

Reuse of demolition waste and sustainable development

Juan Carlos Vallini¹, estudiante de Ingeniería Química

Mentor: Luis Fernandez Luco, Dr.Ing.¹, María Natalia Piol, Dra.¹

¹Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería, Argentina, jvallini@fi.uba.ar, lfdezluco@fi.uba.ar, mpiol@fi.uba.ar.

Abstract– Based on sustainable development and circular economy in this work was thought of the use of large volumes of demolition waste to be used as backfill for continuous reactors for water treatment. The demolition material was processed and characterized. It was used for preliminary results in batch reactor tests for the removal of Cu²⁺, Ni²⁺ and Zn²⁺ individually or simultaneously present. Tests were carried out in continuous fixed-bed reactors and finally the saturated material was used as a replacement for aggregates in cement mortars. It is concluded that this type of material could be used in the removal of metals as a previous step to the incorporation in a new construction based on cement, constituting an action of circular economy.

Keywords: Adsorption – Demolition waste – Multicomponent system – Metals – Continuous reactors

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).

ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

DO NOT REMOVE

Reutilización de residuos de demolición y desarrollo sostenible

Juan Carlos Vallini¹, estudiante de Ingeniería Química

Mentor: Luis Fernandez Luco, Dr.Ing.¹, María Natalia Piol, Dra.¹

¹Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería, Argentina, jvallini@fi.uba.ar, lfdezluco@fi.uba.ar, mpiol@fi.uba.ar.

Resumen– *Sobre la base del desarrollo sostenible y la economía circular en este trabajo se pensó en el empleo de los grandes volúmenes de residuos de demolición para ser utilizados como relleno de reactores continuos para tratamiento de agua. Se procesó y caracterizó el material de demolición. Se empleó para resultados preliminares en ensayos en reactores discontinuos para remoción de Cu^{2+} , Ni^{2+} y Zn^{2+} en forma individual o presentes en forma simultánea. Se realizaron ensayos en reactores continuos de lecho fijo y por último el material saturado se utilizó como reemplazo de áridos en morteros de cemento. Se concluye que este tipo de material podría ser utilizado en la remoción de metales como paso previo a la incorporación en una nueva construcción a base de cemento, constituyendo una acción de economía circular.*

Palabras clave: *Adsorción – Residuos de demolición – Sistema multicomponente – Metales – Reactores continuos*

I. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, el desarrollo sostenible ha sido puesto en relevancia debido al creciente aumento de la pobreza y los constantes problemas medioambientales relacionados al estilo de producción y consumo de hoy día. De esta forma, el concepto de desarrollo sostenible incorpora las ideas de sostenibilidad social, ambiental y económica para afrontar los grandes desafíos a los que se enfrenta la humanidad con el fin de mejorar la calidad de vida de las personas sin comprometer el medioambiente y nuestro futuro. La Organización de las Naciones Unidas (ONU) define 17 objetivos para alcanzar este desarrollo sostenible [1]. En busca de una respuesta a esta situación, nace la Ingeniería Sostenible, que busca incorporar a la actividad ingenieril más conciencia y criterios de sostenibilidad para hacerla más amigable desde el punto de vista ambiental y compatible con estos objetivos.

Para dar con la respuesta, podríamos pensar en la economía

circular, que propone un nuevo paradigma que modifica la forma en la que actualmente consumimos. Frente a la economía de extracción, producción, consumo y desperdicio, la economía circular alienta un flujo constante, una solución virtuosa, en la que los residuos puedan ser utilizados como recursos para reingresar al sistema productivo. De esta manera, reducimos nuestros residuos y extraemos menos recursos naturales del planeta [2, 3].

Por otro lado, la gestión de residuos y la eliminación de contaminantes de efluentes industriales son tareas complejas y necesarias de resolver. Es por ello que la idea de reciclar y reutilizar materiales, que actualmente se descartan como material de relleno en diferentes basurales, generaría un aporte a la economía circular. En la actualidad, en la Ciudad de Buenos Aires (CABA) se generan cerca de 6000 toneladas diarias de residuos áridos (escombros y restos de construcción) de los cuales se recuperan aproximadamente una tercera parte para emplearse como relleno en obras civiles y viales. El remanente de unas 4000 toneladas diarias de desechos se utiliza como material de relleno. Esto se traduce en una alta disponibilidad de material que puede ser reutilizado como adsorbente en reactores para remover contaminantes presentes en los efluentes de muchas industrias [4]. Este no es solo un problema argentino; en países desarrollados como Estados Unidos o China también se plantea la problemática de la disposición de grandes volúmenes de residuos de demolición [5,6]

Para poder utilizar estos residuos como una nueva alternativa sustentable, es necesario estudiar su composición, así como las posibilidades de retención de contaminantes y reutilización posterior de manera segura [7].

Los metales como contaminantes resultan muy peligrosos en los sistemas acuosos naturales como ríos y lagos, pues a diferencia de los compuestos orgánicos, no son degradables y resultan acumulables en los organismos llevando al proceso de biomagnificación [8]. Iones metálicos como el Pb^{2+} o el

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).

ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

DO NOT REMOVE

CrO_4^{2-} han sido declarados como posibles cancerígenos por la IARC (International Agency for Research on Cancer) [8]. Iones metálicos como Cu^{2+} , el Cr^{3+} y Zn^{2+} son esenciales para el ser humano, por lo que en ciertos niveles es necesario que se encuentren en la ingesta diaria, mientras que si esos niveles son superados pueden generar toxicidad [9]. Para el caso del Ni^{2+} si bien no es esencial para el ser humano sí podría serlo para algunas especies de invertebrados [11], en cambio la Ag^+ tampoco es esencial, pero es considerada como un tóxico menor ya que, en general, no supera los mecanismos de defensa del cuerpo humano [10].

El empleo de materiales derivados del cemento y la posibilidad de ser utilizados para la remoción de iones metálicos como Cu^{2+} , Zn^{2+} y Pb^{2+} [12], así como contaminantes orgánicos tales como el 2,4-DCP [13] ha sido estudiado por otros autores y en todos los casos se han obtenido elevados porcentajes de remoción de cada contaminante. Aun así, si bien estos trabajos previos indican su uso potencial como filtros de agua con capacidad de retener dichos contaminantes, es necesario profundizar y ampliar los estudios sobre estos adsorbentes para conocer el espectro entero de metales para los que se podría aplicar [14]. Otro punto para considerar es la posibilidad de disponer finalmente el residuo de material de la construcción utilizado como adsorbente en la producción de morteros y hormigones de cemento en los que participan los adsorbentes saturados de metales [15]. Estos morteros u hormigones de cemento podrían tener diferentes utilidades y el destino final será definido en relación a la posibilidad de liberación de lixiviados [15, 16]. En este sentido, es necesario considerar que el hormigón es un material único dentro de los usados en la industria de la construcción, pues a diferencia de otros materiales ingenieriles, su mesoestructura no es una característica intrínseca, sino que depende de sus proporciones y constituyentes y está sujeta a cambios con el paso del tiempo, la humedad y la temperatura [17].

El objetivo del presente trabajo es estudiar la posibilidad de reutilizar residuos de demolición para el tratamiento de soluciones sintéticas conteniendo diferentes iones metálicos en forma individual y sus mezclas, para luego evaluar su empleo como relleno de reactores de lecho fijo; finalmente, luego de finalizado su empleo en el reactor, se evalúan las posibilidades de reutilización del material saturado.

Se analizó la posibilidad de adsorción de estos desechos de demolición de diferentes especies metálicas en reactores discontinuos en forma individual y de especies como Cu^{2+} , Zn^{2+} y Ni^{2+} presentes en forma simultánea; sobre residuos de

demolición provistos por la empresa Grupo Mitre demoliciones.

MATERIALES Y METODOS

Preparación y caracterización del adsorbente

Se recibieron 25 kg de residuos de demolición embolsados de la empresa Mitre que realiza una previa separación entre los diferentes residuos y posteriormente los muele para su distribución como rellenos en distintas obras. Estos residuos de demolición fueron previamente procesados por la compañía proveedora y fraccionados en bolsones de 25 kg. Se obtuvo una muestra representativa de este material [18] y luego se molió para obtener el material fino y se seleccionó el material retenido en un tamiz (ASTM N°12), con un tamaño de $1860\ \mu\text{m}$. Este fue el material utilizado como adsorbente en todos los ensayos realizados, con un tratamiento de lavado previo con agua desionizada y con un posterior secado a $60\ ^\circ\text{C}$ por 24 horas (Figura 1).

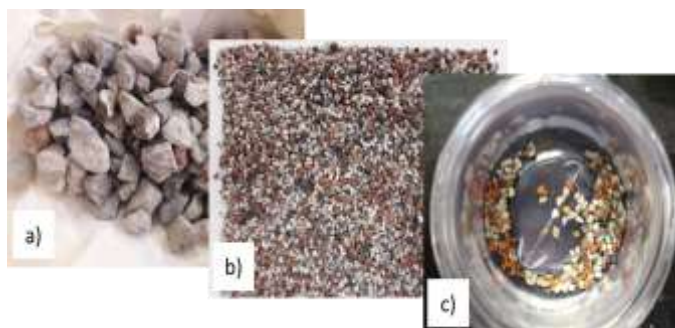


Figura 1: Preparación de los desechos de demolición. a. Molido grueso. b. Molido fino. c. Adsorbente tamizado, lavado y seco

A continuación, se realizó una caracterización macroscópica, extrayendo una muestra, distinguiendo y separando cada material que lo compone de acuerdo con diferentes características organolépticas, tales como color y textura. Con los componentes ya separados, se calculó el % másico de cada uno.

El punto de carga cero (ZCP) fue utilizado para determinar la carga de los sitios activos sobre la superficie del adsorbente en determinadas soluciones. Dicho punto se define como el pH donde la carga total de la superficie es cero. El procedimiento experimental aplicado en este trabajo consistió en la preparación de 9 matraces llenos con 50 mL de una solución $0.1\ \text{mol.L}^{-1}$ de KNO_3 . Los pHs de cada matraz fueron ajustados a diferentes valores entre 3 y 11, usando soluciones de HCl y NaOH , ambas de concentración $0.1\ \text{mol.L}^{-1}$, usando además, un PHmetro Metrohm ®. Luego, en cada matraz se

adicionó 3,0 gramos de adsorbente, y la mezcla se sometió a agitación continua durante 24 horas at 25 ± 2 °C. Finalmente, se midió el PH final de la mezcla de cada matraz, y los datos obtenidos se plasmaron en un gráfico ΔpH vs. pH_i , donde la ordenada al origen de la recta resultante es el valor del ZCP.

Para determinar la existencia de posibles impurezas que este material adsorbente pueda liberar al fluido a tratar, se realizó un análisis de compuestos liberados cuando se pone en contacto el adsorbente con agua desionizada. Este ensayo fue llevado a cabo por el método de Fluorescencia de Rayos X por Reflexión Total (TXRF), con un espectrómetro S2 PICOFOX, BRUKER®.

Selección, preparación y cuantificación de los adsorbatos

Las soluciones usadas en los ensayos fueron preparadas por dilución de soluciones estándar de 1000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de cada sal de nitrato de Cu^{2+} , Ni^{2+} y Zn^{2+} (SCP SCIENCE®). Las soluciones multielementales fueron preparadas en concentración equimolar de estos iones, de forma que se puedan comparar las capacidades de adsorción del adsorbente en cuestión. Estos iones fueron seleccionados por poseer la mi carga iónica, pudiendo competir por los sitios activos. Además, estos iones pueden encontrarse frecuentemente en los efluentes industriales de, por ejemplo, industrias metalúrgicas o de galvanoplastia. Para la determinación de metales en solución se utilizó un equipo de adsorción atómica modelo XplorAA 2017 marca GBC con llama de acetileno y lámparas de cátodo hueco correspondientes para cada metal (APHA – método 3111B).

Ensayos discontinuos

Los ensayos discontinuos fueron realizados utilizando 3,0 gramos de adsorbente, 50 mL de soluciones individuales de Cu^{2+} , Ni^{2+} y Zn^{2+} y soluciones multielementales equimolar de los mismos iones. Los ensayos fueron realizados bajo condiciones controladas de temperatura 25 ± 2 °C, pH de $7,0 \pm 0,2$ y agitación continua a 200 rpm durante 24 horas. [19]. Las mezclas resultantes fueron filtradas utilizando filtros de papel (MN710-125mm Macherey-Nagel™). El porcentaje de remoción (%R) fue calculado con la ecuación 1.

$$\%R = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \cdot 100 \% \quad (1)$$

Donde C_0 y C_e son la concentración inicial y de equilibrio para cada ion metálico ($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$).

Ensayos continuos

Para los ensayos continuos, se utilizó un reactor tubular relleno con 20,0 gramos de adsorbente, con un volumen total efectivo de $26,5\text{ cm}^3$. La solución de contaminantes fue

bombada con un caudal de $0,94\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$, asegurando un tiempo largo de contacto entre el adsorbato y el adsorbente. A la salida del reactor, las muestras se recolectaron recolectadas cada 5 minutos de ensayo. Finalmente, con los datos obtenidos de las curvas de ruptura, se ajustaron modelos de 2 constantes para describir matemáticamente los sistemas. Estos modelos fueron los Thomas, Adams-Bohart y Yoon-Nelson.

El modelo de Thomas se muestra en la ecuación 2.

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{1 + \left[\exp \left(\frac{K_{TH}}{F} \cdot (q_0 \cdot W - C_0 \cdot V_{ef}) \right) \right]} \quad (2)$$

Donde K_{TH} es la constante de velocidad de Thomas [$\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$], q_0 es la máxima concentración de soluto en la fase sólida [$\text{mmol}\cdot\text{g}^{-1}$], V_{ef} es el volumen del efluente [L], F es el flujo volumétrico [$\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$], W es la cantidad de adsorbente utilizado como relleno del reactor [g] y C es la concentración de salida [$\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$].

El modelo de Adams-Bohart se representa en la ecuación 3:

$$\frac{C}{C_0} = \exp \left(\frac{K_{AB} \cdot C_0 \cdot V_{ef}}{F} - \frac{K_{AB} \cdot N_0 \cdot Z}{U_0} \right) \quad (3)$$

Donde K_{AB} es el coeficiente de transferencia de masa [$\text{cm}^3\cdot\text{mmol}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$], N_0 representa la máxima capacidad de adsorción [$\text{mmol}\cdot\text{cm}^{-3}$], U es la velocidad lineal del líquido [$\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$] y Z es la altura del reactor [cm].

Por último, el modelo de Yoon-Nelson es representado por la ecuación 4:

$$\frac{C}{C_0} = \frac{\exp \left(K_{YN} \cdot \left(\frac{V_{ef}}{F} - \tau \right) \right)}{1 + \exp \left(K_{YN} \cdot \left(\frac{V_{ef}}{F} - \tau \right) \right)} \quad (4)$$

Donde K_{YN} es la constante de velocidad de Yoon-Nelson [min^{-1}] y τ [min] es el tiempo requerido para alcanzar el 50 % de C_0 .

Ensayos de desorción, reutilización de material saturado y lixiviado

Al igual que los ensayos discontinuos, los ensayos de desorción se realizaron utilizando 3,0 gramos de material adsorbente saturado y 50 mL de agua desionizada. Estos ensayos fueron realizados bajo condiciones ambientales controladas bajo 25 ± 2 °C de temperatura, pH de $7,0 \pm 0,2$, y agitación continua a 200 rpm durante 24 horas [20]

Por otro lado, se conformaron probetas de ensayo de mortero con un tamaño de 4 x 4 x 16 cm, con los lineamientos de la norma EN 196-1:2016, empleando un 30% de material adsorbente saturado con contaminantes en reemplazo de arena fina. Estas probetas se ensayaron a la compresión sobre una superficie de 4 x 4 cm² [21].

Por último, la prueba de lixiviado se realizó utilizando agua desionizada de acuerdo con el Método 1310B [22] (EPA, 2004).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De la caracterización macroscópica del adsorbente, se pudo distinguir 3 componentes mayoritarios dentro de la muestra. Se obtuvo: materiales cerámicos, pasta de cemento y agregado pétreo. Los porcentajes hallados de cada uno de estos componentes se muestran en las Figuras 2a y 2b. Los porcentajes muestran que la pasta de cemento es el componente encontrado en mayor proporción que el resto.

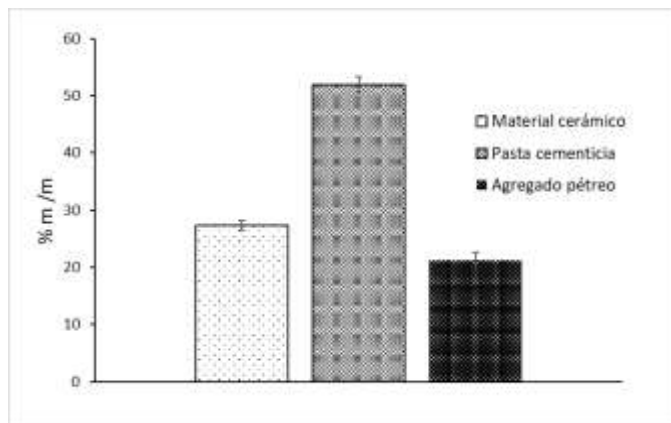


Figura 2a. Caracterización macroscópica del adsorbente



Figura 2b. Imagen de las fracciones del material adsorbente

La Figura 3 muestra las curvas experimentales obtenidas del ensayo de carga cero, con un resultado de ZCP de 10,1 como pH. Este resultado es consistente con la estructura y composición de adsorbente, formado principalmente por carbonato y óxidos básico.

El pH fue controlado durante los ensayos y luego de una leve alcalinización (1 unidad de pH) el pH se mantuvo constante durante todo el proceso de adsorción.

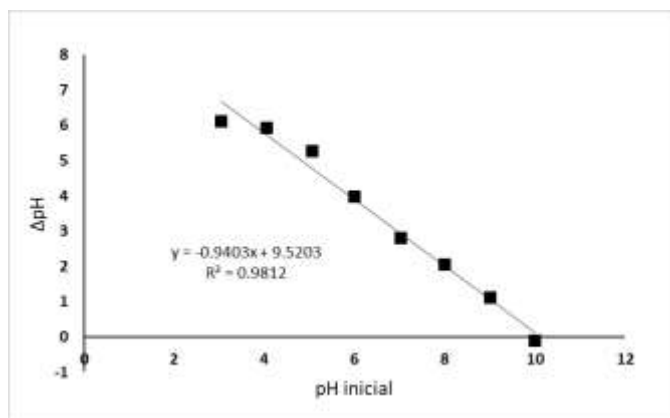


Figura 3. Determinación de punto ZCP del adsorbente

Del análisis cualitativo y cuantitativo de ensayo de impurezas medido con la técnica del TXRF, el espectro demostró que el principal elemento liberado por el adsorbente a la fase acuosa es calcio, con una concentración de 0,595 mg/g de adsorbente. Por lo tanto, el uso de estos adsorbentes no introduce compuestos contaminantes al sistema que se pretende tratar. Los mismos resultados fueron obtenidos por diferentes autores con otros desechos de demolición, pero con las mismas características que el usado en este trabajo. [23].

Los resultados obtenidos para los ensayos en reactores discontinuos realizados para los iones presentes en forma individual o en presencia simultánea de Cu²⁺, Ni²⁺ y Zn²⁺ se presentan en la Figura 4. La mayor remoción se obtuvo para Cu²⁺ seguida de Zn²⁺ y por último Ni²⁺. Este resultado manifiesta una mayor interacción del Cu²⁺ por los sitios de adsorción del adsorbente en estudio independientemente de la concentración.

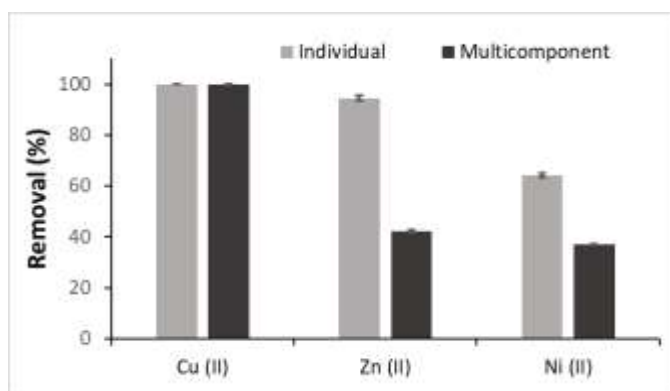


Figura 4. remoción de metales en forma individual o en presencia simultánea de Cu²⁺, Ni²⁺ y Zn²⁺.

En la Figura 5 se muestra el efecto de la concentración sobre la remoción de los iones en el sistema multicomponente.

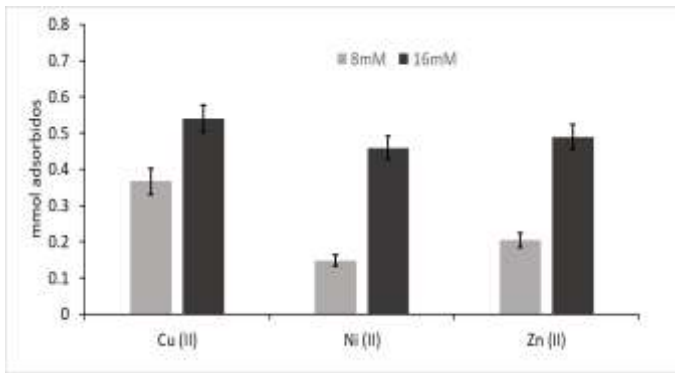


Figura 5: ensayos de adsorción en sistemas discontinuos para distintos contaminantes presentes en forma simultánea.

Se observa que, a mayor concentración de los iones, mayor es la remoción de estos en el sistema multicomponente equimolar.

En la Figura 6 se muestran las curvas de ruptura obtenidas con los reactores continuos para cada metal en forma individual para una concentración de 8 mM de cada ion y en la Figura 7 se muestran las curvas obtenidas en presencia simultánea de Cu^{2+} , Ni^{2+} y Zn^{2+} .

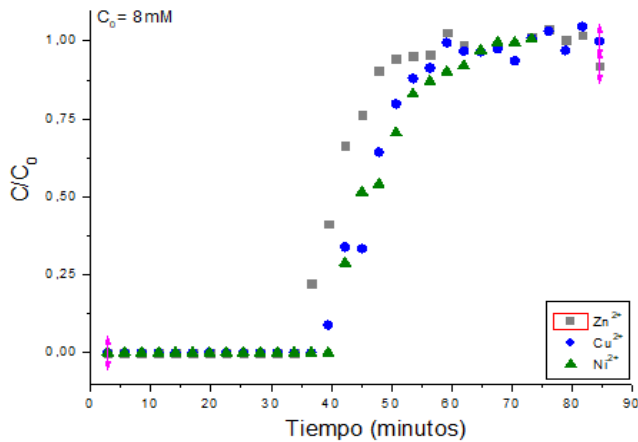


Figura 6: ensayos continuos con distintos contaminantes analizados de forma individual a una concentración de 8mM.

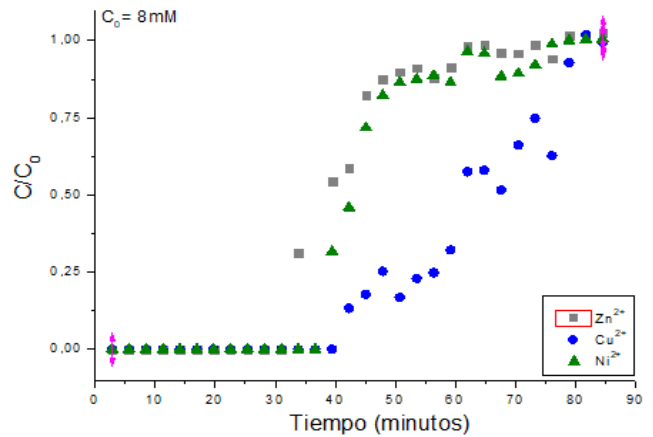


Figura 7: ensayos continuos con distintos contaminantes analizados de forma conjunta a una concentración de 8mM.

En ambas figuras 6 y 7 se puede observar la mayor afinidad del adsorbente por el Cu^{2+} aun en presencia de otros iones en competencia.

En las Figuras 8, 9 y 10 respectivamente se presentan los ajustes de los modelos de Thomas, Adams-Bohart y Yoon Nelson respectivamente para los iones Cu^{2+} , Ni^{2+} y Zn^{2+} en presencia simultánea.

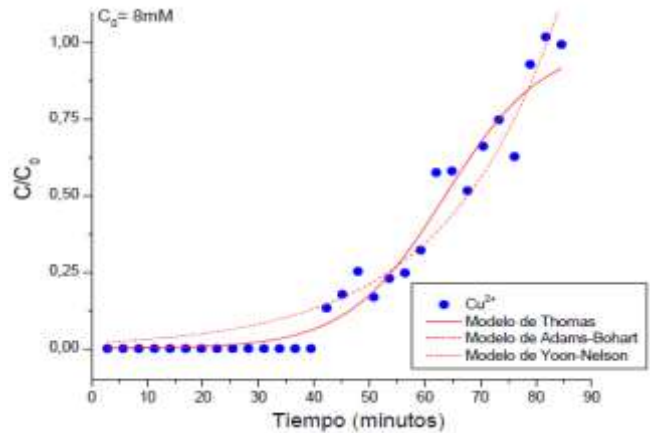


Figura 8 Ajuste de los modelos de Thomas, Adams-Bohart y Yoon Nelson Cu^{2+} en presencia simultánea de Ni^{2+} y Zn^{2+} .

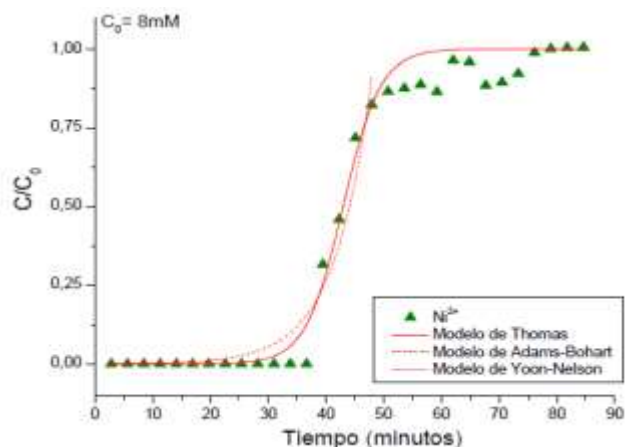


Figura 9. Ajuste de los modelos de Thomas, Adams-Bohart y Yoon Nelson Ni^{2+} en presencia simultánea de Cu^{2+} y Zn^{2+} .

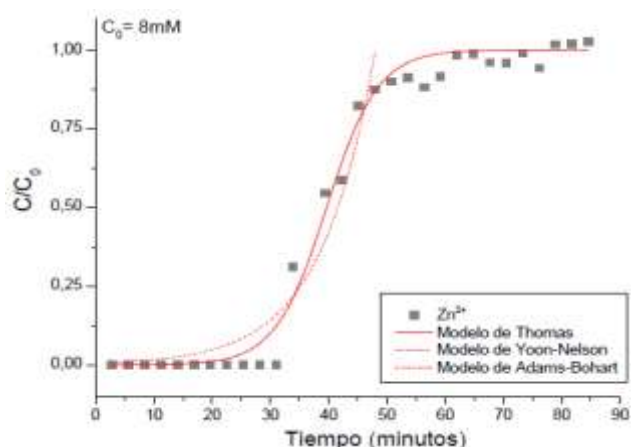


Figura 10. Ajuste de los modelos de Thomas, Adams-Bohart y Yoon Nelson Zn^{2+} en presencia simultánea de Ni^{2+} y Cu^{2+} .

En todos los casos se puede ver que los ajustes dieron buenos coeficientes de regresión, tal como se muestra en la tabla 1.

Modelos	Parámetros	Cu^{2+}	Ni^{2+}	Zn^{2+}
Thomas	K_{TH} (mL.min ⁻¹ .mmol ⁻¹)	20.6	30.6	33.6
	q (mmol.g ⁻¹)	0.017	0.020	0.013
	r^2	0.962	0.983	0.988
Adams-Bohart	K_{AB} (mL.min ⁻¹ .mmol ⁻¹)	8.8	15.7	16.0
	q (mmol.cm ⁻³)	0.016	0.017	0.011
	r^2	0.941	0.929	0.924
Yoon-Nelson	K_{YN} (min ⁻¹)	0.107	0.295	0.215
	τ (min)	67.6	45.7	42.0
	r^2	0.962	0.983	0.988

Tabla 1: parámetros experimentales de los modelos de Thomas, Adams-Bohart y Yoon-Nelson para los ensayos multielementales

Desorción y disposición final de los adsorbentes saturados
Para considerar la posibilidad de reutilizar los adsorbentes saturados con contaminantes, los ensayos de desorción mostraron que, en contacto con agua desionizada, el

adsorbente no libera los contaminantes al medio acuoso, por lo cual, el ensayo de desorción resultó satisfactorio para avanzar con la posibilidad de dar una disposición final segura de estos adsorbentes saturados [23]

El adsorbente saturado puede evaluarse como sustituyente de una fracción de agregados en la fabricación de morteros y hormigones de cemento, tal como lo sugieren diferentes autores. Los morteros ensayados se muestran en la Figura 11. La Resistencia del mortero a los 28 días de ensayo se mantiene en el rango de los 20 MPa, con una resistencia comparable a la del patrón respectivo. Respecto a los ensayos de lixiviado, no se detectan iones contaminantes liberados.



Figura 11: Morteros de Hormigón

De forma preliminar, los ensayos e lixiviado y los ensayos de resistencia y flexibilidad indican la posibilidad de reusar estos adsorbentes saturados con Cu^{2+} , Ni^{2+} y Zn^{2+} como sustituyentes de agregados del hormigón.

CONCLUSIONES

Como corolario final, la utilización de estos desechos de demolición como adsorbentes arrojó resultados satisfactorios, en particular cuando se trata de un efluente con Cu^{2+} , tanto cuando se encuentra de forma aislada o en conjunto con otros metales como lo analizados. En paralelo, el bajo costo asociado a estos adsorbentes es una gran ventaja a la hora de evaluar económicamente su utilización frente a otros adsorbentes tradicionales que, en muchos casos, son significativamente más costosos.

Además, los adsorbentes ya saturados pueden utilizarse como reemplazo de una fracción de la arena fina utilizada para la manufactura de concreto u hormigón, lo cual muestra otras de las ventajas a la hora de usar estos adsorbentes.

En definitiva, esta situación de reutilización de desechos y tratamiento o eliminación de contaminantes en efluentes aporta positivamente a los principios base de la economía circular, culminando con su disposición final y segura en la construcción de nuevas obras civiles.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecemos el financiamiento a la Universidad de Buenos Aires (UBACyT 20020190100323BA - 20020190200302BA - PIDAE Nro 4497/2022) y al Grupo Mitre por proveernos el material de demolición.

- [22]EPA Environmental Protection Agency. 2004. SW-846 Test Method 1310B: Extraction Procedure (EP) Toxicity Test Method and Structural Integrity Test.
- [23] Kurda, R., Silvestre, J. D. and de Brito, J., 2018. Toxicity and environmental and economic performance of fly ash and recycled concrete aggregates use in concrete: A review. *Heliyon* 4, e00611.

REFERENCIAS

- [1] Página Web de la ONU: 'Objetivos del desarrollo sustentable'
- [2] Página Web de Noticias del Parlamento Europeo: 'Economía Circular: definición, importancia y beneficios'.
- [3] Página Web del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana del Gobierno de España: 'La Agenda Urbana de la Unión Europea, El Pacto de Amsterdam (2016) y la Declaración de Bucarest (2019)'
- [4] Damrongsiri, S. (2017). Feasibility of using demolition waste as an alternative heavy metal immobilising agent. *Journal of Environmental Management* 192, 197-202.
- [5] Abina, A., Puc, U. and Zidanšek, A., 2022. Challenges and opportunities of terahertz technology in construction and demolition waste management. *J. Environ. Manag.* 315, 115-118, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115118>.
- [6] Aslam, M. S., Huang, B. & Cui, L., 2020. Review of construction and demolition waste management in China and USA. *Journal of Environmental Management* 264, 110445, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110445>.
- [7] Llatas, C. (2013). Methods for estimating construction and demolition (C&D) waste. In "Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste" (F. Pacheco-Torgal, V. W. Y. Tam, J. A. Labrincha, Y. Ding and J. de Brito, eds.), pp. 25-52. Woodhead Publishing
- [8] Di Giulio, R. T., and Newman, M. C. (2008). Ecotoxicology. In "Casarett and Doull's. Toxicology. The basic science of poisons" (C. D. Klaasen, ed.). McGraw-Hill, Kansas.
- [9] IARC (2012). A review of human carcinogens Lyon, France. . International Agency for Research on Cancer, Monographs on the evaluation of the carcinogenic risk of chemicals in humans 100C.
- [10]Liu, J., Goyer, R. A., and Waalkes, M. P. (2008). Toxic effects of metals. In " Casarett and Doull's.Toxicology. The Basic Science of Poisons." (C. D. Klaasen, ed.). Mc Graw - Hill, New York, United State.
- [11]Muyssen, B. T. A., Brix, K. V., DeForest, D. K., and Janssen, C. R. (2004). Nickel essentiality and homeostasis in aquatic organisms. *Environmental Review* 12, 113- 131.
- [12]Coleman, N., E Lee, W., and Slipper, I. (2005). "Interactions of aqueous Cu²⁺, Zn²⁺ and Pb²⁺ ions with crushed concrete fines."
- [13]Kalderis, D., Kayan, B., Akay, S., Gözmen, B., and Kulaksız, E. (2017). "Adsorption of 2,4-dichlorophenol on paper sludge/wheat husk biochar: Process optimization and comparison with biochars prepared from wood chips, sewage sludge and HOG fuel/demolition waste."
- [14]Grace, M. A., Clifford, E., and Healy, M. G. (2016). The potential for the use of waste products from a variety of sectors in water treatment processes. *Journal of Cleaner Production* 137, 788-802.
- [15]Lu, H., Wei, F., Tang, J., and Giesy, J. P. (2016). Leaching of metals from cement under simulated environmental conditions. *Journal of Environmental Management* 169, 319-327.
- [16]Ferro, G. A., Spoto, C., Tulliani, J. M., and Restuccia, L. (2015). Mortar Made of Recycled Sand from C&D. *Procedia Engineering* 109, 240-247.
- [17]Mehta, P., and Monteiro, P. (2006). "Concrete: microstructure, properties and materials," 3er/Ed. McGraw-Hill Education, United State.
- [18]Miller, J. C., and Miller, J. N. (1993). "Estadística para Química Analítica," 2ª/Ed. Addison Wesley Iberoamerican S.A., Wilmington, Delaware, United State.
- [19]Boeykens, S. P., Piol, M. N., Samudio Legal, L., Saralegui, A. B., and Vázquez, C. (2017). Eutrophication decrease: Phosphate adsorption processes in presence of nitrates. *Journal of Environmental Management* 203, 888-895.
- [20]Piol, M. N., Paricoto, M., Saralegui, A. B., Basack, S., Vullo, D., & Boeykens, S. P. (2019). Dolomite used in phosphate water treatment: Desorption processes, recovery, reuse and final disposition. *Journal of Environmental Management*, 237, 359-364.
- [21]European Standars, 2016. BS EN 196-1:2016 Methods of testing cement determination of strength.