

**ESTABILIZACIÓN/SOLIDIFICACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA
LA DEPOSICIÓN SEGURA DE RESINAS DE INTERCAMBIO
IONICO SATURADAS CON METALES PESADOS.**

SABRINA PAOLA ALBARRAN VERGARA

IVONNE LILIANA RACERO GAVIRIA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
BUCARAMANGA**

2008

**ESTABILIZACIÓN/SOLIDIFICACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA
LA DEPOSICIÓN SEGURA DE RESINAS DE INTERCAMBIO
IONICO SATURADAS CON METALES PESADOS.**

SABRINA PAOLA ALBARRAN VERGARA

IVONNE LILIANA RACERO GAVIRIA

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

Director

HUMBERTO ESCALANTE HERNÁNDEZ

Ingeniero Químico. Ph. D

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2008**

DEDICATORIA

Gracias:

A Dios por darme la Fortaleza en los momentos que no tenía Fuerzas.

A mi Gordá (mi mamá) que me enseñó a luchar por mi sueño para ser alguien.

A mi hermanita que con su voz de aliento hacía parecer las cosas más fáciles.

A mi Tía Bety que con su ayuda incondicional hizo de este sueño una realidad.

A mi papi que a pesar de tantos desaciertos, me brindó su amor y su apoyo incondicional.

A Guille la mujer más generosa con la que uno puede contar, sin ella esta lucha no fuera llegado a su final

A mis mejores amigas Leidys e Ivonne quienes a pesar de nuestras diferencias fueron mi roca de apoyo en esta ciudad.

A toda mi familia que con una sonrisa me llenaban de fuerzas para luchar.

Y a todos los que nos apoyaron en este proyecto y permitieron que se materializase, de verdad muchas gracias.

SABRINA PAOLA ALBARRAN VERGARA

A DIOS DOY GRACIAS HOY....

*Cuando anduve por oscuros caminos con miedo de perderme,
y el frío intenso era la única compañía de este solitario corazón,
allí estuviste tú, siempre conmigo, mi Señor.*

*Cuando necesite que me amarán sin cuestiones o condiciones,
Tú le permitiste a ella que lo hiciera, Te amo Mamá.*

*Las muchas veces que flaqueé ante las múltiples batallas que hacían
presencia en mi mente y mi espíritu; en esos momentos siempre estabas tú, por
medio de esa enorme roca que sostiene esta familia, que con errores y
desamores, es la mía, orgullosamente mía. Gracias abuelos.*

*Gracias Señor, por brindarme la compañía de esos seres maravillosos, de mis
leales compañeros, mi par de negros.*

*Gracias Señor, por enseñarme que el amor es entregar, es dar sin esperar, es
creer sin ver, es perdonar sin recordar.*

*Gracias por hacer presencia en mi vida con todas aquellas personas que me
han adoptado a mí y a mi familia, y que por falta de tinta no alcanzó a
nombrar entre ellas: mis tías (especialmente a ti mi tía universal “la vieja
Luz”), a mis primas, vecinas (Doña Fela esto va para ti), a mis amigas, si
eso son mis amigas, mis hermanas del alma a ellas a Leidys y Sabrina, y a
sus familias muchísimas gracias.*

*Gracias Señor, pero fundamentalmente dedico este logro a aquel ser humano
(y recalco en lo humano), que me dio la vida y me amó hasta donde el tiempo
y el espacio lo permitió, gracias a ti papi, porque tú me enseñaste a soñar y a
ser lo suficientemente obstinada como para convertir lo imposible en realidad,
te amo y eso nunca cambiará.*

Juonne Liliana Racero Gaviria

CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	12
2. DESARROLLO EXPERIMENTAL	19
3. RESULTADOS Y DISCUSION	23
4. CONCLUSIONES	37
5. RECOMENDACIONES	39
6. BIBLIOGRAFIA	40
ANEXOS	45

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Niveles de experimentación para las variables de entrada.	21
Tabla 2. Valores de niveles de experimentación para el Diseño.	21
Tabla 3. Concentración de metales presentes en la resina saturada y en el extracto TCLP.	23
Tabla 4. Mejores condiciones de operación reportadas para el proceso E/S de resinas saturadas y Error estándar para los análisis realizados.	36

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1(a). Concentración de Cobre retenida en las probetas.	24
Figura 1(b). Concentración de Níquel retenida en las probetas.	24
Figura 1(c). Concentración de Cinc retenida en las probetas.	25
Figura 2(a). Concentración de Cobre retenida en las probetas de mezcla.	27
Figura 2(b). Concentración de Níquel retenida en las probetas de mezcla.	27
Figura 2(c). Concentración de Cinc retenida en las probetas de mezcla.	28
Figura 3. Variación de la Resistencia en las probetas Cemento-Resina cargadas con Cu con el tiempo.	29
Figura 4. Variación de la Resistencia en las probetas Cemento-Resina cargadas con Ni con el tiempo.	31
Figura 5. Variación de la Resistencia en las probetas Cemento-Resina cargadas con Zn con el tiempo.	32
Figura 6. Variación de la Resistencia en las probetas Cemento-Resina cargadas con mezcla de Cu, Ni y Zn con el tiempo.	33
Figura 7. Influencia del pH en la Resistencia.	35

TITULO: ESTABILIZACIÓN/SOLIDIFICACION, UNA ALTERNATIVA PARA LA DEPOSICION DE RESINAS DE INTERCAMBIO IONICO SATURADAS CON METALES PESADOS.*

AUTORES:** Sabrina Paola Albarran Vergara
Ivonne Liliana Racero Gaviria

PALABRAS CLAVES: Inertización, Estabilización/Solidificación, intercambio iónico, Amberlita-IR120, test de lixiviación.

RESUMEN

Los procesos de la actividad de transformados metálicos generan efluentes con elevadas concentraciones de cobre, níquel y cinc. Como una alternativa para solucionar este problema ambiental, se reduce la concentración de estos metales pesados con la técnica de adsorción por intercambio iónico con la Amberlita-IR120. De estos procesos se obtiene un efluente libre de contaminantes, pero se generan grandes volúmenes de resinas de intercambio iónico que son catalogadas por el Procedimiento de Lixiviación Característico de Toxicidad (TCLP) como residuos tóxicos y peligrosos, debido a su elevada concentración de iones contaminantes. En este trabajo de investigación se propone disminuir el carácter tóxico de este residuo, de tal manera que pueda ser depuesto de forma segura en un vertedero, mediante un proceso de Estabilización/Solidificación, en una matriz de cemento Portland. Los resultados obtenidos muestran que es posible disminuir hasta por debajo de los límites establecidos por la normatividad ambiental la migración de metales al ambiente contenidos en resinas saturadas con alta concentración de cobre, níquel y zinc en una matriz de cemento Portland, arena fina, gravilla y agua. Se obtuvieron monolitos con alta retención de iones móviles y valores de resistencia de alrededor de los 1800 psi. Los productos de la Estabilización/Solidificación se pueden emplear en la industria de la construcción en: Antepisos y losas sin refuerzo.

*Trabajo de grado

Director Ph. D. Humberto Escalante Hernández, Universidad Industrial de Santander, Facultad de Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química, Bucaramanga, Colombia.

TITLE: STABILIZATION/SOLIDIFICATION, AN ALTERNATIVE FOR THE DEPOSITION OF HEAVY METAL LOADED RESINS OF IONIC EXCHANGE.¹

AUTHORS²: Sabrina Paola Albarran Vergara
Ivonne Liliana Racero Gaviria

KEYWORDS: Inertization, stabilization/solidification, ionic exchange, Amberlite-IR120, lixiviacion test.

ABSTRACT

The processes of the activity of transformed metallic generates effluents on a large scale polluted with high concentrations of copper, nickel and zinc. As an alternative to solve this environmental problem, the concentration of these heavy metals decreases with the technique of adsorption for ionic exchange with the Amberlite-IR120. From both processes an effluent free of pollutants is obtained, but big volumes of resins of ionic exchange are generated that are classified by the Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) as toxic and dangerous wastes (because of its high concentration of heavy metals) is generated as well. A process for diminishing the toxicity of the above mentioned solid waste by means of a stabilization/solidification process in a Portland cement matrix is proposed in this research work. This way, the resins could be safely disposed in a rubbish dump. The obtained results show that decreasing migration of metal ions from loaded resins in a matrix of Portland cement, fine sand and gravel to the environment, down to a level below the official regulations is possible. Monoliths were obtained with high retention of mobile ions and resistance values of around the 1800 psi.

*Work degree.

** *Managing Ph.D. HUMBERTO ESCALANTE HERNÁNDEZ, Universidad Industrial de Santander, Abilityde physiochemical, School of Chemical Engineering Bucaramanga, Colombia.*

INTRODUCCIÓN

Los procesos de la actividad de transformados metálicos generan efluentes con elevadas concentraciones de cobre, níquel, cinc y cianuros disueltos [1]. Si estos efluentes son vertidos a la red urbana de alcantarillado, sin ningún tratamiento, ocasionan un grave problema ambiental. En Colombia, el protocolo por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral, está contemplado en el decreto 4741 del 30 de Diciembre de 2005 [2]. La descarga al alcantarillado público está controlada por las autoridades ambientales de Colombia según el decreto 1594 de 1984 el cual establece límites para el vertido de 3mg/l para el Cu, 2 mg/l para el Ni y 5 mg/l para el Zn.

La toxicidad y/o peligrosidad de un residuo sólido o de un efluente se determina mediante protocolos especializados, ampliamente reconocidos por la comunidad internacional. Las pruebas que comúnmente se realizan para determinar la toxicidad de un residuo son la US-EPA-TCLP, DIN 38414-S4 y EN 12457 [3,4]. En el TCLP, se utiliza ácido acético como lixiviante para simular la generación de ácidos orgánicos en basureros municipales de desechos sólidos. Al contrario, en los protocolos DIN 38414-S4 y EN 12457, se emplea agua para evaluar la movilidad de los iones contaminantes.

La reducción de la concentración de metales tóxicos, presentes en un efluente, puede darse mediante: precipitación química (como hidróxido y con sulfuros), intercambio iónico, electrodiálisis, ultra-filtración y ósmosis inversa. La técnica de intercambio iónico ha sido desarrollada como una de las mejores opciones para el tratamiento de este tipo de aguas residuales [5]. El uso de resinas selectivas permite reducir la concentración residual de los metales pesados, por debajo de los niveles de concentración recomendados por la normatividad ambiental [5].

Las resinas de intercambio iónico son materiales orgánicos sintéticos compuesto por una matriz polimérica reticulada, por la acción de un agente entrecruzante y derivatizada con grupos inorgánicos que actúan como

grupos funcionales [5]. Esta alternativa de tratamiento ha sido ampliamente utilizada por las generadoras de Energía Nuclear a base de Cesio [6], en la limpieza y depuración de efluentes, y la desionización y purificación del agua de alimentación de procesos especiales [7], y en el sector de la industria galvánica que busca disminuir la concentración de metales pesados en las aguas residuales [5].

Aunque las resinas de intercambio iónico favorecen la disminución de la concentración de metales pesados en los efluentes acuíferos, deben ser constantemente regeneradas o eluidas después de alcanzar su punto de ruptura [8], con soluciones básicas o ácidas hasta alcanzar su elusión final (capacidad de adsorción despreciable o nula) [9], después de la cual la resina no puede volver a ser utilizada. Experimentalmente, se ha determinado que para soluciones lixiviadas y clarificadas en proceso continuo, las resinas tienen una vida útil no menor a dos años [9,10]. Este lapso de tiempo puede disminuir si existen iones que envenenen la resina, difíciles de eluir (CN-) [10]; los cuales al trabajar a elevadas temperaturas, actúan degradando los grupos funcionales.

El tratamiento de los efluentes provenientes de la industria de galvanoplastia con resinas de intercambio iónico produce elevados volúmenes del polímero saturado o agotado con altas concentraciones de iones de metales pesados [11], los cuales al no ser química ni biológicamente degradables representan una amenaza para la salud humana por lo que es necesario adelantar una disposición adecuada de estos residuos.

Los estudios que se han realizado hasta la fecha sobre el tratamiento de resinas de intercambio iónico saturadas se han centrado en las diferentes técnicas de recuperación de metales, la posible aplicación industrial de resinas saturadas ó la mejor forma de deponerlos en un vertedero de seguridad. Entre las técnicas de recuperación de metales se encuentran la sulfidación [12] y la adsorción y electrodeposición [13]. Estos procesos presentan eficiencias de recuperación de los metales aceptables, hasta de un 60% [14]; sin embargo son de difícil implementación industrial en las

pequeñas y medianas empresas. Por la anterior situación, la opción más atractiva para estabilizar estas resinas saturadas de contaminantes, es emplear la tecnología de estabilización /solidificación que permitirá la deposición segura del residuo en una celda de seguridad que garantice la no contaminación de las aguas superficiales y subterráneas y la ausencia de malos olores.

La Inertización es un proceso químico que minimiza el nivel de toxicidad de los residuos, para su posible reutilización o disposición final. Una de las aplicaciones de inertización a nivel industrial más estudiada es la vitroceramización [15,16]. Diferentes residuos como los lodos de fundición [17] y resinas de intercambio iónico empleadas en plantas nucleares [6] han sido tratados y estabilizados mediante inertización.

La Estabilización/Solidificación (E/S) permite reducir la movilización de los iones contaminantes, mejorar el manejo del residuo, y disminuir la superficie expuesta a la transferencia o pérdida de los contaminantes [17]. AGUEDA, H.C., GONZALEZ, O. [6] incineraron resinas saturadas con iones de Cesio, para su posterior inmovilización en una matriz vítrea; encontrándose que las altas temperaturas que se deben manejar para la completa incineración de las resinas (material orgánico e inorgánico) dificultan y encarecen el proceso. Ruiz e Irabien [18] emplearon cemento Pórtland y cal, como encapsulante, y carbón activado y carbón negro, como aditivos para la inertización de lodos de fundición; determinando que la cal ocasiona la precipitación de los metales y dificultan el fraguado de los monolitos. Valls S. y Vázquez E [19], crearon una matriz encapsulante con cemento y cemento-ceniza para estabilizar lodos provenientes del proceso de digestión anaeróbica durante el tratamiento de aguas residuales urbanas. Estos estudios determinaron que la velocidad de hidratación aumentó con la adición del acelerador CaCl_2 ; además, la calidad de las mezclas mejoró con Cemento Pórtland I 45/A (resistencia media-alta) en comparación con el Pórtland I 35/A (resistencia media). Las pastas de cemento de mejor eficacia en cuanto a mayor retención de metales, menor tiempo de fraguado y mayor resistencia son las que contenían 25% de lodo y 10% de ceniza de carbón sin agregar acelerador.

Gassó y Baldasano [20], estudiaron la eficacia de la Estabilización/Solidificación (E/S) de residuos de incineración de desechos sólidos urbanos con cemento de aluminato de calcio (CAC/R), comparando la E/S de estos residuos con cemento Pórtland. El estudio del comportamiento del CAC/R en la E/S de estos residuos presentó mayor resistencia a la compresión y mayor retención de los metales en la matriz encapsulante debido a la alta resistencia química al ataque por sulfatos, cloruros y medios ácidos que presenta el cemento de aluminato de calcio. R. Fuoco [21] y colaboradores, encapsularon las cenizas volantes provenientes de una planta de incineración de desechos urbanos en una matriz de resina de poliéster, para comparar estos resultados con los del proceso Estabilización/Solidificación convencional basado en el uso del cemento Pórtland. Se determinó que la matriz de poliéster presenta una mayor eficiencia, ya que disminuye mucho más la concentración de los contaminantes orgánicos e inorgánicos (Cu, Cd y Pb) que la matriz de cemento. Magnin y Aubert [22], patentaron el procedimiento de inmovilización de resinas de intercambio iónico cargadas con iones radioactivos por medio de una matriz de cemento. En este procedimiento se ponen en contacto durante 3 o más horas la resina con una disolución eluyente de 300 g/L de nitrato de calcio a razón de 1 a 2 L/Kg de resina; a un pH de 9 se añade el cemento de calor de hidratación bajo, de forma que la relación de agua de la disolución eluyente-ligante (en peso) está comprendida entre 0.3 y 0.5 y que el porcentaje de residuo encapsulado varía en el intervalo 3-10%. Los resultados obtenidos garantizan que la concentración de los iones radioactivos disminuye de un 70 a 75% en 3 años, lo cual permite que los monolitos elaborados en el procedimiento se puedan disponer en celdas de seguridad.

El concreto u hormigón es una masa heterogénea constituida básicamente por: cemento, agua, agregados y algunas veces aditivos. La matriz encapsulante a base de cemento presenta la característica que al alcanzar un fraguado completo resiste esfuerzos mecánicos de compresión [23]. Los agregados o áridos, constituyen el material llenante del concreto y

están compuestos por una parte fina y por otra gruesa. Al agregado fino comúnmente se le conoce como arena y al agregado grueso como grava o piedra triturada. La diferencia entre la arena y la grava se ha establecido en forma conveniente y arbitraria tomando como base su tamaño. En general la arena presenta diámetro inferior a 5 mm, mientras que la grava tiene un diámetro superior a los 5mm. La función principal de los agregados es evitar que se formen grietas durante el proceso de fraguado de la pasta de cemento (agua, aire, cemento), y así incrementar la resistencia del hormigón a los esfuerzos de compresión.

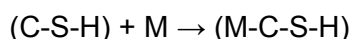
El cemento Pórtland es un ligante hidráulico, que se endurece al contacto con el aire o con el agua (proceso de hidratación) dando lugar a una acción inicial de fraguado (reacción química), que a su término convierte la masa plástica de concreto fresco en una masa endurecida e indeformable. El agua que se emplea para hidratar el cemento se conoce como agua de mezclado, está constituye aproximadamente el 15 % del volumen total del concreto de donde un 5% sirve para la hidratación y el 10% restante lubrica el concreto y luego se evapora durante el proceso de fraguado.

La relación de agua-cemento (A/C) se determina básicamente por requisitos de Resistencia, durabilidad, impermeabilidad y acabado. La selección de la relación A/C se debe hacer con base en el desarrollo de gráficas en donde se relacione la Resistencia a la compresión y la relación A/C [24]. Sin embargo, la industria de la construcción recomienda que la relación agua-cemento mínima debe ser 0.35. La relación A/C es importante en el diseño de los morteros. Al aumentar la cantidad de agua en una mezcla (hormigón), se está incrementando la masa de agua que se evapora, ya que la cantidad de agua de hidratación del cemento permanece constante. El exceso de agua, se queda atrapado en el interior del concreto y al producirse la evaporación se forma una serie de conductos capilares que se llenan de aire, generando un concreto endurecido poroso, menos resistente y más permeable.

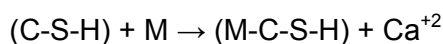
En la estabilización de metales con cemento, estos son retenidos como hidróxidos o carbonatos en la estructura solidificada del concreto, como

resultado del elevado pH (mayor de 11). El Cemento Pórtland [24] ofrece una encapsulación física y una fijación química mediante la inmovilización de los iones metálicos (M) por su principal producto de hidratación (Silicato de calcio hidratado S-C-H). Metales como Pb, Cu, Zn, Sn y Cd se unen a la matriz por fijación química. El níquel se convierte en hidróxido, mientras que el mercurio es retenido por encapsulación física, dependiendo de las propiedades del complejo S-C-H (S-C: diferentes estructuras de silicato de calcio presentes en el cemento), de la relación Ca/Si y del pH. La cristalización que realiza el cemento, durante la etapa del fraguado, y que permite encapsular un metal puede ser descrito por las siguientes reacciones:

a) Inmovilización por adición de nuevas reacciones:



b) Inmovilización por reacciones de sustitución:



Al llevarse a cabo estas reacciones, se produce una pérdida de humedad por evaporación que le impide a los granos de cemento hidratarse totalmente. Dicha pérdida de agua causa contracción y agrietamiento del concreto debido a los esfuerzos de tensión que se generan [25].

Después de aproximadamente 24 horas el concreto inicia su etapa de endurecimiento o Curado. Durante el proceso de hidratación del cemento se mantiene un contenido de humedad satisfactorio y una temperatura favorable en el mortero, de manera que se desarrollen en el hormigón las propiedades deseadas. Durante este período la Resistencia del Concreto se incrementa con el tiempo, obteniéndose un valor máximo aproximadamente a los 28 días de envejecimiento [24]. Para evaluar la Resistencia de un concreto con el tiempo, es recomendable realizar una serie de probetas, en las cuales se conserve la relación diámetro longitud de 1:2 [23].

El objetivo principal de este trabajo de investigación fue emplear la tecnología de inertización para deponer de forma segura unas Resinas de Intercambio Iónico saturadas con iones de Cu, Ni y Zn. Las resinas se

utilizaron para reducir la concentración de metales presentes en los efluentes, provenientes de las actividades productivas, de una empresa de electrorrecubrimientos de piezas metálicas. Como matriz encapsulante se utilizó un hormigón formado de cemento Pórtland, arena fina, gravilla de piedra de $0,7 \pm 0,2$ cm de diámetro y agua. Se estudiaron las posibles interacciones entre la máxima y mínima relación de agua/cemento (mín.:0.5; máx.: 0.56), contenido de residuo (mín.:10%; máx.:15%) y el contenido de cemento (mín.:1; máx.:2), para determinar los efectos principales en la calidad estructural del concreto (Resistencia a la compresión) y en la ecotoxicidad y movilidad de los tres metales contenidos por la matriz y así, analizar la viabilidad del proceso de Estabilización/Solidificación de la resina saturada.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Como materia prima para este estudio se utilizó la resina Amberlita-IR120, que es catiónica ácida fuerte, altamente ionizable, que opera en un rango de pH de 1-14, de bajo costo comercial y distribuida por Rohm and Haas Colombia. Diferentes muestras de la resina se saturaron con cinc, cobre, níquel, y con una mezcla de los 3 metales. Se cargó la resina con una solución sintética de concentración 100 ppm para los tres metales de estudio, simulando las altas concentraciones presentes en los efluentes líquidos de una empresa de electrorrecubrimientos de piezas metálicas.

La caracterización tóxica de la resina se evaluó con base en un ensayo de lixiviación [TCLP], reconocido por la comunidad europea (Method 1311 of SW-846. U.S.EPA.) [27] para simular el contacto entre el residuo sin encapsular y ácidos orgánicos generados en basureros municipales de desechos sólidos. Para esta prueba de toxicidad se calculó el pH de la resina en una solución acuosa y se determinó el tamaño de la partícula midiendo el %de resina retenida en las mallas de los tamices 16, 18, 22, 40, 60. Posteriormente, se pesó 5g de resina saturada los cuales entraron en contacto con el fluido extractor No 1, compuesto por 64.3 mL de NaOH 1N y 5.7 mL de ácido acético glacial diluidos a 1L. Finalmente se determinó la movilidad de los iones, presentes en la resina saturada, y que fluyen al extracto lixivante, mediante absorción atómica en un espectrofotómetro marca Perkin Elmer 2380.

La inertización se realizó usando la técnica de Estabilización/Solidificación por medio de una matriz encapsulante de cemento ya que es una tecnología de bajo costo, fácil aplicación y requiere de materiales que se encuentran bien ofertados en el mercado de la construcción así como la posible reutilización industrial en el mismo [21]. Para la elección del fluido extractor, se pesó 5g de matriz-resina saturada, se macero hasta un diámetro de partícula de 1 mm y se adicionó 96.5 mL de agua destilada. La mezcla se agitó durante 5 minutos. Mediante un electrodo de platino Metrohm modelo 6.0258.000 se determinó el pH de la solución ($\text{pH} > 5$). Siguiendo el procedimiento reconocido por la comunidad europea (Method

1311 of SW-846. U.S.EPA) [27] se agregó 3.5 mL de HCl 1 N, agitando durante 30 segundos. La disolución se calentó hasta ebullición y se dejó hervir durante 2 minutos. Después de enfriar a temperatura ambiente la solución se midió nuevamente el pH para determinar el fluido lixiviante. Debido a que el pH fue > 5 se utilizó el fluido N°2, este se obtuvo diluyendo 5.7 mL de ácido acético glacial con agua destilada hasta 1 litro. El pH fue de 2.88 ± 0.02 .

Para establecer las mejores condiciones de operación, que garanticen una excelente matriz encapsulante de los metales presentes en la Amberlita-IR120, se planteó un diseño factorial de la forma 2^k [28], donde K es el número de variables a la entrada. El objetivo del estudio fue determinar la cantidad de residuo que puede ser incluida en la matriz de cemento, manteniendo unas características del monolito que garanticen su correcta deposición. En el diseño de la matriz encapsulante se determinó la cantidad de agua en la mezcla, el contenido de cemento y se eligió aquellas relaciones con excelente grado de manejabilidad en fresco. La máxima relación A/C se fijó como 0.56 y la mínima en 0.5, teniendo en cuenta las recomendaciones para aditivos poliméricos [26]. Con el fin de mejorar la cohesividad entre las partículas y garantizar la inmovilización de las resinas se dejó constante la relación del contenido de áridos [26]. La variación del contenido de cemento en la matriz, dio lugar a un nivel de experimentación máximo y mínimo de 2:1:1 y 1:1:1 respectivamente. En cuanto a la variable masa de resina a encapsular se plantearon dos niveles de experimentación 10 y 15%, teniendo en cuenta los criterios de manejabilidad en fresco de la mezcla, la resistencia inicial de las probetas y la apariencia de las probetas [24].

El diseño generó un total de ocho experimentos, con duplicado para las cuatro soluciones que se estudiaron (individuales de Cu, Ni, Zn y mezcla de los tres); adicionalmente se realizaron cuatro experimentos, de parámetros iguales, de forma aleatoria, con el objetivo de proteger los resultados de variables ocultas. La base de cálculo de la cual se partió fue de 100 g para la matriz Encapsulante (cemento-arena y gravilla) siguiendo los estándares internacionales [29].

En la tabla 1 se presenta la selección de los valores máximos y mínimos de variables para el diseño.

Tabla 1. Niveles de experimentación para las variables de entrada.

Matriz encapsulante	<i>Nivel máximo +</i>	2:1:1
M (cemento: arena:grava)	<i>Nivel mínimo -</i>	1:1:1
Porcentaje de Residuo	<i>Nivel máximo +</i>	15
R	<i>Nivel mínimo -</i>	10
Cantidad de agua (g)	<i>Nivel máximo +</i>	56
A	<i>Nivel mínimo -</i>	50

Los Valores de niveles de experimentación para el Diseño se muestran en la Tabla 2:

Tabla 2. Valores de niveles de experimentación para el Diseño.

Variables	Experimento							
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
M	2:1:1	2:1:1	1:1:1	1:1:1	1:1:1	1:1:1	2:1:1	2:1:1
A/C	0,56	0,56	0,56	0,56	0,50	0,50	0,50	0,50
%R	10	15	15	10	15	10	10	15

Los resultados del diseño se analizaron con la ayuda del software Statgraphics versión 5.1. La elaboración y acondicionamiento de las probetas se realizó siguiendo la Norma ICONTEC 560. Las probetas se fundieron en moldes de PVC cilindros de 2.54 cm de diámetro y 5 cm de longitud. Los moldes se llenaron en tres capas de igual altura con la mezcla de hormigón-resina en estado fresco. Cada capa se apisonó con 25 golpes aplicados a diferentes sitios de la superficie del concreto; proporcionados con una varilla de ½ pulgada de diámetro. Luego de la compactación, se completó el molde con más mezcla y se pulimentó la superficie con una espátula. Se consideró un tiempo total de fraguado de

28 días, desencofrando probetas al día 4, 7, 14, 21 y 28; para realizar las posteriores pruebas de compresión en una máquina universal de ensayos marca Trebel, la cual aplicó carga sobre la superficie superior de la probeta a una velocidad de 10 mm/min [26].

Para la elaboración de los blancos o probetas prototipo se empleó la misma dosificación en las cuatro matrices estudiadas. El blanco 1 (B1) presentó una relación A/C igual a 0.56 y una dosificación de 2:1:1. El blanco 2 (B2) empleó las relaciones A/C y cantidad de cemento y áridos 0.56 y 1:1:1 respectivamente. Se utilizó una dosificación de 1:1:1 y una proporción agua/cemento de 0.50 en el blanco 3 (B3). Finalmente, para el blanco 4 (B4) se mezcló una cantidad cemento: arena: gravilla de 2:1:1 con el mínimo contenido de agua respecto al cemento (0.50).

Para el test de lixiviación se siguió el protocolo que describe la Unión Europea [27]. Después del ensayo de compresión, se disminuyó el tamaño de las probetas a un diámetro de partícula de 1mm. A una masa de 5g de cada muestra se adicionó 100 mL del fluido extractor N° 2 (5.7 mL de ácido acético glacial diluidos en 1 L de agua; pH = 2.88), la mezcla se envaso en tubos con tapa rosca y se sometió a agitación durante 18 horas. La mezcla se filtro y al licor se le determinó la concentración de metales, mediante Espectroscopia de Absorción Atómica. Por medio de un balance de masa global se determino la concentración de metal presente en la matriz encapsulante.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La tabla 3 muestra la concentración de Cu, Ni y Zn presente en la resina sin encapsular y en el licor producto del ensayo TCLP, además, indica la concentración máxima permitida en los vertimientos líquidos según el decreto 1594/84 de la regulación ambiental colombiana [30].

Tabla 3. Concentración de metales presentes en la resina saturada y en el extracto TCLP.

Metal	Concentración Inicial (ppm.)	Concentración TCLP (ppm.)	Concentración Máxima (ppm). Decreto 1594/84
Cu	97.33	3.5	3.0
Ni	99.80	2.3	2.0
Zn	94.67	5.7	5.0

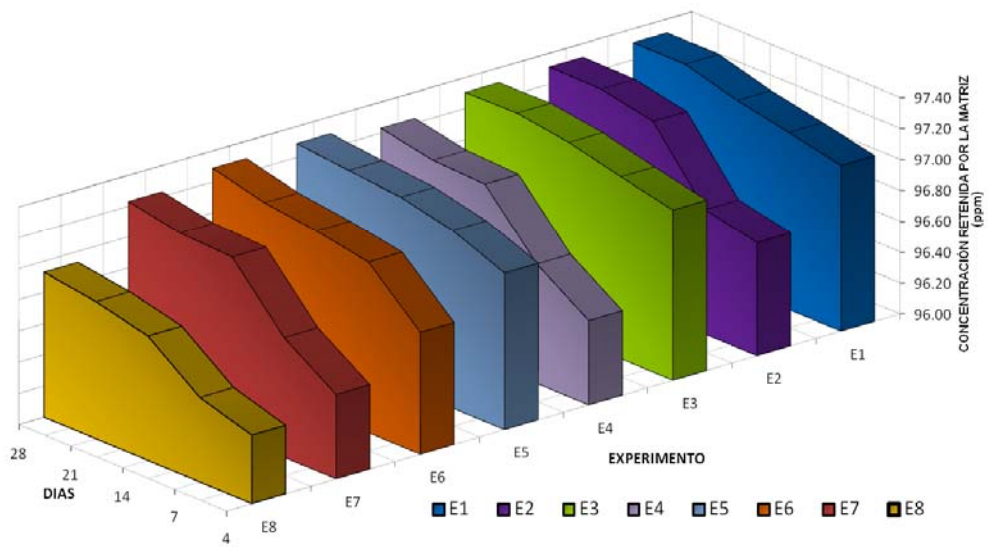
Como los lixiviados de Cu, Ni y Zn incumplen el decreto 1594/84 [30], la Amberlita IR-120 saturada, es clasificada como un residuo tóxico y peligroso. Por lo tanto, antes de la disposición final de la resina saturada es necesario tratarla con una tecnología de estabilización/solidificación que garantice la inertización de los metales.

Además de esta denominación, en la caracterización toxicológica de la resina cargada se determinaron otras propiedades del residuo como: la densidad (1.26 g/mL) y el tamaño de la partícula (0.8 mm).

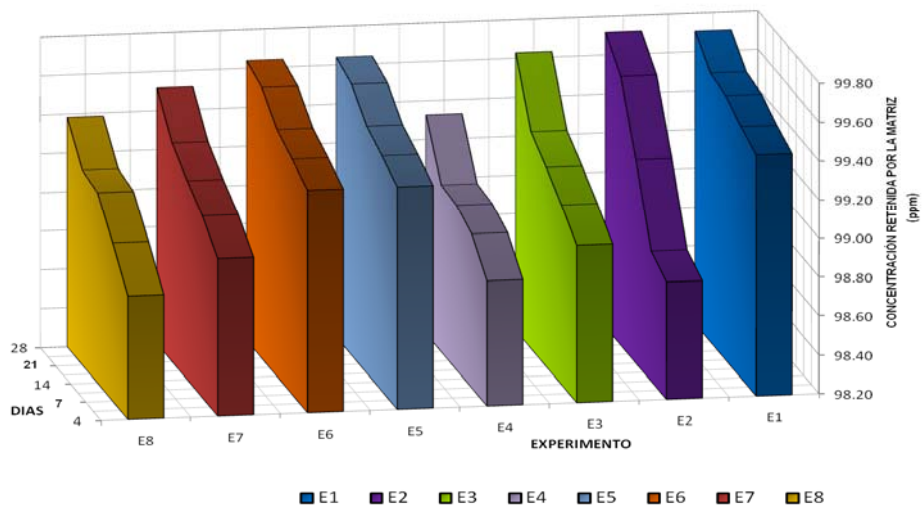
Evaluación de la capacidad de la mezcla Cemento-Arena-Grava para encapsular Cu, Ni y Zn.

La capacidad de encapsular los iones de Cu, Ni y Zn para cada relación matriz-residuo se puede observar en las graficas 1 (a), (b) y (c); en donde se representa la concentración del metal retenido en el monolito, para cada uno de los experimentos y durante los 28 días de curado.

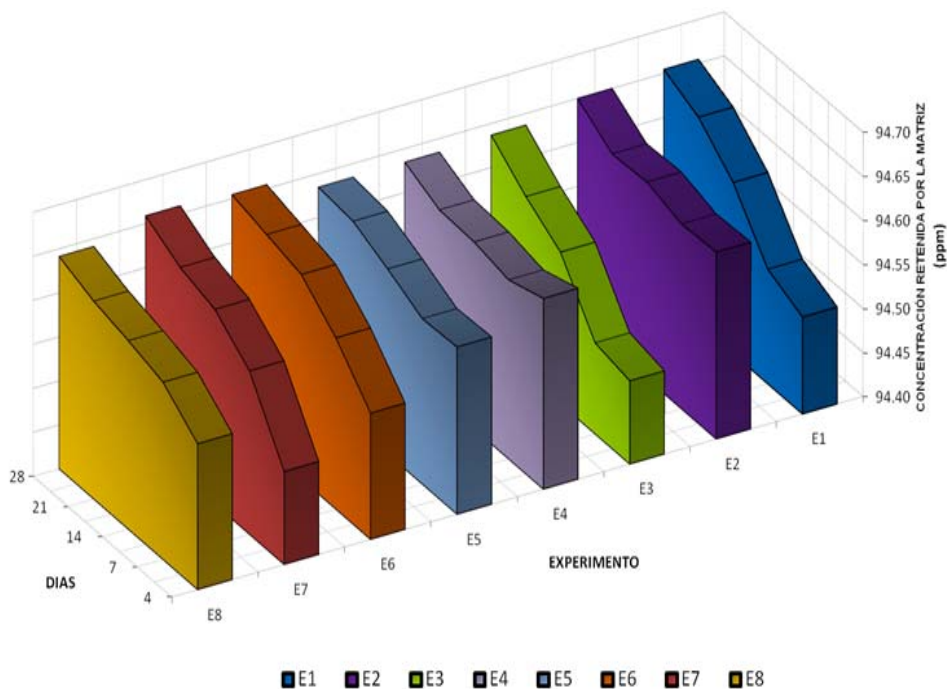
Figura 1. Concentración de Cobre (a), Níquel (b) y Cinc (c) retenida en las probetas.



(a)



(b)



(c)

La lixiviación de iones de Cobre, Níquel y Zinc al ambiente representa el índice más importante en el sentido de seguridad y garantía que otorga el éxito en la aplicación de la técnica de Estabilización/Solidificación. La concentración de iones retenidos por las matrices de Cu, Ni y Zn, se determinó por medio de un balance de masa entre la concentración inicial de los metales presentes en la resina y la concentración de iones de los mismos en el licor de la lixiviación. En las figuras 1 (a), (b) y (c) se aprecia que la concentración de iones de metales que migran al ambiente disminuye con el tiempo, para el caso de los tres metales y de los experimentos realizados. El comportamiento tóxico de la resina saturada se redujo después de la encapsulación hasta 88.54%, 79.48% y 64.69% para las matrices de Cu, Ni y Zn respectivamente. El bajo porcentaje de retención que presentó la matriz de Zn puede ser ocasionado por la alta movilidad que presentan los iones de Zinc en un medio alcalino, como es la pasta de cemento [18]. Se encontró que la dosificación de la mezcla cemento: arena: gravilla no afecta apreciablemente la migración de los metales al ambiente, por el contrario, se determinó que para bajas

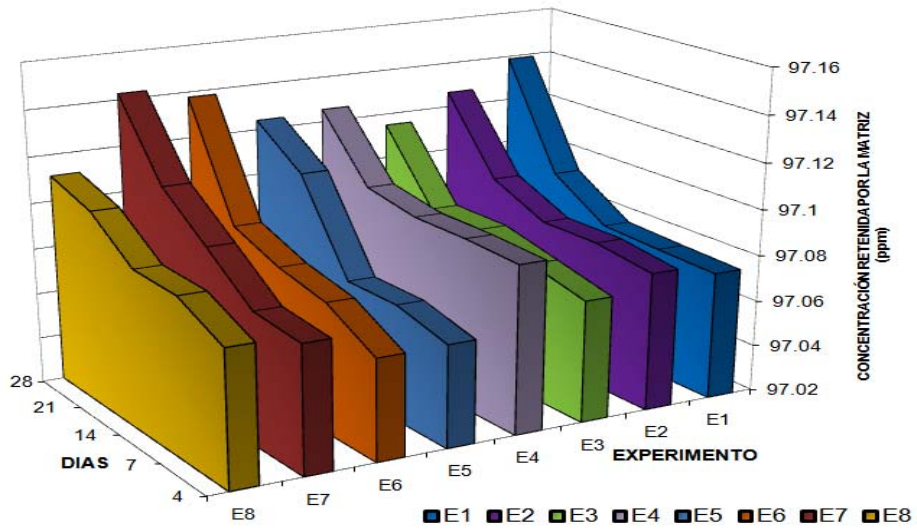
relaciones A/C (0.50), máximo porcentaje de residuo (15%) y diferente dosificación como en el caso de los experimentos 5 y 8 (E5 y E8) la concentración de iones retenidos en la matriz disminuye, siendo más favorable aquellas matrices que contenían mayor relación de agua/cemento (0.56) y menor cantidad de resina (10%) como es E1.

Las bajas concentraciones de metales en el extracto TCLP, se deben a que posiblemente el fluido lixivante no pasó a través del material (en el interior de los poros) sino alrededor de él [17], es decir, se afectó la difusión molecular de contaminantes dentro del monolito, a causa de la baja porosidad que mostraban las probetas. Otros factores de la cinética química que probablemente afectaron la difusión molecular de los iones de los metales dentro de la matriz son la polaridad del lixivante y los monolitos, y la acumulación de partículas de resina cargada en los poros de la superficie de los cilindros [17].

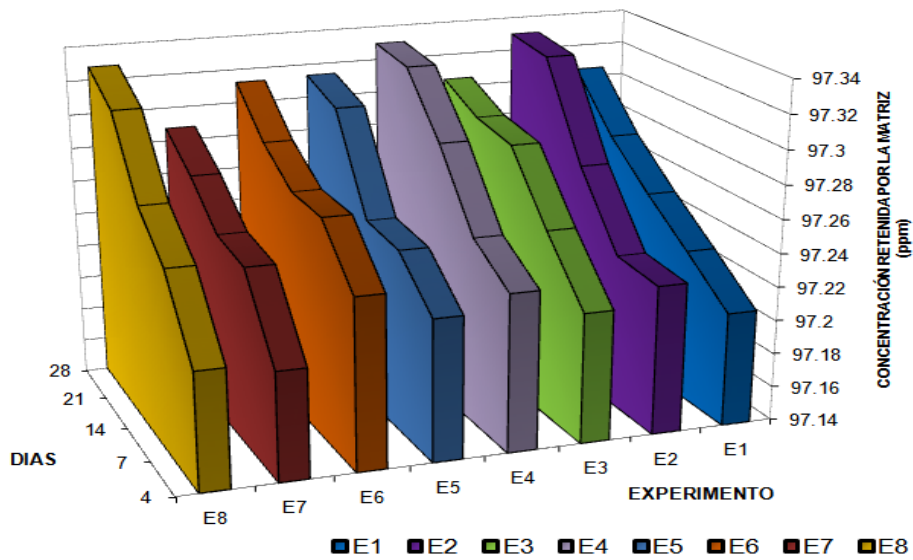
Por último, se verificó que la concentración de iones móviles (o migratorios) de las matrices de Cu, Ni y Zn no superó la normatividad ambiental (decreto 1594/84), esto se observa en el experimento 8 (E8) para los tres metales, el cual como se enunció con anterioridad posee las concentraciones de lixiviación más altas de iones de Cu, Ni y Zn (0.3968 ppm, 0.401 ppm y 0.4179 ppm respectivamente).

El comportamiento de la movilidad de los contaminantes en la matriz encapsulante de la resina cargada con la mezcla de Cu, Ni y Zn se expone en las figuras 2 (a), (b) y (c).

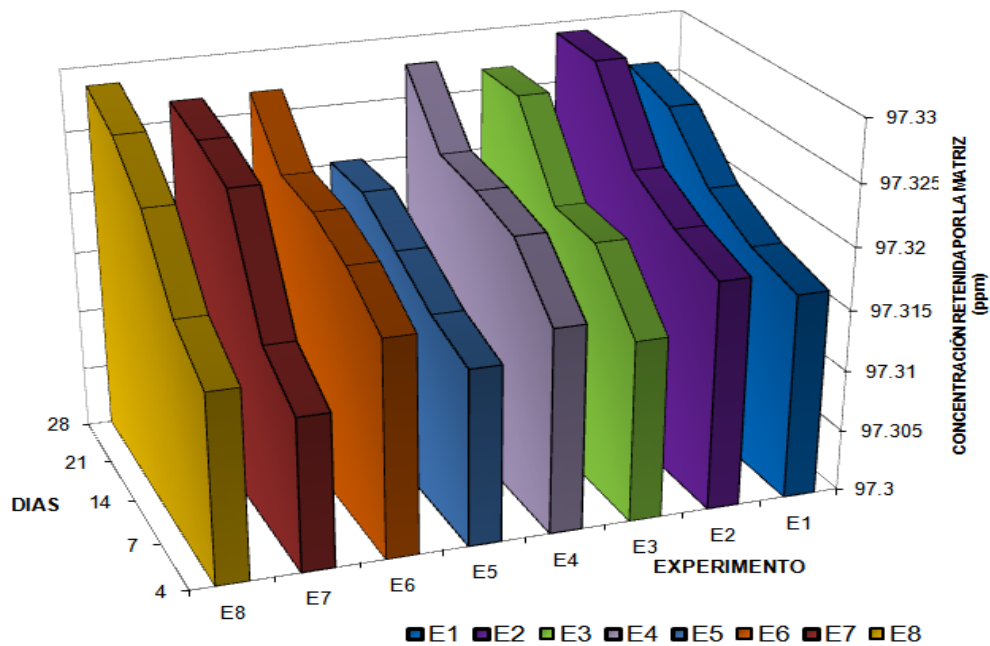
Figura 2. Concentración de mezcla de Cobre (a), Níquel (b) y Cinc (c) retenida en las probetas.



(a)



(b)



(c)

La lixiviación para la matriz encapsulante de la mezcla de los tres metales, presentó valores similares a los resultados de las matrices de Cu, Ni y Zn individuales. Por lo tanto, se corrobora que la retención de los metales en el monolito mejora con el tiempo, además, las condiciones más favorables para la no-migración de iones al ambiente son: menor cantidad de residuo (10%) y mayor contenido de agua (relación agua/cemento igual a 0.56). También se observa que para el caso de la matriz de la mezcla los experimentos que mejores resultados dieron fueron aquellos que presentaron mayor dosificación de cemento (2:1:1) tales como E1 y E7.

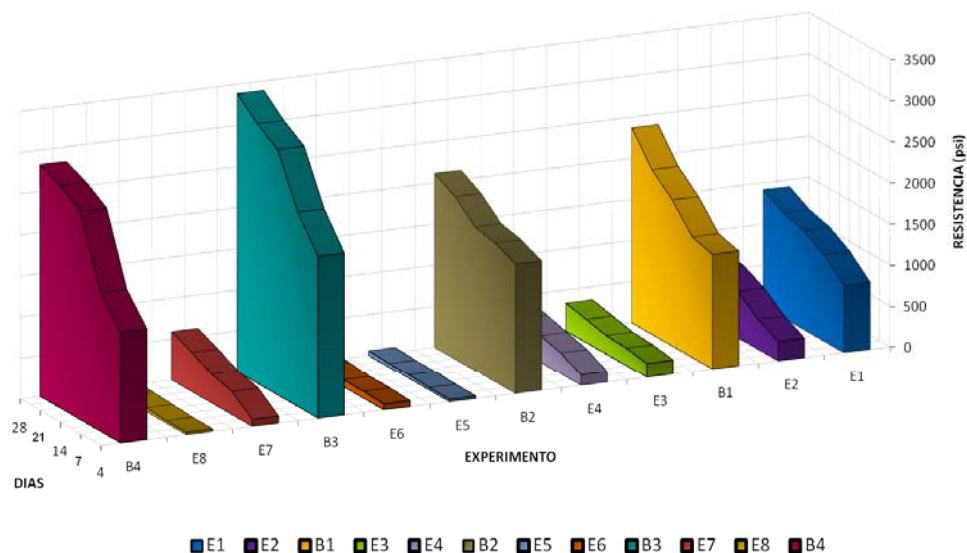
De nuevo se cumple con la normatividad colombiana que regula la concentración de estos metales en el ambiente. En las figuras 2 (a), (b) y (c) se observa que la mayor concentración de lixiviados de Cu, Ni y Zn en la matriz de la mezcla se obtuvo en el experimento E5, el cual contenía la menor dosificación (1:1:1), relación agua/cemento (0.50) y porcentaje de resina (15%). El valor de las concentraciones del licor del TCLP fue 0.1059 ppm para el Cu, 0.2655 ppm para el Ni y 0.0156 ppm para el Zn. La razón por la cual el Zn presentó la menor concentración de iones en el extracto TCLP para los cilindros de la mezcla, se debe a la selectividad de la

amberlita-IR120 (Ni>Cu>Zn en soluciones acuosas), es decir, la resina posee una menor capacidad de adsorción para el Zn al contrario del Cu y el Ni, por lo que la concentración del cinc lixiviado será menor en comparación con el cobre y el níquel que presentan mayor concentración de iones en la resina cargada [5].

Evaluación de la posible aplicación industrial de la matriz-resina en el sector de la construcción

Los resultados obtenidos de los ensayos de Resistencia a la compresión para las probetas de las matrices encapsulantes de Cobre, Níquel, Cinc y Mezcla, se presentan en las figuras 3, 4, 5 y 6 respectivamente. En estas figuras se grafican los diferentes valores de Resistencia para los cilindros fallados, para cada uno de los experimentos y durante los 28 días de fraguado. También se muestra la resistencia para las 4 probetas prototipo o blancos de las diversas dosificaciones que se estudiaron.

Figura 3. Variación de la Resistencia en las probetas Cemento-Resina cargada con Cu con el tiempo.

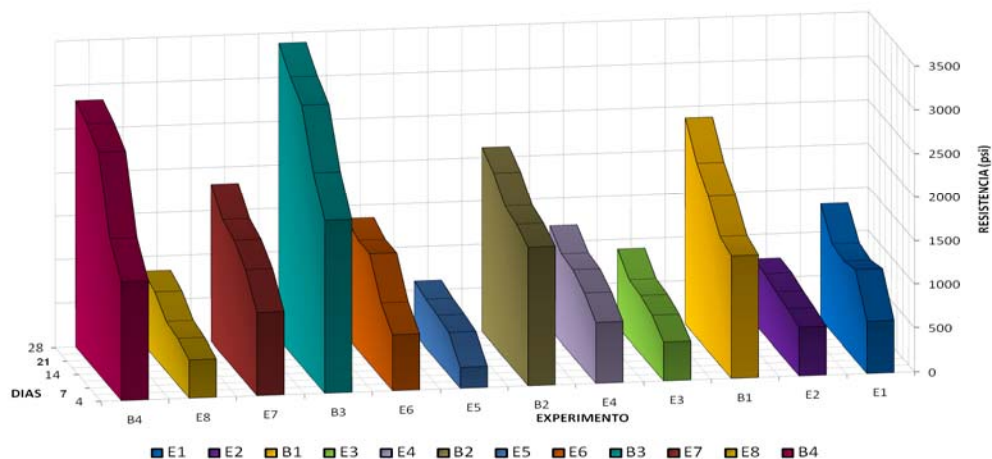


Se analizaron por parejas aquellos experimentos con igual contenido de agua y dosificación para examinar así el efecto de la cantidad de resina en la Resistencia. En la figura 3, se observa que la resistencia del monolito en cada dúo aumenta para aquellos experimentos que contienen menor cantidad de residuo, incrementándose directamente con el tiempo de fraguado, llegando a obtenerse los máximos valores a los 28 días, cumplido este tiempo las probetas alcanzan el 75% del total de la Resistencia [24].

Los experimentos E1, E4 y E7 evidencian los mayores valores de resistencia, 1417.1, 451 y 592 psi respectivamente, para cada subgrupo; este comportamiento se debe a la composición de la mezcla utilizada. En los tres experimentos se empleó la mínima proporción de residuo en la matriz, diferentes contenidos de agua y dosificación de la mezcla; lo cual indica que la adición del residuo a la matriz influye negativamente en su Resistencia. Aunque el experimento E1 mostró la Resistencia total más alta, este incrementa los costos del proceso, ya que requiere la dosificación de máximo contenido de cemento el cual es la materia prima de mayor valor en esta tecnología. Cabe mencionar que el tiempo de fraguado de la probeta antes de emplearse en otros usos en el exterior, no debe ser inferior a los 28 días.

Los posibles usos para las probetas producidas según las relaciones de matriz-residuo-agua utilizadas en E1 son: Mampostería de Bloque prensado y en la fabricación de Plantillas, medias canas, muros y losas sin refuerzo.

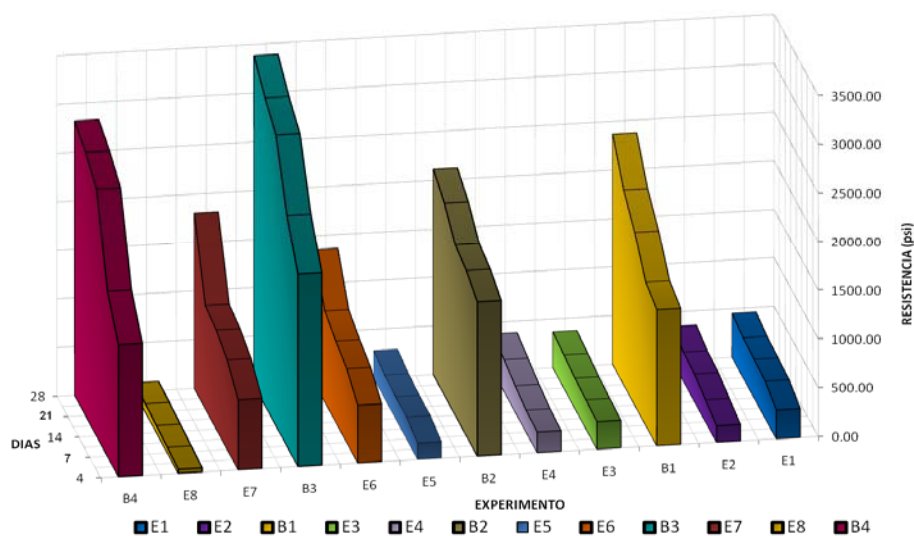
Figura 4. Variación de la Resistencia en las probetas Cemento-Resina cargada con Ni con el tiempo.



Al igual que en el caso del Cu se subdividieron en grupos de a dos los experimentos. La figura 4 muestra de nuevo la tendencia que a menor %Resina mejor es la resistencia de las probetas. Al comparar los experimentos de mayor resistencia, E1 y E7, los cuales requieren igual dosificación de matriz y residuo pero diferente relación agua/cemento (0.56 para E1 y 0.5 para E7); se demuestra que a mayor cantidad de agua menor es la resistencia, porque el espacio entre las partículas de cemento se incrementa en aquellas con mayor contenido de agua [23]. Se observó que la resistencia aumentó para los residuos cargados con Níquel (Resistencia máxima de 1800 psi) en comparación con el Cobre (Resistencia total de 1400 psi). Una posible causa de esto es que las probetas que encapsulan la resina cargada con Níquel adsorben menos cantidad de agua del mezclado de la pasta que las probetas cargadas con Cu, ya que las primeras están completamente saturadas con los iones de Ni (mayor selectividad de la resina por el níquel), lo que disminuye los sitios activos presentes en esta resina para adsorber otros iones.

La posible aplicación de las probetas en el sector de la construcción además de las anteriormente mencionadas es la manufactura de Antepisos en concreto.

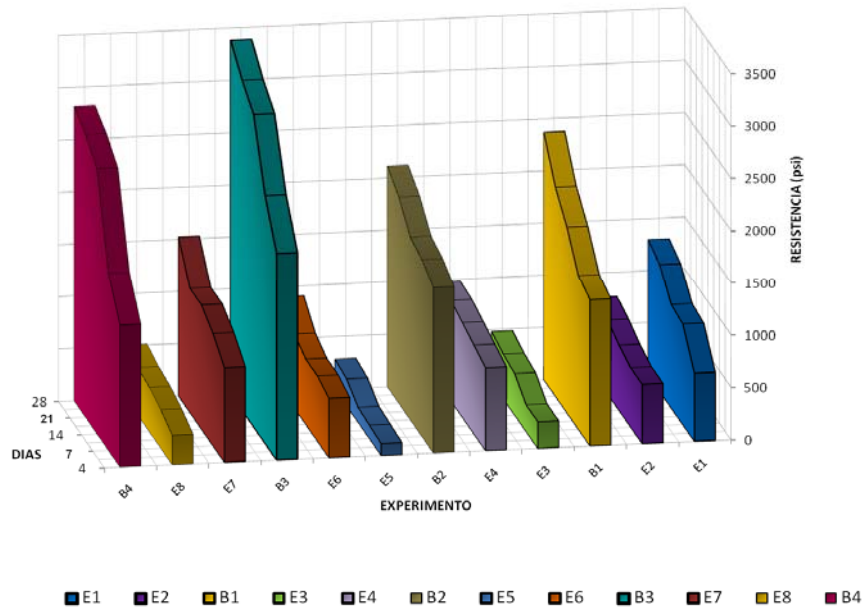
Figura 5. Variación de la resistencia en las probetas Cemento-Resina cargada con Zn con el tiempo.



La figura 5 muestra que los experimentos que mejores resultados presentaron para la medición de resistencia fueron E6 y E7, en los cuales se empleó la menor relación agua- cemento (0.5) y de residuo (10%), para diferente dosificación de la matriz encapsulante. La menor resistencia se observó en el experimento 8 en el cual se utiliza la mayor cantidad de residuo (15%) para una mínima cantidad de agua (50%). De nuevo se plantea la hipótesis que los sitios activos de la resina reciben algunos iones del agua. Así mismo, se muestra que el incremento de %resina infliere negativamente en la resistencia de los monolitos.

Según la resistencia para el caso de probetas de Zn, la mampostería de Bloque prensado, Plantillas, medias canas, muros y losas sin refuerzo y Antepisos en concreto, serían las aplicaciones más cercanas al sector de la construcción.

Figura 6. Variación de la resistencia en las probetas Cemento-Resina cargada con mezcla de Cu, Ni y Zn con el tiempo.



Nuevamente se muestra que la mejor relación para encapsular la resina cargada con iones metálicos en cuanto al parámetro de resistencia es la que contiene el Experimento 7 (E7), menor contenido de agua (50%), residuo (10%) y mayor cantidad de cemento (2:1:1). Esto debido a las causas que se explicaron anteriormente. Los empleos para estos monolitos son mampostería de Bloque prensado, Plantillas, medias canas, muros y losas sin refuerzo.

En las gráficas 3, 4, 5 y 6 se observa que la introducción del residuo al concreto disminuyó la Resistencia de los monolitos (comparando con los blancos). Este fenómeno pudo provocarse por diversas causas las cuales se discuten a continuación:

La hidratación del cemento es un proceso en el cual el agua de amasado se combina con las sustancias anhídras, formándose nuevos compuestos, acompañados de absorción de agua y liberación de calor de hidratación. Estos compuestos son silicatos, aluminatos y ferritos hidratados, así como

otros hidratos complejos. El calor generado por esta reacción es aproximadamente 120 calorías por gramo durante la hidratación completa del cemento. La Amberlita IR-120 presenta en su estructura iones H^+ los cuales al no ser neutralizados antes de la Estabilización/Solidificación elevan la temperatura de la mezcla debido a la reacción ácido-base que ocurre en la hidratación del cemento [31], esto hace que el fraguado sea rápido y se obtengan elevadas resistencias iniciales, pero como se observa en las gráficas estas resistencias no aumentan considerablemente con el tiempo, por lo que no se obtiene la resistencia deseada (Resistencia del prototipo).

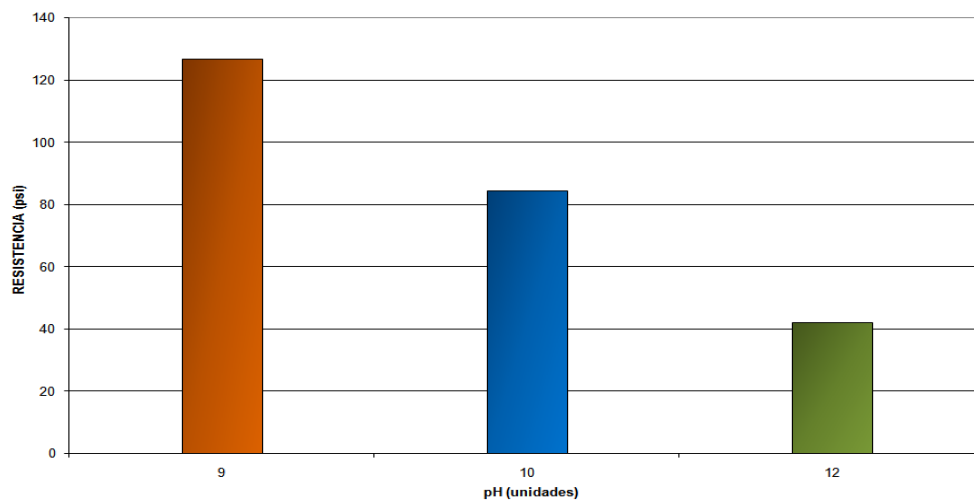
La resina produce una disminución en la fluidez del mortero debido a su capacidad para adsorber agua, lo cual le da a la mezcla una consistencia seca. Dicha pérdida de agua causa contracción y agrietamiento del concreto debido a los esfuerzos de tensión que se generan.

Como el curado de las probetas se realizó en seco (porque no se contó con una cámara húmeda para estos efectos), la evaporación del agua libre en la pasta se intensificó originando una insuficiencia de líquido que conllevó a la interrupción de la hidratación del cemento, por lo que más del 50% de la Resistencia potencial del concreto no se desarrolló [31].

Como se mencionó anteriormente las dosificaciones que se trabajaron fueron para cemento: arena: gravilla el contenido máximo 2:1:1 y el mínimo 1:1:1, estas dosificaciones contienen menos del 65% del volumen total de áridos; lo que afecta negativamente la estabilidad dimensional de las probetas, a causa de la retracción por secado y a la fisuración de la pasta de cemento [32]. Cabe mencionar que aunque estas cantidades de componentes cumplen con el objetivo principal de esta investigación (inertizar los iones de Cu, Ni y Zn presentes en una resina cargada), hacen que la densidad de las probetas aumente, como consecuencia del alto contenido de cemento que presentan, disminuyendo los posibles usos de las probetas porque representan una carga adicional que debe soportar las estructuras de hormigón.

El efecto del pH en la resistencia se estudió modificando este parámetro en tres tipos diferentes de agua de amasado. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 7. En esta se observa que la resistencia a la compresión disminuye cuando el pH del agua de mezclado aumenta. Esto es debido a que crece la posibilidad de producir deposición de cristales de sulfato en los poros y canales capilares del concreto como consecuencia de la evaporación del agua de la mezcla.

Figura 7. Influencia del pH en la Resistencia.



En la tabla 4 se muestran los valores de cada una de las variables de entrada, generados por statgraphics que maximizan la Resistencia a la compresión y los valores de los errores estándar para el diseño, para un nivel de confianza de 95%.

Tabla 4. Mejores condiciones de operación reportadas para el proceso E/S de resinas saturadas y Error estándar para los análisis realizados.

VARIABLES DE ENTRADA	Cu	Ni	Zn	Mezcla
Relación Agua/Cemento	0,56	0,56	0,50	0,56
Porcentaje de resina	10	10	10	10
Cantidad de cemento en la matriz	2	2	2	2
Error estándar para la concentración	0.005%	0.005%	0.009%	0.075%
<i>Error estándar para la Resistencia a la compresión.</i>	15%	15%	10%	10%

4. CONCLUSIONES

Se diseñó una matriz compuesta de 50 gramos de cemento Pórtland, 25 gramos de arena fina, 25 gramos de grava y 28 gramos de agua para encapsular 10 gramos de una resina Amberlita-IR120, que previamente había sido utilizada para el tratamiento de efluentes industriales del sector de galvanoplastia, y que contenía 100 ppm de Cu, 100 ppm de Zn y 100 ppm de Ni.

La matriz encapsulante de la resina saturada con los metales pesados en forma individual, presentó un porcentaje de retención de hasta 88.54% del cobre, 79.48% de níquel y 64.69% de cinc, los cuales estaban presentes en la Amberlita-IR120; lo que indica que este residuo puede ser depuesto, en un vertedero de seguridad, sin llegar a ocasionar un problema ambiental.

La caracterización toxicológica de los productos de Estabilización/Solidificación para el caso de la resina saturada con una mezcla de los tres metales, demostró que este residuo también puede ser depuesto en un vertedero de seguridad, ya que se retuvo hasta un 90% de la concentración inicial de Cu, Ni y Zn presentes en la resina Amberlita-IR120.

La adición de resina saturada a la matriz de cemento, disminuye la resistencia a la compresión, debido al aumento en el calor de hidratación durante las reacciones de fraguado provocado por el exceso de iones H^+ presentes en la estructura polimérica de la resina.

Los monolitos que presentan la mejor retención de metales y valores de resistencia a la compresión del orden de 1800 psi, contienen el máximo

contenido de cemento de 2 en la dosificación, la mínima cantidad de residuo 10% y una relación agua/cemento igual a 0.56. Estos pueden emplearse en: la elaboración de lozas, recubrimientos de paredes, falsos cielorrasos, paneles, muros divisorios y divisiones modulares de grandes dimensiones reforzados con malla.

RECOMENDACIONES

Realizar a la resina saturada con los iones metálicos el pretratamiento descrito por FRIZON y CAU-DIT-COUMES [32], antes de la Estabilización/Solidificación, para limitar durante la hidratación del cemento la perturbación de los iones H^+ presentes en la estructura del copolímero.

Evaluar el comportamiento de la matriz, que contiene la resina, con pruebas de tensión, flexión, resistencia al fuego, propiedades acústicas, densidad, permeabilidad y comportamiento reológico; con el fin de definir con mayor exactitud su posible utilización a nivel industrial.

BIBLIOGRAFÍA

1. GUERRERO G, Andrés; ROMERO C, Manuel. Evaluación de la carga Contaminante de las vertientes líquidas de la Empresa Fantaxías Ltda. Bucaramanga, 2006 .Trabajo de Grado (Ingeniero Químico) Universidad Industrial de Santander. Facultad de Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química.
2. Decreto 4741 del 30 de diciembre de 2005. Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. República de Colombia.
3. US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (US EPA). Toxicity characteristics leaching procedure (TCLP), vols. 51,61. Washington, DC, 1990.
4. DOCE. Council decision 2003/33/EC establishes uniform criteria and procedures for acceptance of waste at landfill sites, in accordance with Article 16 of Annex. II to Directive 1999/31/EE, 2003.
5. AMADO DUARTE Diana Carolina, GUTIERREZ GONZALEZ Zahira Tatiana. Evaluación técnica para la recuperación y reutilización de las aguas industriales de la empresa FANTAXIAS LTDA. Por resinas de intercambio iónico. Bucaramanga, 2006 .Trabajo de Grado (Ingeniero Químico) Universidad Industrial de Santander. Facultad de Físico- Químicas. Escuela de Ingeniería Química.
6. AGUEDA, H.C., GONZALEZ, O. Desarrollo de procesos para la descontaminación electroquímica y otros tratamientos previos a la cementación de Resinas de Intercambio Iónico Agotadas.

Comisión Nacional de Energía Atómica de Argentina, Buenos Aires, 2006.

7. ARBOLEDA VALENCIA Jorge. Teoría y práctica de la Purificación del agua. Tercera edición. Mc Graw Hill, 2000.

8. DOW CHEMICAL COMPANY. Dowe Ion Exchange Resins- Technical Data.

9. MARINSKY, Jacob A. Ion Exchange: Marcell Dekker, Vol.2. New York. 1996.

10. BAEZ ANGARITA Doris Bibiana, HERRERA SANDOVAL Gloria Marcela. Reciclaje del Poliestireno espumado para la Obtención de Resinas de Intercambio iónico. Bucaramanga, 2005 .Trabajo de Grado (Químico) Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias. Escuela de Química.

11. CERVERÓ Marcel. Situación Medioambiental del sector metalmeccánico. Econoticias. Revista N°3. IV trimestre 1999.

12. KUCHARA D, FUKUTAB T, ONYANGO M, MATSUDAA H, Sulfidation treatment of metal compounds involved in plating sludges. Desalination 211 (2007) 144–155.

13. DUTRA A.. ROCHA G, POMBO F.. Copper recovery and cyanide oxidation by electrowinning from a spent copper-cyanide electroplating electrolyte. Journal of Hazardous Materials 152 (2008) 648–655.

14. ROSSINI G, BERNARDES A. Galvanic sludge metals recovery by pyrometallurgical and hydrometallurgical treatment. *Ecological Engineering* 131 (2006) 210-216.

15. MELLO-CASTANHO, S.R.H; DA SILVA, A.C; ESTEBAN-CUBILLO, A.; PECHORROMAN, C.; MOYA, J.S. Vidrios de silicato a partir de residuos galvánicos con alto contenido en Cr y Ni: Boletín de la sociedad Española de Cerámica y Vidrio. Madrid. España: Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid. Febrero de 2006.

16. CUSIDO, Joan A.; CREMADES, Lázaro. Nuevos materiales cerámicos para la construcción mediante valorización de lodos de aguas urbanas: Proyecto ECOBRICK®. Universidad Politécnica de Cataluña (UPC). 2001.

17. ELIAS, Xavier. Aplicación de las Técnicas Cerámicas a la Valorización de Residuos. Dirección de la bolsa de Subproductos de Cataluña. Ponencia 4º sesión. 2005.

18. RUIZ, M.C; IRABIEN, A. Environmental behavior of cement-based stabilized foundry sludge products incorporating additives: *Journal of Hazardous Materials*. Santander. España: Universidad de Cantabria. Departamento de Ingeniería Química y Química Orgánica. Junio de 2003.

19. VALLS, S; VAZQUEZ, E. Stabilisation and solidification of sewage sludges with Portland cement: *Cement and Concrete Research* 30. Barcelona, Spain: Universitat Politecnica de Catalunya. Department of Construction Engineering. July 2000.

20. Gassó, Santiago; Baldasano, José María. Estabilización/solidificación (E/S) de residuos de incineración de desechos sólidos urbanos (RSU) con cemento de aluminato de calcio (CAC/R). Departamento de Proyectos de Ingeniería Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), 2006.

21. Fuoco, R; Ceccarini, A; Tassone, P; Wei, Y; Brongo, A; Francesconi, S. Innovative stabilization/solidification processes of fly ash from an incinerator plant of urban solid waste. Department of Chemistry and Industrial Chemistry Verona Italy, 2004.

22. AUBERT, G; MAGNIN, V; FRANCOISE, M. Procedimiento para inmovilización de resinas cambiadoras de iones con ligante hidráulico. Societe Generale pour les techniques novells S.G.N. Societe Anonyme. Fecha de Concesión de la patetente, 1992.

23. LARSON, Thomas D. Concretos de cemento Pórtland y asfaltos. Compañía editorial continental S.A México. 1966.

24. MANTALLANA RODRIGUEZ Ricardo. Serie de Manuales de Concreto. Instituto Colombiano de Productores de Cemento-ICP. 1986.

25. Ortiz Mejía, J. R. 2004. Estudio de la estabilización y solidificación de metales pesados mediante la técnica de cementación. Tesis Licenciatura. Ingeniería Química con área en Ingeniería Ambiental. Departamento de Ingeniería Química y Alimentos, Escuela de Ingeniería, Universidad de las Américas Puebla. Mayo. 2004, Universidad de las Américas Puebla.

26. SANCHEZ Diego. Propiedades del Concreto. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.
27. Environmental Protection Agency. A citizen's guide to Stabilization/Solidification. Washington, D.C., 2001.
28. GUTIERREZ, Humberto; DE LA VARA, Román. Análisis y Diseño de Experimentos. México D.F: McGraw-Hill 2003. 571 p.
29. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Concrete and Mineral Aggregates Part. 4. Easton, ASTM, 1982.
30. Decreto 1594 del 26 de Junio de 1984. Ministerio de Agricultura. Colombia.
31. ACI. Comité 517 recommended practice for atmospheric pressure steam curing of concrete. JACI proc, vol. 66, No 8 (AG 1969), p. 629.
32. FRIZON F; CAU-DIT-COUMES. Cementation of ILW ion exchange resins: Impact of sulfate ions released by radiolysis on hydrate matrix. Journal of nuclear materials. Bagnols-sur-CEZE sedex France, 2006.
33. CARBONELL H, Tomas; GONZALES P, Juan. Estudio de las propiedades acústicas con concretos modificados con aditivos poliméricos. Bucaramanga, 1998. Trabajo de Grado (Ingeniero Civil) Universidad Industrial de Santander. Facultad de Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil.

**ANEXOS. Gráficos de Partero y de efectos principales para la
Concentración y Resistencia a la Compresión de las matrices
encapsulantes de Cu, Ni y Zn.**

GRAFICO DE PARETO PARA CONCENTRACION DE Ni

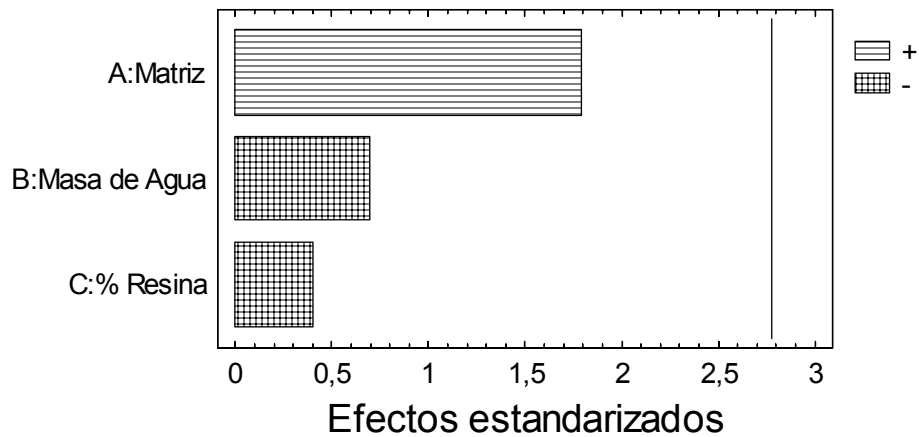
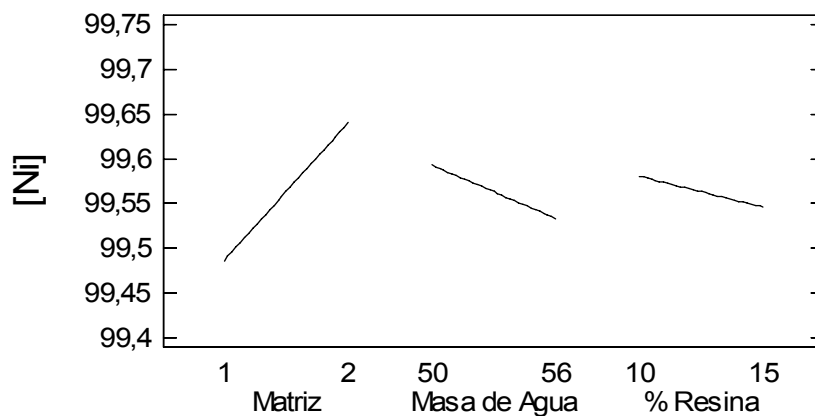


GRAFICO DE EFECTOS PRINCIPALES CONCENTRACION DE Ni



$$C_1 = 99,5633 - 0,0299375 * A - 0,0773625 * M - 0,0174375 * R \text{ [Ecuación 1]}$$

Donde:

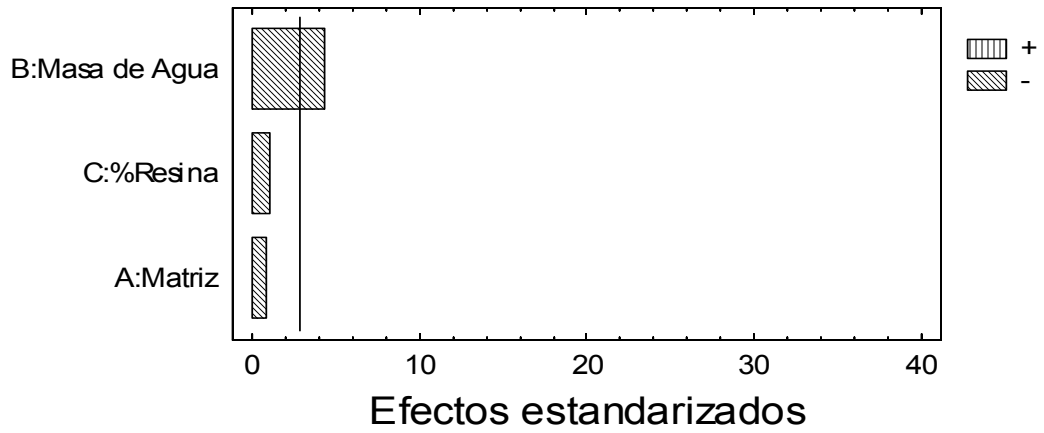
A: gramos de agua adicionados a la matriz (g)

M: Matriz (gramos de cemento)

R: Porcentaje de resina saturada en la matriz

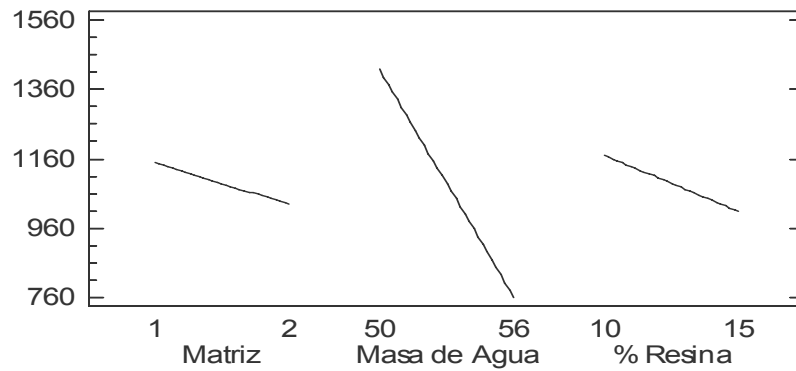
C₁: Concentración

GRAFICO DE PARETO PARA LA RESISTENCIA DEL N^o



RESISTENCIA A LA COMPRESION N^o

GRAFICO EFECTOS PRINCIPALES PARA EL N^o



$$RC_1 = 1088,98 - 327,751 \cdot A - 59,9115 \cdot M - 81,0567 \cdot R \text{ [Ecuación 2]}$$

Donde:

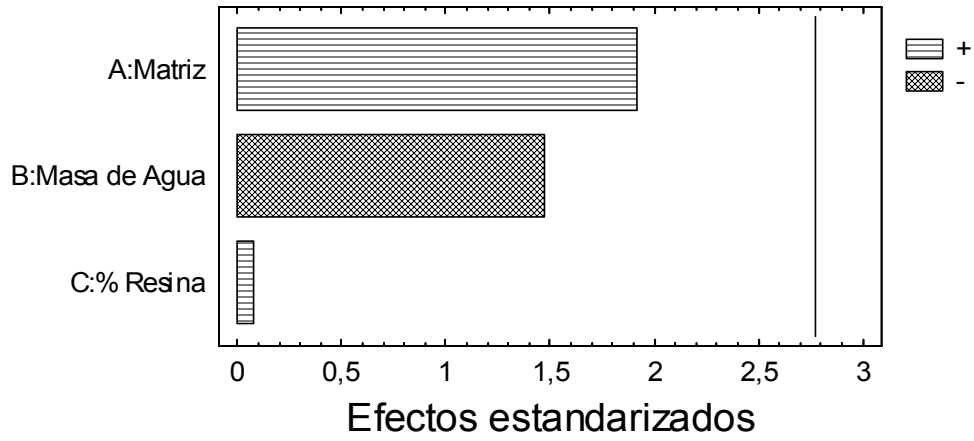
A: gramos de agua adicionados a la matriz (g)

M: Matriz (gramos de cemento)

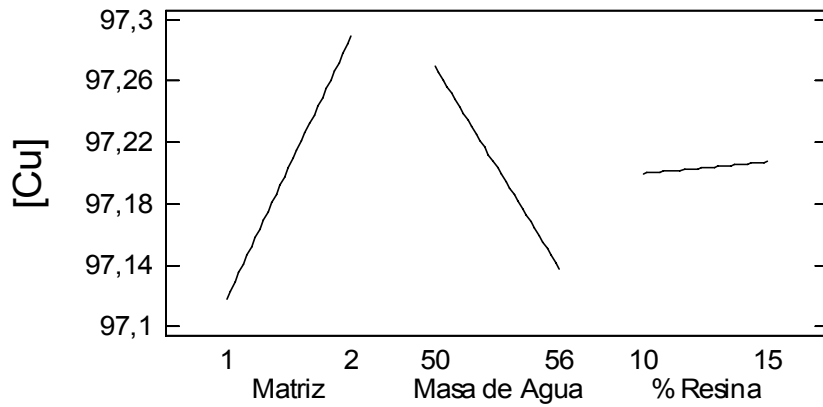
R: Porcentaje de resina saturada en la matriz

RC₁: Resistencia a la compresión

GRAFICO DE PARETO PARA CONCENTRACION DE Cu



GRAFICOS FECTOS PRINCIPALES CONCENTRACION Cu



$$C_2 = 97,2036 - 0,065825 \cdot A + 0,085725 \cdot M + 0,00385 \cdot R \text{ [Ecuación 3]}$$

Donde:

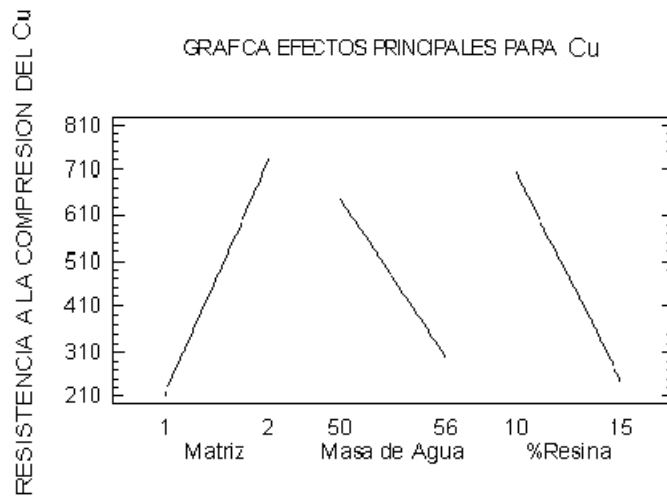
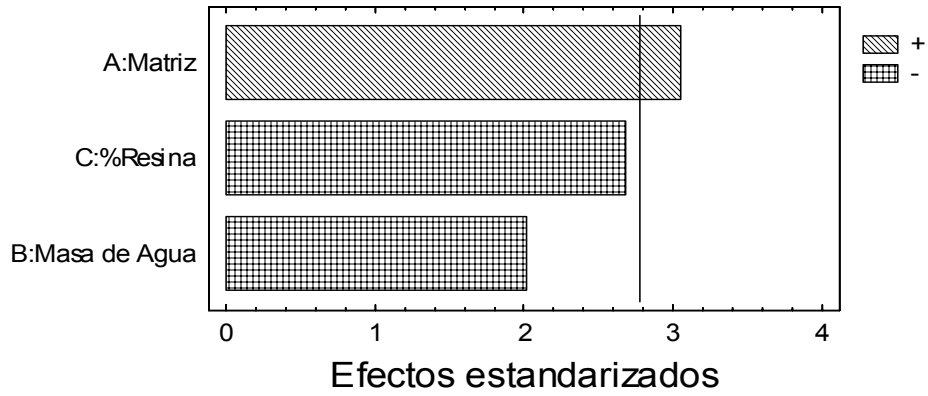
A: gramos de agua adicionados a la matriz (g)

M: Matriz (gramos de cemento)

R: Porcentaje de resina saturada en la matriz

C₂: Concentración

GRAFICO DE PARETO PARA LA RESISTENCIA DEL Cu



$$RC_2 = 473,17 - 173,613 \cdot A + 261,718 \cdot M - 230,0 \cdot R \text{ [Ecuación 3]}$$

Donde:

A: gramos de agua adicionados a la matriz (g)

M: Matriz (gramos de cemento)

R: Porcentaje de resina saturada en la matriz

RC₂ Resistencia a la compresión

GRAFICO DE PARETO PARA LA CONCENTRACION DE Zn

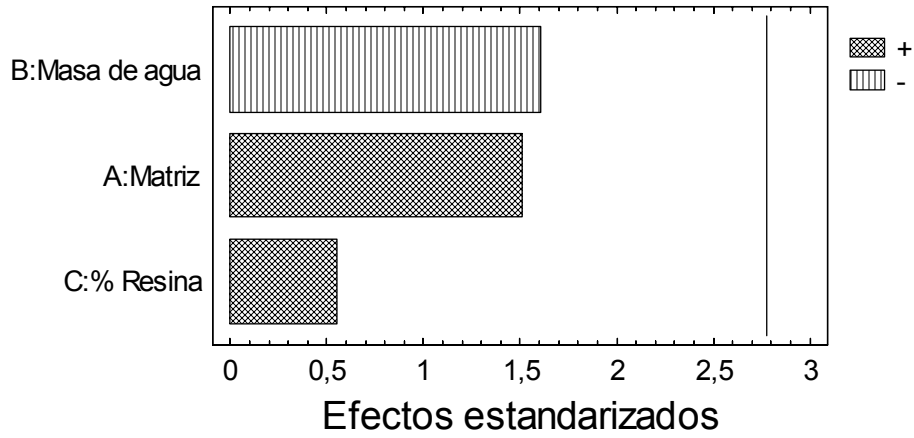
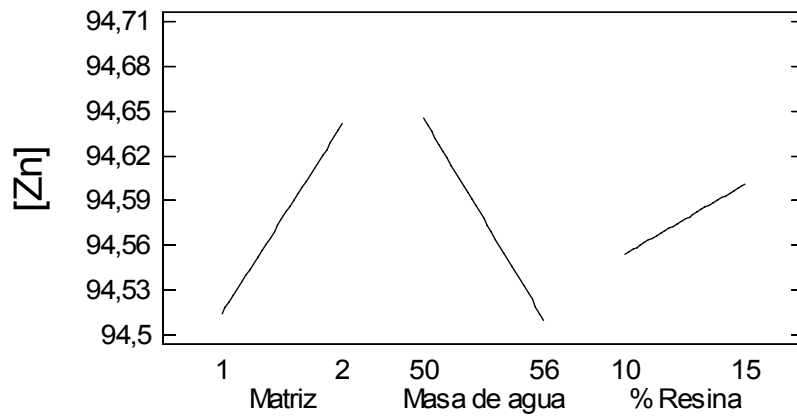


GRAFICO EFECTOS PRINCIPALES PARA CONCENTRACION DEL Zn



$$C_3 = 94,5778 - 0,06765 * A + 0,063675 * M + 0,0236 * R \text{ [Ecuación4]}$$

Donde:

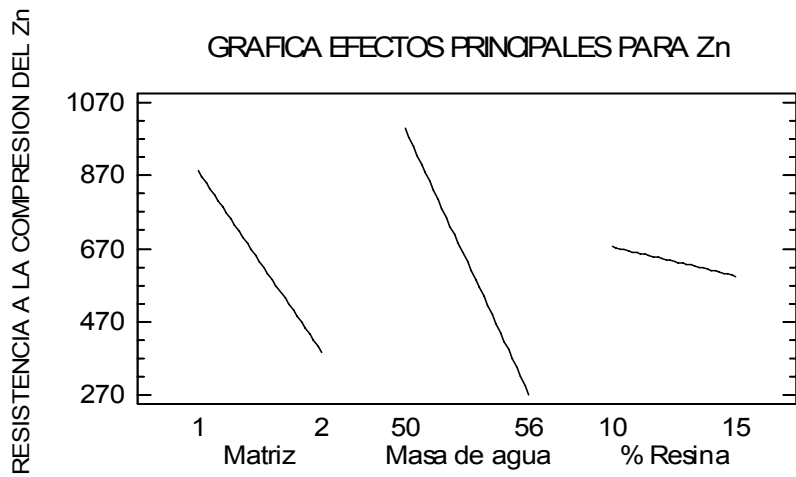
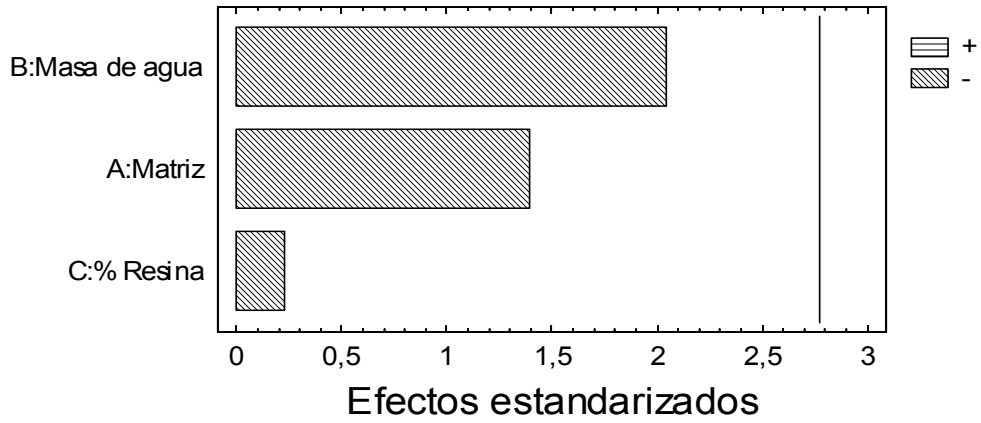
A: gramos de agua adicionados a la matriz (g)

M: Matriz (gramos de cemento)

R: Porcentaje de resina saturada en la matriz

C₃: Concentración

GRAFICO DE PARETO PARA LA RESISTENCIA DEL Zn



$$RC_3 = 635,238 - 362,112 \cdot A - 247,575 \cdot M - 39,6473 \cdot R \quad [\text{Ecuación 5}]$$

Donde:

A: gramos de agua adicionados a la matriz (g)

M: Matriz (gramos de cemento)

R: Porcentaje de resina saturada en la matriz

RC₃ Resistencia a la compresión