grava	1 : 1 : 1	1 : 2 : 2
% Residuo (R)	10 %	25%
Agua/Cemento (A/C)	0.48	0.57

Fuente: Autoras

La relación agua/ cemento (A/C), se determinó de acuerdo a las recomendaciones de la ACI (American Concrete Institute) [44]; quienes recomiendan para seleccionar esta variable tener en cuenta la condición de exposición, la resistencia especificada y los valores máximos permisibles para el concreto. La relación de las anteriores variables, es de importancia en la formulación de un concreto, ya que ellas pueden determinar su resistencia y por ende su utilización industrial. El máximo y mínimo de la matriz se determino variando la cantidad de cemento, utilizando la misma dosificación de arena y grava en relación 1:1, obteniéndose una matriz máxima de 1:1:1 y mínima 1:2:2.

En la tabla 3 se presentan los valores máximos y mínimos de las variables para cada uno de los experimentos del diseño.

Tabla 3. Valores de experimentación para las variables del diseño del proceso de S/E de caolín contaminado con metales.

VARIABLES	EXPERIEMENTOS							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Matriz M	1 : 1 : 1	1 : 1 : 1	1 : 1 : 1	1 : 1 : 1	1 : 2 : 2	1 : 2 : 2	1 : 2 : 2	1 : 2 : 2
Residuo R	25%	25%	10%	10%	25%	25%	10%	10%
Agua/cemento A/C	0.57	0.48	0.57	0.48	0.57	0.48	0.57	0.48

Fuente: Autoras

Como se tienen tres variables, el diseño planteado generó un total de 8 experimentos por metal con su respectiva replica, por cada experimento y por cada metal se montaron 10 probetas.

Para determinar la movilidad de los metales encapsulados en la matriz inertizada se realizó la prueba TCLP, test adecuado para determinar la movilidad, tanto de compuestos orgánicos como inorgánicos presentes en líquidos, sólidos y residuos multifásicos [26].

Para la aplicación del ensayo de lixiviación TCLP, en primer término se determinó el fluido extractante a utilizar: Este fluido es función de la alcalinidad del residuo. Se pesaron 5 g de muestra saturada (con Cu, Ni y Zn) con tamaño de partícula 1 mm, se adicionó 96.5 ml de agua destilada y se agitó durante 5 minutos. Se midió el pH, el cual fue mayor de 5 y siguiendo el procedimiento se adicionó 3,5 ml de HCl 1N. Se calentó la solución hasta ebullición, agitando simultáneamente durante 2 minutos. Una vez la mezcla se enfrió a temperatura ambiente, se midió de nuevo el pH y al ser mayor que 5 la norma establece usar como lixivante el fluido N° 2.

Este fluido se preparó diluyendo 5,7 ml de ácido acético glacial hasta un volumen de un litro con agua destilada, generando una solución de pH de $2.87 \pm 0,02$.

Para realizar el TCLP se peso 2 g de muestra (caolín/concreto) y se adicionó 40 ml (20 veces el peso de la fase sólida) del fluido extractor. La mezcla se colocó en un equipo agitador rotatorio, en tubos tapa rosca, a 30 r.p.m. durante 18 horas. La mezcla se separó mediante filtración al vacío. Al fluido extractante se le evaluó la concentración de cobre y níquel en un Espectrofotómetro de Fluorescencia de Rayos X de Energía Dispersa marca Buck – scientific 210 VGP y de cinc en un Espectrofotómetro marca Perkin-elmer 2380.

Por medio de un balance de masa sencillo se determinó la cantidad de metales retenidos en los monolitos, variable de salida o respuesta que determinó la eficacia encapsulante del monolito.

3. RESULTADOS

De acuerdo con los datos presentados en la Tabla 4, los cuales corresponden a la prueba TCLP, que muestra los iones liberados por el monolito y unificando los resultados de los tres metales se observó que ninguno de los lixiviados incumple el decreto 1594/84 (Usos del agua y residuos líquidos) [27], que el Cu mostró menores valores de absorbancia en comparación con Ni y Zn e indiscutiblemente el experimento con mejor comportamiento fue el número 4 que contiene 10% de residuo, relación agua/cemento de 0.48 y matriz 1:1:1, puesto que al cabo de los 28 días, este monolito es el que retiene casi la totalidad del residuo que se adicionó. Sin embargo se analizaron los resultados de cada metal, teniendo en cuenta los siguientes criterios:

1. Costo de la matriz o mezcla, función principalmente de la cantidad de cemento, porque este es el reactivo de mayor valor.
2. Cantidad de residuo agregado al monolito.

Según el primer criterio los experimentos 8, que tienen la matriz mínima; con el segundo criterio los experimentos 2, que contienen 25% de residuo, fueron los de mejor desempeño y los experimentos 6 con la matriz mínima, mayor cantidad de residuo (25%) y menor humedad (0.48), satisfacen ambos criterios, además que los resultados de absorbancia son bajos.

Tabla 4. Concentraciones en los lixiviados (TCLP) de los monolitos después de 28 días de fraguado.

Metal	Concentración de metales (ppm)							
	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3	Exp. 4	Exp. 5	Exp. 6	Exp. 7	Exp. 8
Cu	0.021	0.010	0.012	0	0.040	0.037	0.018	0.004
Ni	0.033	0.031	0.022	0.020	0.083	0.058	0.045	0.040
Zn	0.060	0.018	0.018	0.0031	0.049	0.065	0.063	0.035

Fuente: Autoras

Comparando las concentraciones de metales en la arcilla con las de los lixiviados se puede establecer que los metales fueron efectivamente estabilizados o retenidos en los monolitos y por lo tanto la TE/S es viable para darle un apropiado tratamiento al residuo peligroso. Un compuesto inmóvil o inactivo aparte de retener contaminantes debe cumplir con los requerimientos de resistencia a la compresión para ser depuesto adecuadamente en un vertedero de seguridad. La norma sugiere un valor de 0.35 MPa (50.76 psi) [45].

Según los datos de resistencia presentados en la Tabla 5 todos los experimentos cumplen con la norma [45].

Tabla 5. Resistencia a la Compresión de los monolitos después de 28 días de fraguado.

METAL	Resistencia a la compresión (psi)							
	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3	Exp. 4	Exp. 5	Exp. 6	Exp. 7	Exp. 8
Cu	4433.62	4490.46	6025.17	8128.30	2434.97	2553.17	6309.38	8403.03
Ni	4625.34	7226.97	8679.76	8682.24	5496.24	5730.97	7036.18	7087.20
Zn	5399.92	7191.47	10913.52	11879.82	3239.95	4647.29	7900.93	9321.96

Fuente: Autoras

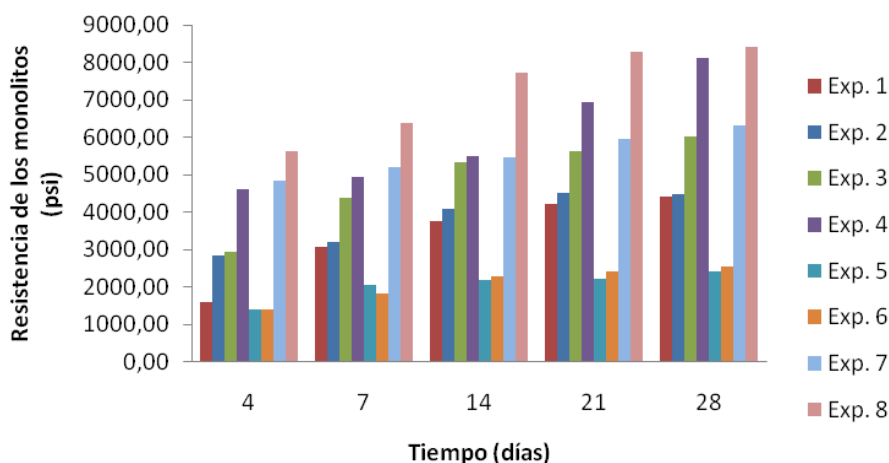
Se observó que el residuo influye negativamente en la propiedad de resistencia a la compresión ya que comparando aquellos experimentos con igual cantidad de agua e igual matriz, el de mayor cantidad de residuo mostró menor resistencia.

Aunque los experimentos 6 reportaron las más bajas resistencias, siguen siendo los más rentables y eficientes porque su dosificación es económica y su resistencia es apta para la finalidad de las probetas.

3.1 Cobre

Las Figuras 1 y 2 presentan la resistencia a la compresión y los valores de absorbancia respectivamente para el Cu a lo largo de los 28 días de experimentación. Se analizó el comportamiento de los experimentos para resistencia y absorbancia, asociando en parejas aquellos con igual matriz de mezcla e igual cantidad de residuo, pero con diferente contenido de agua, (Exp.1 y Exp.2, Exp.3 y Exp.4...) y claramente resultaron mejores los experimentos con menor contenido de agua, tanto en absorbancia como en resistencia.

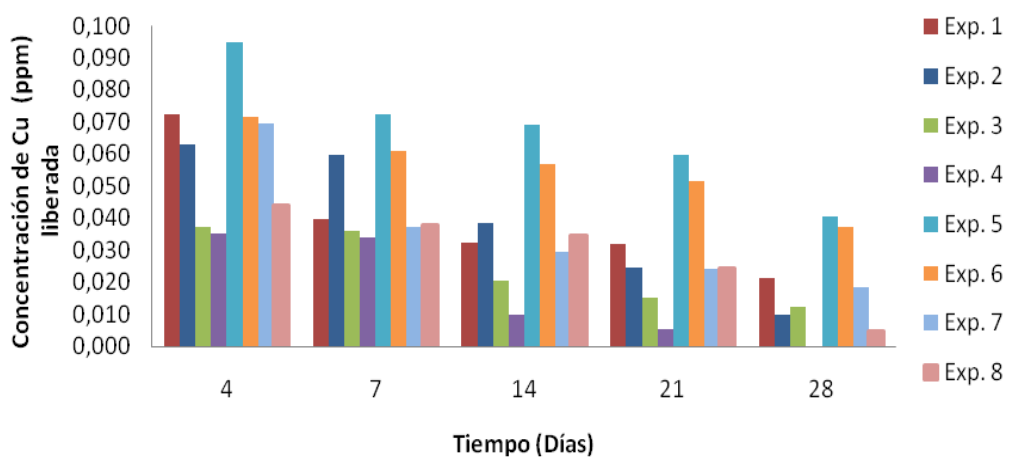
Figura 1. Variación de la Resistencia en los monolitos caolín/concreto saturados con Cu con el tiempo.



Fuente: Autoras

Los valores más altos de resistencia se alcanzaron a los 28 días, lo que indica que la resistencia es proporcional al tiempo de fraguado. Sin embargo, los valores de resistencia medidos a los 4 días de fraguado de todos los experimentos, no incumplen la norma [45].

Figura 2. Concentración liberada por los monolitos caolín/concreto saturados con Cu.



Fuente: Autoras

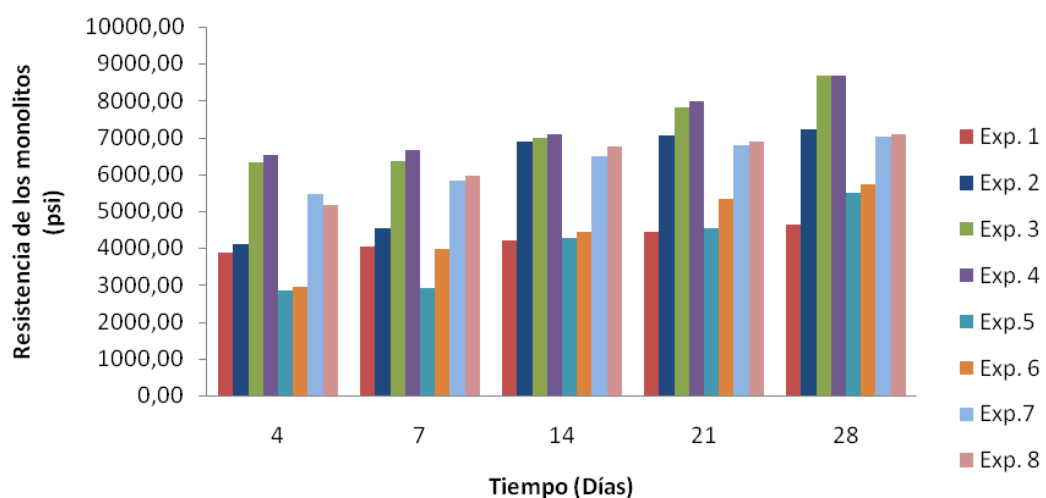
En la Figura 2. Se observa que los Exp. 1, 2 , 5 y 6, registran las mayores concentraciones liberadas por los monolitos, esto se debe a la influencia negativa del residuo en las probetas, ya que son que contienen 25% de este.

3.2 Níquel

Este metal tuvo un comportamiento similar al cobre, es decir, al asociar los experimentos en parejas cuya diferencia fue la cantidad de agua, nuevamente los de menor contenido de humedad resultaron tener mejor comportamiento en resistencia y absorbancia. El residuo de Ni es también nocivo, para el fraguado del

monolito y por lo tanto para la resistencia ya que los experimentos con el mínimo residuo registraron los valores más altos observar Figura 3, pero en absorbancia se notó una gran diferencia con el cobre mientras este no excedió 0.1 ppm de concentración en los lixiviados el Ni alcanzó su valor más alto en 0.4 ppm.

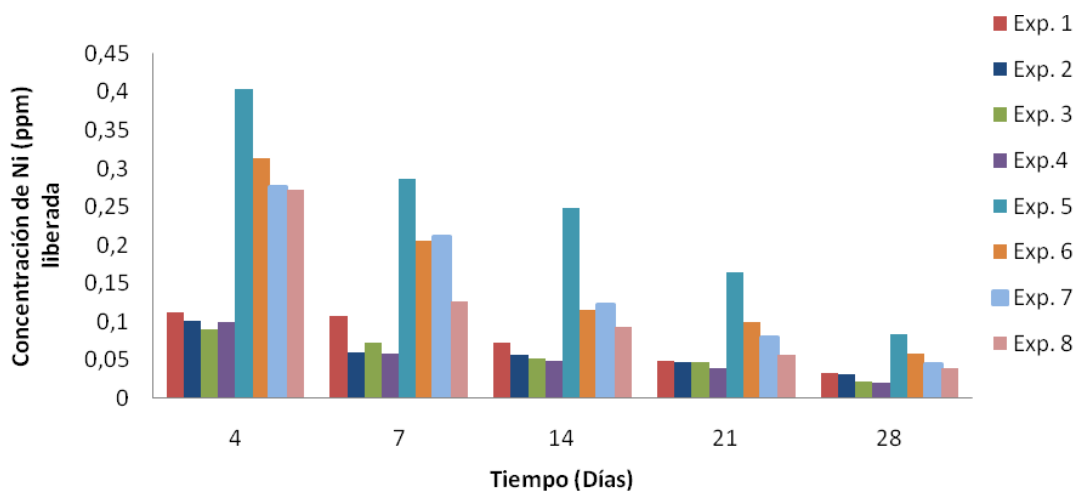
Figura 3. Variación de la Resistencia en los monolitos caolín/concreto saturados con Ni con el tiempo.



Fuente: Autoras

En la Figura 4 se observa la variación de la concentración de Ni, la tendencia para los Exp. 1, 2, 3 y 4 no es tan significativa a lo largo de los 28 días comparada con la del resto de experimentos representados en esta figura, esto indica que para lograr un mejor desempeño en estos últimos es conveniente esperar los 28 días de fraguado.

Figura 4. Concentración liberada por los monolitos caolín/concreto saturados con Ni.



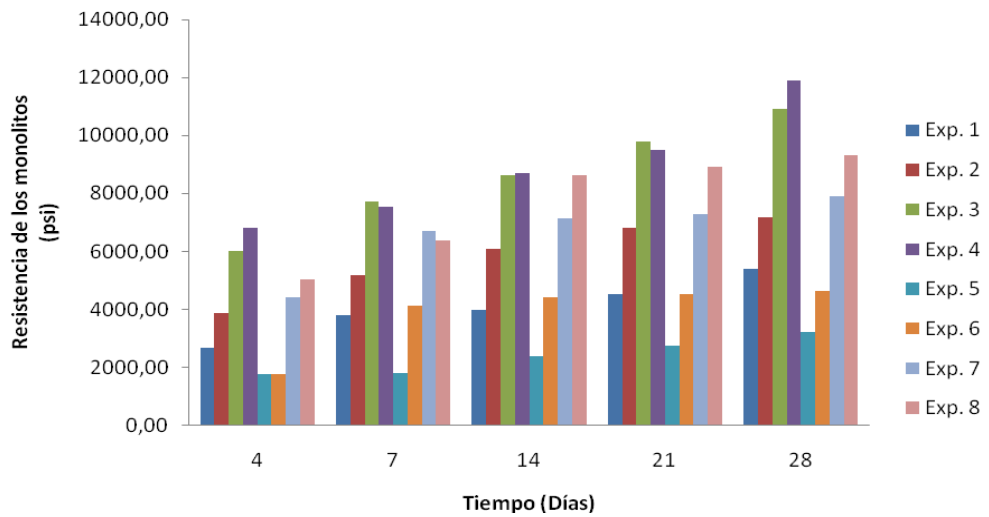
Fuente: Autoras

3.3 Cinc

La conducta del Zn a manera general es muy afín con los metales anteriormente nombrados, ya que se destacan los mismos experimentos como los mejores a la hora de asociarlos, tuvieron mejor desempeño los de menor contenido de agua y los de menor contenido de residuo. No obstante comparando con Cu y Ni, el Zn tuvo las resistencias más altas y en la mayoría de experimentos libero menor concentración en los lixiviados, esto puede ser debido a que el Zn precipita haciéndose insoluble y así evitando su migración al medio [41].

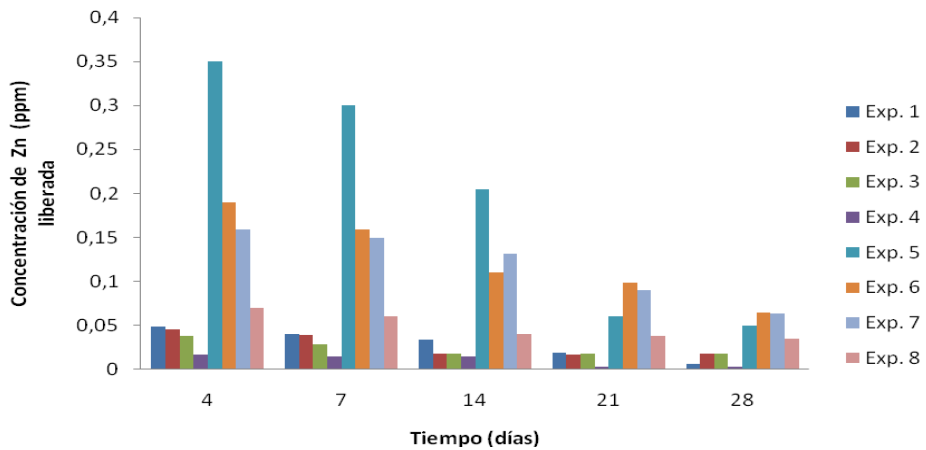
Las gráficas 5 y 6 presentan la resistencia a la compresión y los valores de absorbancia respectivamente para el Zn a lo largo de los 28 días de experimentación.

Figura 5. Variación de la Resistencia en los monolitos caolín/concreto saturados con Ni con el tiempo.



Fuente: Autoras

Figura 6. Concentración liberada por los monolitos caolín/concreto saturados con Ni.



Fuente: Autoras

4. CONCLUSIONES

Es viable encapsular los metales Cobre, Níquel y Cinc, presentes en una arcilla tipo caolín, mediante un proceso de Estabilización/Solidificación (E/S); utilizando una matriz compuesta de cemento: arena: agua: grava en relación másica 15:30:30 (1:2:2).

La matriz propuesta admitió hasta un 25 % en peso de arcilla y mediante el test TCLP se comprobó la estabilización del cobre, níquel y cinc en un 99.98%, 99.96% y 99.96% respectivamente; obteniéndose un monolito con resistencia a la compresión promedio de 4310.48 psi, lo cual garantiza que al deponerlo en un vertedero de seguridad no habrá problemas de contaminación ambiental.

Los resultados obtenidos en este trabajo muestran que la tecnología de E/S es una alternativa sencilla, económica y al alcance para que diferentes sectores industriales de la región, puedan llegar a realizar un manejo adecuado de sus contaminantes tóxicos y peligrosos y reduzcan los impactos ambientales que están ocasionando al verter sus residuos sin ningún tipo de tratamiento.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] ESCALANTE H., ARIAS J E., ROMERO M., GUERRERO A., (2006) *Diseño de una Herramienta Matemática para Evaluar la Carga Contaminante Generada por los Vertimientos Líquidos de una Empresa de Recubrimientos Metálicos*. Revista UIS Ingenierías, Vol 5, No. 2, pág. 141 – 150.
- [2] DUPERLE G., PEÑA D., ESCALANTE H., (2008) *Reducción de la Concentración de Bario presente en un Efluente Líquido, mediante Extracción No-Dispersiva en Módulos de Fibra Hueca*. Dyna, Año 75, Nro. 155, pp. 133-144.
- [3] AMBIENTUM. *Nanofiltración de aguas residuales*. Edición Junio 2002. www.ambientum.com/revista/2002_22/CLSFCCNG1.asp.
- [4] GARCIA R., MARTINEZ C. *Residuos en la Industria Farmacéutica*. Dpto. Medio Ambiente Despacho Garrigues. www.garrigues.com/download/Enr04_Residuos%20ind%20farmacéutica.doc.
- [5] Decreto 1594 del 26 de junio de 1984. Ministerio de Agricultura. Colombia.
- [6] WORLD HEALTH ORGANIZATION. CEPIS/OPS-OMS. Calidad del agua. Normas Internacionales para la Calidad del Agua de Bebida. <http://www.cepis.ops.oms.org/eswww/caliagua/norminte.html>.
- [7] Agencia de Protección Ambiental Americana (EPA).Tabla de códigos de Residuos Peligrosos/ Metales Pesados. www.epa.gov/epawaste/inforesources/pubs/espanol/pullout.pdf.
- [8] Agency for Toxic Substances & Disease Registry. Department of Health and Human Services/ Heavy metals.

Localización: www.atsdr.cdc.gov/es/training/toxicology_curriculum/modules/1/es_module_1.html

[9] RAMOS M., WILLY C., (2004) *Enfermedades dermatológicas de tipo no infeccioso asociadas a exposición crónica a metales pesados de relaves mineros.*

Localización: http://www.cybertesis.edu.pe/sisbib/2005/ramos_mw/html/index-frames.html

[10] BADASH M., CARSON R. (2003) *Envenenamiento por Metales Pesados.* Copyright © EBSCO Publishing.

[11] RAMALHO RS., BELTRAN DJ., DE LORA F. (1993). *Tratamiento de Aguas Residuales: Cap. 8. Tratamiento Terciario de las Aguas Residuales.* Ed. Reverté S.A. Quebec Canadá pág. 586-636.

[12] COEURET F., COSTA LOPEZ J, (1992). *Introducción a la ingeniería electroquímica.* Ed. Reverté, S.A. España. pág 313.

[13] Revista Tecnociencia (2001). "Intercambio Iónico".

www.tecnociencia.es/especiales/intercambio_ionico/introduccion.htm.

[14] Universidad Autónoma de Madrid. (2006). *Intercambio Iónico.* Área de Ingeniería Química. pág. 1-2.

www.uam.es/personal_pdi/ciencias/mgilarra/experimentacionIQII/Intercambioionico2006.pdf.

[15] LOIÁCONO R., VUANELLO O., SOLORZA B., MILLÁN M E., TEJADA J. (2005) *Eliminación de Metales Pesados de Efluentes Industriales por Método Electroquímico.* Proyecto de investigación publicado en el V Congreso Nacional Ambiental -PRODEA. San Juan. Argentina. Universidad Nacional de San Juan- Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química.

- [16] SANCHEZ FONT F., LAZARO V., (2007) *Estudio y Diseño de una planta de producción de membranas cerámicas de coste reducido*. Proyecto de Fi Carrera, Enginyer Industrial. Escola Tècnica Superior d' Enginyeria Industrial de Barcelona.
- [17] TARASEVICH Y., KLIMOVA G., (2001) *Complex-forming adsorbents based on Kaolinite, aluminium oxide and polyphosphates for the extraction and concentration of heavy metal ions from water solutions*. Elsevier Science B.V. Applied Clay Science 19. pag. 95 – 101.
- [18] ESTUPIÑAN A., SRMIENTO D., BELALCAZAR A., (1998) *Remoción de Cobre y Niquel por Intercambio Catiónico con una Zeolita Natural*. Revista Colombiana de Química. Vol 27, N° 1.
- [19] BHATTACHARYYA K G., (2005) *Adsorption of Ni (II) on Clays*. Journal of Colloid and Interface Science, 245, pag. 21 – 32.
- [20] YAVUZ Ö., ALTUNKAYNAK Y., GÜZEL F., (2003) *Removal of copper, nickel, cobalt and manganese from aqueous solution by kaolinite*. Water Research 37, pag. 948-952
- [21] VENGRIS T., BINKIENE R., SVEIKAUSKAITE A., (2001). *Nickel, copper and zinc removal from waste water by a modified clay sorbent*. Applied Clay Science, 18, 183-190.
- [22] CARRIAZO J., VARGAS M., SAAVEDRA M., (2005). *Empleo de dos Arcillas Naturales Colombianas en la Eliminación de Iones Metálicos en Solución Acuosa* Scientia et Technica, Año XI, No 28, UTP. ISSN 0122-170, pag 181 – 185.
- [23] MELLAH A., CHEGROUCHE S., (1997). *The Removal of Zinc from Aqueous Solutions by Natural Bentonite*. Elsevier, Wat. Res. Vol 31, N° 3, pag 621-629.

[24] ESCALANTE H., NEIRA G., ESPINOSA M., PICO S M., (2006). *Modificación de Arcilla Caolinítica de la Región de Oiba (Santander) con Bases y Sales para Aumentar la Capacidad de Adsorción de Cobre y Zinc de Efluentes Industriales*. Revista ION, 19 (1): pag. 27-31.

[25] ABOLLINO O., ACETO M., MALANDRINO M., SARZANINI C., MENTASTI E., (2003) *Adsorption of heavy metals on Na- montmorillonite, Effect of pH and Organic substances*. Water Research, 37, pag.1619-1627.

[26] COZ A., ANDRÉS Ana., SORIANO S., IRABIEN Angel., (2004). *Environmental behaviour of Stabilised foundry sludge: journal of Hazardous materials*. Santander. España. Universidad de Cantabria. Departamento de Ingeniería Química y Química Orgánica.

[27] Harada, K. (1985). "Waste Processing Technologies and Risk of Hazardous Wastes". Centro de Investigación en Protección Ambiental (CIPA)-Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR). Costa Rica. Annual Review of Public Health. Vol. 6. pág. 269-294.

[28] Tratamientos de Eliminación Final.

www.cth.gva.es/areas/residuos/res/pir/directiva_general/revpir6c.html.

[29] FANTIN L., WAGNER A., GWYTHYER N., (1997) *Tratamiento de corrientes de desechos oleosos dentro de yacimientos petrolíferos y gasíferos*. Argentina. Empresa ERM Argentina S.A.

[30] CARRILLO K., OVIEDO J., (2003). *Investigación sobre Inertización y Solidificación de Cenizas de in Incinerador en la Industria Petrolera*. Anuario de la Universidad Internacional SEK, N° 8/ 2003, pag.257-267.

[31] ROMERO L., VARGAS M., PADILLA F., (2007) *Desarrollo de la tecnología de inmovilización: estabilización/solidificación de desechos peligrosos en Costa Rica. Estudio de caso en lodo de electrodeposición*. Revista Avances en Química, 2 (3), Centro de Investigación en Protección Ambiental (CIPA) de la Escuela de Química del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR). Escuela de Química de la Universidad Nacional (UNA). pág. 9-14.

[32] ROMERO M., RINCON J M^a., (2000) *El proceso de la vitrificación/cristalización controlada aplicado al reciclado de residuos industriales inorgánicos*. Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción. Dpto. Físico-Química de Materiales. Grupo de investigación de Materiales Vitrocerámicos. Madrid España. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, Vol 39, N° 1, pag. 155-163.

[33] Wiles, C. (1997) “*Solidification and Stabilization Technology*”. En Standard Handbook of Hazardous Waste Treatment and Disposal, Freeman, H. McGraw-Hill, New York. pp 7.31-7.46.

[34] FUESSLE W., TAYLOR A. (2004). Long – term *Solidification/stabilization and Toxicity Characteristic Leaching Procedure for an Electric Arc Furnace Dust*. Dept. of civil Engineering and Construction, Dept. of Chemistry, Bradley Univ. J. Envir. Engrg. Vol 130, Issue 5, pág. 492-498.

[35] BOTASSO G., RIVERA J., FENSEL E., (2006). *Utilización de residuos industriales en la obra vial, experiencias del LEMAC*. Informe: La Planta, Investigaciones Viales, Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional La Plata.

[36] IRABIEN, M.J. (1999). *Vertidos de escorias en el río Oka*. Geogaceta, 25, pag. 111-113. (Reserva Natural de la Biosfera de Urdaibai, Vizcaya): Aspectos

mineralógicos y geoquímicos. Tesis Doctoral. Universidad del País Vasco. Dpto. Mineralogía y Petrología.

[37] Wilson, D., Balkau, F. y Thurgood, M. *Solidificación y Estabilización*. (2005). Manual de Formación en gestión de residuos peligrosos para países en vías de desarrollo. Disponible: www.uneptie.org/pc/hazardouswaste/menu.htm.

[38] CORNNER and HOFFNER. (2007). *Cement Stabilization of Runoff Residuals: A Study of Stabilization/Solidification of Urban Rainfall-Runoff Residuals in Type 1 Portland Cement by XRD and Si NMR Analysis*. *Water, Air, & Soil Pollution*, Volume 188, Numbers 1-4 , pag. 261-270.

[39] SHI C. (2004). *Hydraulic Cement Systems for Stabilization/solidification*. En: *Stabilization and Solidification of Hazardous, Radioactive, and Mixed Wastes* CRC Press, Boca Raton, USA. Editado por R.D. Spence y C. Shi, pag. 49-77.

[40] Glosario Geológico Minero. INGEOMINAS: Instituto Colombiano de Minería y Geología.

www.ingeminas.gov.co/component/option,com_glossary/limit,25/limitstart,450/.

[41] MARTINEZ J., M.Sc. Ing. Qco. Guía para la Gestión Integral de Residuos Peligrosos – Fundamentos Tomo I. (2005). Cap. 10. pág. 100-110.

www.idrc.ca/uploads/user-S/11437516971gr-01_10-tratamiento_pag99-108.pdf.

[42] Información técnica preparada por la National Ready Mixed Concrete Association, 900 spring St., Silver Spring, MD 20910. El Concreto en la Práctica.

[43] WADDELL J., DOBROWOLSKI, J A. Manual de la Construcción con Concreto I, Edición 3. Mc Graw Hill. pág. 11.3-11.20.

[44] American Concrete Institute. ACI Standard 211.1-91, 318-89.

[45] EPA. (1992). Silicate technology corporations solidification/stabilization technology for organic and inorganic contaminants in soils. Applications Analysis Report. No. EPA/540/AR-92/010.