

USO DE TEST DE LIXIVIACION PARA DETERMINAR LA MIGRACION DE CONTAMINANTES EN MORTEROS DE SUSTITUCIÓN CON RESIDUOS DE CATALIZADOR DE CRAQUEO CATALITICO (FCC)

USE OF LEACHING TEST TO DETERMINE CONTAMINANT MIGRATION IN MORTARS CEMENT SUBSTITUTED WITH CATALYST CATALYTIC CRACKING RESIDUE (FCC)

CAROLINA MARTÍNEZ-LÓPEZ

Estudiante de Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional de Colombia, Palmira, camalo37@hotmail.com

JANNETH TORRES-AGREDO

Ph.D, Profesora Asociada, Universidad Nacional de Colombia, Grupo GIMMA, Palmira, jtorresa@unal.edu.co

RUBY MEJÍA-DE GUTIERREZ

Ph.D, Profesora Titular, Universidad del Valle, Grupo de investigación Materiales Compuestos (CENM) ruby.mejia@correounivalle.edu.co

ANA MARÍA MELLADO-ROMERO

Ph.D, Profesora Titular, Universitat Politècnica de València, Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón ICITECH, España, amellado@cst.upv.es

JORDI PAYÁ-BERNABEU

Ph.D, Catedrático, Universitat Politècnica de València, ICITECH, España, jjpaya@cst.upv.es

JOSÉ MARÍA MONZÓ-BALBUENA

Ph.D, Catedrático, Universitat Politècnica de València, ICITECH, España, jmmonzo@cst.upv.es

Recibido para revisar Diciembre 17 de 2012, aceptado Julio 16 de 2013, versión final Agosto 2 de 2013

RESUMEN: En este estudio se evalúa la viabilidad ambiental en la utilización de dos residuos de catalizador de craqueo catalítico procedentes de fuentes diferentes (Colombia y España), como sustitución parcial del cemento Portland, para la fabricación de materiales de construcción. Inicialmente se realizó la caracterización de los materiales analizando la composición química, la distribución del tamaño de partícula y la morfología. Posteriormente, para determinar las características tóxicas de lixiviación, se aplicaron las técnicas de SPLP (Synthetic Precipitation Leaching Procedure) y NEN 7341 de la normativa holandesa, en morteros sustituidos con un 20% de FCC con respecto a la cantidad de cemento. Los resultados indican que las concentraciones de los metales pesados lixiviados son muy bajas comparadas con lo establecido por la legislación ambiental. Debido a esto, se considera que el residuo en las proporciones estudiadas no constituye un problema ambiental, proponiéndose como un material alternativo para el sector de la construcción.

PALABRAS CLAVE: Catalizador usado de craqueo catalítico, Cemento Portland, Estabilización/Solidificación, Lixiviación de metales.

ABSTRACT: This study evaluates the environmental viability to use two residues of the catalytic cracking catalyst from different sources (Colombian and Spain), as partial replacement of Portland cement in the manufacture of building materials. Chemical composition, particle size distribution and morphology of the wastes were determined. Leaching of toxic characteristics were evaluated by applying techniques SPLP (Synthetic Precipitation Leaching Procedure) and NEN 7341 from Dutch regulations in mortars blended with 20% FCC relative to the amount of cement. The results indicate that the concentrations of the leached heavy metals are very low compared with that established by environmental legislation. Because of this, it is considered that the residue in the proportions tested not constitute an environmental problem, proposing as an alternative material for the construction industry.

KEYWORDS: Fluid catalytic cracking catalyst residue, Portland Cement, Stabilization/Solidification, Metal leaching

1. INTRODUCCIÓN

Las sustancias peligrosas pueden ser originadas tanto por fenómenos naturales como en perturbaciones ambientales producto de las actividades antrópicas desarrolladas en la actual sociedad industrializada [1, 2]. Sin lugar a dudas, el conocido fenómeno de la globalización ha mejorado considerablemente la calidad de vida de la humanidad debido a la innovación tecnológica [3]. No obstante, al mismo tiempo tal desarrollo se ha visto acompañado de una progresiva destrucción en el entorno, deterioro de los ecosistemas, contaminación de los recursos naturales, extinción de especies, y cambio climático global [4-6].

En los residuos industriales, un elemento tóxico puede ser menos peligroso desde la perspectiva medioambiental, si se encuentra fijado a la matriz del material, en comparación con otro que esté presente en una menor cantidad, pero que posea una gran movilidad, es decir que sea fácilmente lixiviable [7]. De este modo, se hace necesario contar con un ensayo que permita de forma segura, rápida y económica, evaluar la potencial peligrosidad de un residuo mediante la simulación del proceso de interacción del mismo con el medio [8]. Para tal fin, existen los denominados test de lixiviación, que han demostrado ser una herramienta de caracterización fundamental. Actualmente muchos países han desarrollado sus propios ensayos de lixiviación, siendo tan avanzados en algunos casos, que incluso su legislación está soportada en ellos [9].

Existen diferentes tipos de ensayos de lixiviación, por lo que su selección está en función de las condiciones en que el material interactúa (escenario). Entre estos algunos se han desarrollado para ser aplicados a materiales de construcción, que en general se pueden categorizar como: Test de percolación, Prueba de columna y Prueba de dependencia al pH [10]. Asimismo han sido incorporados en diferentes reglamentaciones, básicamente de Estados Unidos, los Países Bajos y Alemania. Entre estos están el test SPLP desarrollado en Estados Unidos por la US EPA (Environmental Protection Agency) y la norma holandesa NEN 7341, desarrollada por el NNI (Netherlands Normalisation Institute), adoptada por la Comunidad Europea para su aplicación en todo su territorio [11-13].

El residuo generado en los procesos de craqueo

catalítico en las industrias petroquímicas, codificado como FCC (del inglés Fluid Catalytic Cracking), cuya producción a nivel mundial se estima en 400.000 toneladas métricas anuales [14], se utiliza de manera generalizada en rellenos sanitarios; sin embargo, cada vez más las regulaciones ambientales han señalado la importancia y posibilidad que sus constituyentes sean lixiviados al medio exterior [15]. En los últimos años este material ha venido siendo investigado como adición puzolánica en cementos con excelentes resultados [16-22].

Teniendo en cuenta que este residuo procede del craqueo catalítico de las fracciones pesadas del petróleo, para la obtención de fracciones más ligeras (naftas), se estima que contiene metales pesados en cantidades apreciables tales como Pb, Ni, V, Cr, As, Zn, entre otros, procedentes del petróleo de origen. Por lo tanto, es fundamental determinar el nivel de toxicidad generado, cuando este material es introducido en matrices cementicias, explorándose la interacción de estos metales con la matriz.

El presente estudio se dirige a la evaluación de la lixiviación de metales pesados del residuo FCC, para lo cual se tomaron materiales procedentes de dos fuentes diferentes, y se aplicó la técnica de solidificación/estabilización (S/E) con cemento portland. Con base a los resultados obtenidos, se establecieron las comparaciones con la legislación pertinente, determinando finalmente si su inclusión en materiales de construcción basados en cemento Portland es ambientalmente viable o no.

2. MATERIALES Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Las muestras de catalizador gastado de craqueo catalítico (FCC) empleadas en este estudio fueron proporcionadas por dos industrias de refinería de petróleo con diferente localización. La muestra FCC1 corresponde al residuo suministrado en Colombia por la industria petrolera Ecopetrol. Por otra parte, la muestra FCC2 proviene de la refinería de BP OIL España S.A del Grao de Castellón, en España. El cemento utilizado fue un cemento Portland comercial no-adicionado (OPC). Se usó además arena de Ottawa para la preparación de los morteros.

La tabla 1 presenta las características físicas y químicas del cemento y de las muestras de FCC utilizadas. De los datos reportados en la tabla, se deduce que los residuos FCC1 y FCC2 consisten básicamente en un material silicoaluminoso, con un contenido de sílice y alúmina de alrededor del 90%. Se observa además, que el tamaño medio de partícula del FCC es mucho mayor al del cemento. Por lo anterior, se determinó realizar un proceso de molienda mediante un molino con cuerpos molidores cilíndricos marca Gilson Company 764 AVM, logrando obtener un material con tamaño medio de partícula de 19,87 μm , en un tiempo total de molienda de 5 horas para el caso del FCC1. El catalizador proveniente de España (FCC2), fue molido durante 20 minutos utilizando un molino Gabrielli, obteniendo un diámetro medio de partícula de 17.1 μm .

En la figura 1 se muestran las imágenes capturadas mediante la aplicación de la técnica de microscopía electrónica de barrido (MEB), en equipo FEI QUANTA 200, para el FCC1, y en un equipo JEOL JSM-6300, para el FCC2. La figura 1 ilustra la imagen obtenida para el FCC1 (a, b) y FCC2 (c, d): catalizadores en estado original (a y c) y molido (b y d), respectivamente. Según se aprecia, la imagen muestra como el catalizador en su estado original presenta en general partículas de forma esferoidal (Fig. 1.a, 1.c) con aspecto similar. Después de molido el catalizador, la partícula es reducida (Fig. 1.b y d), creándose fragmentos de partículas irregulares, aunque en ocasiones las partículas esferoidales originales de menor tamaño permanecen.

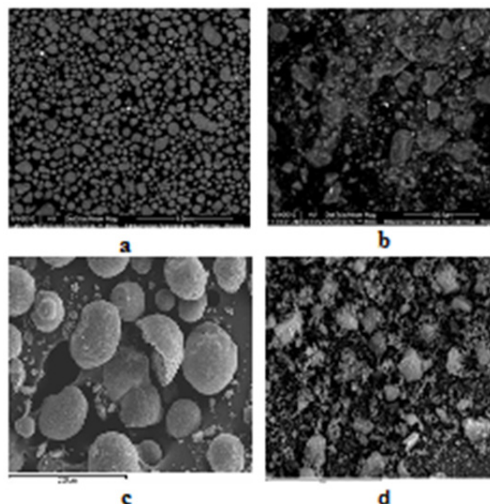


Figura 1. Imágenes por MEB de: a) FCC1 original, b) FCC1 molido, c) FCC2 original y d) FCC2 molido.

Con el fin de evaluar la viabilidad y efectividad de la técnica de S/E empleando FCC como sustitución parcial al cemento portland, se prepararon morteros usando arena de Ottawa en una relación 1:2,75 (cemento: arena) y una proporción del 20% de FCC con respecto a la cantidad de cemento. La relación agua/binder fue de 0.52. Tras la elaboración de las muestras, éstas fueron sumergidas en agua saturada con $\text{Ca}(\text{OH})_2$, a temperatura ambiente, por un periodo de 28 días. Cumplido este tiempo, se continuó con la realización de los ensayos de lixiviación.

El método 1312 de la EPA test SPLP del inglés (Synthetic Precipitation Leaching Procedure) [23], está diseñado para determinar la migración de constituyentes tóxicos tanto orgánicos como inorgánicos desde un residuo hasta un medio exterior. La movilidad se puede determinar a partir del contacto de la muestra con fluidos de extracción, especificados según el método. Para la realización del ensayo SPLP, se requirió disminuir el tamaño de partícula de los morteros, hasta alcanzar un diámetro inferior a 9.5 mm aproximadamente. A continuación se procedió a seleccionar el fluido extractor, tal como lo describe el método, para este caso, se seleccionó el fluido No. 1, el cual consiste en una mezcla de ácidos sulfúrico y nítrico (60/40 en peso) diluido a un volumen de 1L de agua destilada, hasta alcanzar un pH de $4,20 \pm 0,05$. Teniendo en cuenta lo indicado en el método [23], la cantidad de fluido de extracción debe ser de 20 veces el peso de la muestra; razón por la cual se tomaron 12.5 gramos de muestra y 250 mL de fluido extractor; se

Tabla 1. Características químicas y físicas del FCC y del cemento empleado.

| Características | FCC1 | FCC2 | Cemento (OPC) |
|---|-------|--------|---------------|
| Composición química (%) | | | |
| SiO_2 | 48,09 | 48.2 | 19,43 |
| Al_2O_3 | 41,57 | 46.0 | 4,00 |
| Fe_2O_3 | 0,91 | 0.95 | 3,61 |
| CaO | 0,22 | < 0.01 | 64,46 |
| MgO | 0,13 | < 0.01 | 1,52 |
| K_2O | 0,09 | < 0.01 | 0,39 |
| TiO_2 | 0,85 | n.d | 0,34 |
| Pérdidas por ignición | 2,19 | 1.5 | 2,58 |
| Propiedades Físicas: | | | |
| Densidad (kg/m^3) | 2,63 | 2.45 | 3,20 |
| Tamaño medio de partícula (μm) | 83,00 | 71.00 | 16,07 |
| n.d. no detectado | | | |

colocaron en agitación durante un periodo de tiempo de 18 ± 2 horas aproximadamente, a una temperatura de 22 ± 3 °C. Una vez terminado el proceso de mezcla continua, se llevaron a cabo las filtraciones mediante un filtro de vidrio de tamaño efectivo de poro de $0.7 \mu\text{m}$. Finalmente se acidificaron cada uno de los extractos mediante adición de ácido nítrico (1N) hasta alcanzar un pH inferior a 2.0. El líquido extraído constituye el extracto de SPLP, al cual se le hicieron los análisis correspondientes.

Para una mayor caracterización de las muestras, y con el fin de evaluar el comportamiento de lixiviación a largo plazo, se consideró también conveniente conocer la cantidad disponible de los metales pesados lixiviables de los catalizadores mediante el ensayo de lixiviación NEN 7341, o ensayo de disponibilidad, que permite valorar el porcentaje de fijación de los contaminantes con respecto a la matriz cementante [24].

Para la aplicación del ensayo de disponibilidad, la muestra fue inicialmente molida hasta obtener un tamaño de partícula inferior a $125 \mu\text{m}$. La extracción se llevó a cabo con agua acidulada con HNO_3 mediante dos pasos manteniendo una relación líquido-sólido (L/S)=50 l/kg. Para ello se dispusieron 5 g de muestra en 250 ml de agua destilada y, manteniendo la suspensión en agitación constante durante todo el tiempo del ensayo, se fue adicionando ácido nítrico (1N) de forma que se mantuvo ésta a un valor de $\text{pH}=7$. Tras filtrar la suspensión, la segunda etapa se llevó a cabo de igual forma manteniendo un $\text{pH}=4$. El tiempo de contacto de la muestra con el medio lixivante en cada etapa fue de tres horas. Una vez realizado esto, se filtró al vacío, con un filtro de vidrio de tamaño efectivo de poro de $0.7 \mu\text{m}$. Por último, el líquido extraído fue acidificado hasta alcanzar un $\text{pH}=2$, como lo establece la norma para su conservación y posterior análisis.

En ambos casos la determinación de metales pesados, se realizó por medio de un Espectrofotómetro de Absorción Atómica marca Shimadzu, Modelo AA630.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La lista de los metales obtenidos a partir de los análisis en la muestra original FCC1 y FCC2 y el cemento utilizado, son presentados en la tabla 2. Para el cemento, estas pruebas se llevaron a cabo con el propósito de

determinar, si contiene concentraciones adicionales capaces de ocasionar interferencia durante el desarrollo en el ensayo de toxicidad, para los catalizadores.

Según se aprecia en la tabla 2, tanto los residuos de catalizador FCC como el cemento, poseen en su composición química metales pesados, si bien hay diferencias notables entre cada material. El elemento metálico que se encuentra en mayor cantidad en el cemento es el níquel, seguido del zinc y el vanadio; el resto de metales están en concentraciones muy bajas, por debajo de 15 ppm.

Tabla 2. Identificación de los metales presentes en el FCC y cemento

| Metales (mg/Kg) | FCC1 | FCC2 | | CEMENTO (OPC) |
|-----------------|--------|-------|--|---------------|
| | | | | |
| Zn | 92.9 | 18.6 | | 80.61 |
| Cr | 33.73 | 37 | | 11.11 |
| Pb | 25 | 46 | | <13.38 |
| As | 1.57 | 14.2 | | 0.73 |
| Cd | 5.27 | 0.06 | | 14.7 |
| Ni | 3018 | 634 | | 143.29 |
| V | 4256.7 | 412 | | <94.65 |
| Ba | 177.73 | ** | | ** |
| Sr | 60.49 | ** | | ** |
| La | 41100 | 18558 | | ** |
| Ce | ** | 625 | | ** |
| Pr | ** | 2297 | | ** |
| Nd | ** | 3999 | | ** |

** No hay información disponible para este elemento.

En lo que respecta a la composición de los residuos de catalizador FCC, hay una diferencia sustancial debida a su distinto origen y probablemente también debido al distinto tipo de crudo de petróleo procesado en cada caso. Así, mientras el FCC2, procedente de España, tiene un mayor contenido en elementos lantánidos, en el FCC1 colombiano predominan los metales de transición vanadio y níquel, cuyos contenidos son 4256.7 ppm y 3018 ppm, respectivamente. Estos valores son similares a los obtenidos por [15], que para el caso del vanadio reportan un contenido de 3518 ppm y del níquel 3225 ppm.

Partiendo del contenido en metales pesados encontrados en los FCC1 y FCC2, y tomando como base algunos documentos publicados por autoridades ambientales, como el *User's Guide to Hazardous Waste Classification* de Canadá [25] y la información proporcionada por la

EPA (*Environmental Protection Agency*, EEUU) [26], es posible afirmar que este tipo de residuo por sí solo, posee características que lo catalogan como peligroso [27, 28]; así mismo lo reporta [14].

3.1. Ensayo SPLP

Los resultados obtenidos a partir de la aplicación del test SPLP a los morteros en los que se ha sustituido un 20% en peso de cemento por FCC se compararon con los límites máximos permisibles de los metales estudiados, para el caso de agua de uso doméstico, establecido por la legislación de Estados Unidos, la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Unión Europea (UE). Los datos se tomaron de la EPA, la OMS, y la directiva 98/83/EC de Europa, respectivamente [29-31]. Para el caso del Vanadio se empleó como referencia lo establecido en la legislación alemana con un valor máximo de 0.05 mg/L en aguas superficiales para su potabilización [32]. En la tabla 3 aparecen reportados dichos valores de límites máximos para cada una de las legislaciones mencionadas.

En la tabla 4 se registran los valores obtenidos a partir de la aplicación del test SPLP método 1312 de la US EPA, a los morteros en los que se ha sustituido un 20% en peso de cemento por FCC.

Tabla 3. Límites máximos permisibles de los metales pesados para el agua según la EPA, OMS y UE.

| Límites máximos permisibles (mg/L) | | | |
|--|-------|-------|-------|
| Metales | EPA | OMS | UE |
| Zn | 5.00 | 3.00 | ** |
| Cr | 0.10 | 0.05 | 0.05 |
| Pb | 0.015 | 0.01 | 0.01 |
| As | 0.05 | 0.01 | 0.01 |
| Cd | 0.005 | 0.003 | 0.005 |
| Ni | ** | 0.02 | 0.02 |
| V | ** | ** | ** |
| Ba | 2.00 | 0.30 | ** |
| Sr | 4.00 | ** | ** |
| **No hay información disponible para este elemento | | | |

Tabla 4. Resultados del ensayo de SPLP en morteros.

| Metales (mg/L) | SPLP Mortero FCC1 | SPLP Mortero FCC2 |
|---------------------------------------|-------------------|-------------------|
| Zn | 0.12 | <0.17 |
| Cr | <0.05 | <0.06 |
| Pb | <0.13 | * |
| As | <0.002 | <0.00046 |
| Cd | <0.05 | <0.03 |
| Ni | 1.18 | <0.13 |
| V | < 0.95 | <0.94 |
| Ba | * | <0.72 |
| Sr | * | <0.08 |
| * Por debajo del límite de detección. | | |

Mediante una comparación entre las tablas 3 y 4, se evidencia que los valores de los metales Zn, Cr y As se encuentran por debajo de los límites establecidos por la legislación. En otros casos, como Ba, Sr y Pb, su contenido queda por debajo del límite de detección de la técnica empleada en su análisis, por lo que, aunque no se puede realizar la comparación con la tabla, permite deducir que también cumplen con la legislación vigente al respecto.

Para el caso del Ni, se aprecia que para el mortero con FCC1, el contenido en el lixiviado es de 1.18 ppm, superior al límite que establece la legislación; con lo que se deduce que la técnica de S/E empleada no es lo suficientemente efectiva para la inmovilización de este metal contenido en dicho residuo. Sin embargo, en el mortero sustituido con FCC2 el contenido en níquel tras el ensayo es mucho más bajo, inferior a 0.13 ppm. Para Cd y V, no se pueden extraer deducciones concluyentes respecto al cumplimiento de los requisitos definidos por las legislaciones consultadas, pero su bajo contenido tras el ensayo, lleva a afirmar que su retención en la matriz cementante ha sido efectiva.

Como conclusión se puede afirmar que, en las condiciones ensayadas, y a excepción del níquel, la aplicación de la técnica de S/E para ambos catalizadores FCC fue efectiva.

3.2. Ensayo NEN 7341

Los resultados obtenidos a partir de la aplicación del ensayo de lixiviación holandés NEN 7341 a los

morteros sustituidos con el 20% de FCC1, se reportan en la tabla 5. Para establecer una comparación con el mortero FCC2, se utilizaron los datos extraídos del trabajo de Velázquez et al [33], adaptándolos al caso de una sustitución del 20%. Dichos datos aparecen igualmente reportados en la tabla 5.

Tabla 5. Resultados del ensayo NEN 7341 en morteros.

| Metales (mg/L) | NEN 7341 Mortero FCC1 | NEN 7341 Mortero FCC2 |
|----------------|-----------------------|-----------------------|
| Zn | 0.1 | ** |
| Cr | <0.05 | ** |
| Pb | * | ** |
| As | 0.00172 | ** |
| Cd | <0.03 | ** |
| Ni | * | 0.253 |
| V | * | 0.080 |
| Ba | <0.53 | ** |
| Sr | 0.64 | ** |
| La | ** | 1.333 |
| Nd | ** | 0.613 |
| Ce | ** | 0.093 |
| Pr | ** | 0.347 |

* Por debajo del límite de detección.
** No determinado en el análisis.

Al observar los datos consignados en la tabla 5 y compararlos con los de la tabla 4, se puede inferir que las concentraciones de Ba y Sr se encuentran por debajo de lo establecido por la EPA, aunque no se puede afirmar si el Ba cumple los requisitos marcados por la OMS. Respecto al Cd, no se dispone de precisión suficiente en el análisis realizado para deducir si podría estar cumpliendo la legislación vigente.

Respecto al mortero sustituido con FCC2, se puede asegurar que la concentración de Ni en el lixiviado supera a la máxima permitida por la OMS y la UE. Para el resto de metales en esta muestra (vanadio y lantánidos), no están definidos los límites máximos en ninguna de las legislaciones consultadas, debido a su poca probabilidad de aparición.

Si bien es cierto, ambos métodos aplicados en el presente estudio son similares y corresponden a ataques fuertes para determinar las características de

toxicidad del residuo, el SPLP por su parte, simula el efecto de lluvia ácida, fenómeno que se presenta según lo reportado en la literatura a un pH cercano a 4 unidades, por lo que emplea un búfer de ácido nítrico y sulfúrico con un pH de 4.2 ± 0.05 . El método NEN 7341 tiene como objetivo indicar la cantidad de un componente en particular que pueda lixiviar a partir de un material de residuos granulares expuestos a condiciones extremas, y permite por tanto valorar el grado de fijación de los contaminantes tóxicos por parte de la matriz cementante. Los resultados encontrados, a partir de la aplicación de ambas técnicas, fueron similares.

Cabe anotar que resulta más fuerte el ataque de la muestra en el ensayo SPLP, donde se registró mayor cantidad de Ni y de Pb. Esto se puede explicar debido a que una de las características que hacen el medio lixiviante más agresivo es el pH, y que por lo general el agua ácida acelera la lixiviación en un mortero [9]. La técnica SPLP, además de emplear ácido nítrico, usa ácido sulfúrico, por lo que solubiliza mayor cantidad de metales.

Algunos autores [14, 15, 34, 35] han aplicado técnicas como el TCLP (método 1311 de la EPA) para analizar la lixiviación de metales como plomo, cromo, cadmio, níquel, arsénico, bario, cadmio, vanadio, cobalto y zinc, a partir del uso de FCC como sustitución parcial del cemento portland, concluyendo que después de que el catalizador gastado se fijó con el cemento, la lixiviación de los metales pesados no excedió los valores máximos permisibles. Estos resultados coinciden con lo obtenido en la aplicación de las técnicas de SPLP Y NEN.

4. CONCLUSIONES

A partir del análisis de los valores de las concentraciones iniciales de metales para ambos residuos FCC1 y FCC2, se encontró que éstos eran considerables. Sin embargo, una vez éste es incorporado en la matriz cementicia mediante la aplicación de la técnica de S/E, la mayoría de los contaminantes son estabilizados presentando una cantidad de lixiviación muy baja, a excepción del níquel que superó los límites para el mortero con FCC1 con la técnica SPLP.

Con base a los resultados obtenidos se puede concluir que los residuos de FCC estudiados no presentan restricción ambiental alguna para su empleo como

material en sustitución parcial del cemento, puesto que para el caso de la aplicación del test NEN 7341 de la normativa holandesa, todos los metales a excepción del níquel, están situados por debajo de los límites establecidos por la legislación nacional e internacional.

Mediante la aplicación de las dos técnicas SPLP y NEN 7341, se demostró que el cemento tiene la capacidad de fijar este tipo de metales, teniendo en consideración además, que el ataque con la técnica SPLP fue más agresivo que la técnica NEN 7341, y que las comparaciones fueron realizadas con la legislación más restrictiva, que en este caso consistió en destinación de agua para consumo humano. Por lo tanto, el uso de este residuo como sustitución del cemento en la proporción estudiada es válido, y representa una buena oportunidad para la industria de la construcción.

Asimismo, en el estudio se puede señalar la importancia derivada de la reutilización de un residuo industrial, cuyo aprovechamiento disminuye en gran medida la cantidad de cemento a emplear, contribuyendo así a la disminución de los gases de efecto invernadero, y mejorando el desempeño mecánico en este tipo de materiales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a las empresas Ecopetrol y BP OIL por el suministro de las muestras de FCC utilizadas en el presente estudio; a la Universidad del Valle, Universidad Nacional de Colombia y Universitat Politècnica de València (España), así como a Colciencias por el apoyo para la realización del presente estudio.

REFERENCIAS

- [1] Henry, J.G. and Runalls, O.J.C. Residuos peligrosos, En: Ingeniería ambiental (Eds. J.G. HENRY and G.W Heinke), Prentice Hall, México, pp. 620-622, 1999.
- [2] Talinli, I., Yamantürk, R., Aydin, E. and Basakçıldan, S., A rating system for determination of hazardous wastes, *J. Hazard. Mater.*, 126, pp. 23-30, 2005.
- [3] Musee, N., Lorenzen, L. and Aldrich, C., An aggregate fuzzy hazardous index for composite wastes. *J. Hazard. Mater.*, 137, pp. 723-733, 2006.
- [4] Schneider, S.H., The changing climate, *J. Scient. Amer.*, 261, pp. 70-79, 1989.
- [5] Gabaldón, A. J., Desarrollo sustentable. La salida de América Latina, Grijalbo, Caracas, 2006.
- [6] Ávila, J., Contaminación atmosférica en las empresas cementeras en el marco de la responsabilidad social ante las comunidades adyacentes, *J. Centro de Invest. de Cienc. Admin. y Geren.*, 6(1), pp. 48-69, 2009.
- [7] Pacheco, A., Normativa ambiental aplicable a productos de la construcción. [PhD Thesis]. Barcelona, ES: Universidad Politècnica de Cataluña (UPC), 2009.
- [8] Rihm, A., Arellano, J., Sancha, A. M., Uso de test de lixiviación para caracterización de residuos del área minera y reflexiones sobre gestión de residuos peligrosos en América Latina. Memorias Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 26 (AIDIS 98). Lima, Perú, 1-8, Noviembre 1998.
- [9] Hidalgo, A. y Alonso, C., Evaluación del impacto medioambiental debido a la lixiviación de productos de base cemento. I Jornadas de Investigación en Construcción (Instituto de Ciencias de la Construcción "Eduardo Torroja"). Madrid, España, Tomo I, pp. 571-581, Junio 2005.
- [10] Van Der Sloot, H.A. and Dijkstra, J.C.L., ECN. Development of horizontally standardized leaching tests for construction materials: a material based or released based approach? ECN-C-04-060. Petten, Energy Research Centre of the Netherlands, 2004
- [11] Van Der Sloot, H.A., De Groot, G.J. and Wijktra, J., Leaching Characteristics of Construction Materials and Stabilization Products Containing Waste Materials. EN: Environmental aspects of stabilization and solidification of hazardous and radioactive wastes (Eds. P.L. Coté and T.M. Gilliam) ASTM, Philadelphia, pp. 125-149, 1989.
- [12] Marta, J., Sánchez, M. I. y Frías, M., Estudio de las variaciones mineralógicas y morfológicas en cenizas volantes provocadas por fenómenos de lixiviación. *J. Mater. constr.*, 49 (256), pp. 43-58, 1999.
- [13] Zhang, J., Liu, J., Li, C., Nie, Y. y Jin, Y., Comparison of the fixation of heavy metals in raw material, clinker and mortar using a BCR sequential extraction procedure and NEN 7341 test, *J. Cem. Concr. Res.*, 38, pp. 675-680, 2008.
- [14] Furimsky, E., Review of spent refinery catalyst: environment, safety and utilization, *J. Catal. Tod.*, 30, pp.

223-286, 1996.

[15] Sun, D., LI., X., Brungs, M. and Trimm, D., Encapsulation of heavy metals on spent fluid catalytic cracking catalyst, *J. Wat. Sci. and Tech.*, 38 (4-5), pp. 211-217, 1998.

[16] Antiohos, S.K., Chouliar, E. and Tsimas, S., Re-use of spent catalyst from oil-cracking refineries as supplementary cementing material, *J. Chin. Particuol.*, 4(2), pp. 73-76, 2006.

[17] Pacewska, B., Burowska, M., SKA, I. and Swat, M., Modification of properties of concrete by a new pozzolan a waste catalyst from the catalytic process in a fluidized bed, *J. Cem. Concr. Res.*, 32, pp. 145-152, 2002.

[18] Payá, J., Monzó, J. and Borrachero, M., Fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R) an excellent mineral by-product for improving early strength development of cements mixtures, *J. Cem. Concr. Res.*, 29, pp. 1773-1779, 1999.

[19] Payá, J., Monzó, J. and Borrachero, M., Physical, chemical and mechanical properties of fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R) blended cements, *J. Cem. Concr. Res.*, 31, pp. 57-61, 2001.

[20] Payá, J., Monzó, J., Borrachero, M.V., Velázquez, S. and Bonilla, M., Determination of the pozzolanic activity of fluid catalytic cracking residue. Thermogravimetric analysis studies on FC3R- lime pastes, *J. Cem. Concr. Res.*, 33, pp. 1085-1091, 2003.

[21] Payá, J., La 'transmutación' sostenible de los residuos para nuevas materias primas en el ámbito del concreto, *J. Dyna*, 79, pp. 38-47, 2012.

[22] Torres, J., Arley, E. y Silva, A., Evaluación de la actividad puzolánica de un residuo de la industria del petróleo, *J. Dyna*, 76, pp. 49-53, 2009.

[23] U.S. EPA. Test Method 1312. Synthetic Precipitation Leaching Procedure, SPLP. Available: <http://www.epa.gov/osw/hazard/testmethods/sw846/pdfs/1312.pdf>. [Citado 14 de Octubre de 2012].

[24] NNI. Netherlands Normalization Institute. NEN 7341. Leaching characteristics of solid (earthy and stony) building and waste materials. Leaching tests. Determination of the availability of inorganic components for leaching. Delft, Holanda, 1996.

[25] ENVIRONMENT CANADA. Export and Import of Hazardous Wastes Regulations; User's Guide to Hazardous Waste Classification, 2010.

[26] U.S. EPA. Handbook for Stabilization/Solidification of Hazardous Wastes. EPA 540-2-86-001. Washington, DC:U.S. Environmental Protection Agency, 1986.

[27] Treviño, C., New EPA rule will affect spent catalyst management, *J. Oil & Gas.*, pp. 62-64, 1998.

[28] Rapaport, D., Are spent hydrocracking catalysts listed hazardous wastes?, *J. Hydroc Proces.*, pp. 49-53, 2000.

[29] US EPA. Estándares del Reglamento Nacional Primario de Agua Potable. EPA 815-F-00-007, Washington, DC:U.S. Environmental Protection Agency, 2000.

[30] Directrices de la OMS para la calidad del agua potable, Génova, 1993. Available: <http://www.aguaessalud.com/directricesOMSaguapotable.html>. [Citado 31 de Octubre de 2012].

[31] UE. Estándares Europeos de la calidad del agua potable. Directiva 98/83/EC sobre la calidad del agua destinada a consumo humano. Available: <http://www.lenntech.es/aplicaciones/potable/normas/estandares-europeos-calidad-agua-potable.htm#ixzz13C1IJX00>. [Citado 31 de Octubre de 2012].

[32] Wirtschafts, U., Verlag-ges., Gas Wasser, U., Daten und Informationen zu Wasserinhaltsstoffen, DVGW-Schriftenreihe WASSER. Eschborn, pp. 1985-1988.

[33] Velázquez, S., Payá, J., Monzó, J., Borrachero, M.V., Peris-Mora, E., Mellado, A., Maquieira, A., Technological and environmental aspects of the reusing of spent fluid catalytic cracking catalyst (FCC) in hydraulic materials. WASCON 2003. Progress On The Road To Sustainability Fifth Int. Conference. España, pp. 413-422, Junio 2003.

[34] Rattanasak, U., Jaturapitakkul, CH. and Sudaprasert, T., Compressive strength and heavy metal leaching behaviour of mortars containing spent catalyst, *J. Was. Mang. & Res.*, 19, pp. 456-464, 2001.

[35] Su, N., Chen, Z. and Liu, F., Reuse of waste catalyst from petrochemical industries for cement substitution, *J. Cem. Concr. Res.*, 30, 22-27, 2000.