

Reutilización de un residuo de la industria petroquímica como adición al cemento portland

Reuse of a residue from petrochemical industry with portland cement

Um resíduo da indústria petroquímica em adição à cimento Portland

Janneth Torres Agredo¹, Jenny J. Trochez Serna² y
Ruby Mejía de Gutiérrez³

Recepción: 17-may-2011/Modificación: 12-mar-2012/Aceptación: 4-may-2012
Se aceptan comentarios y/o discusiones al artículo

Resumen

En el presente artículo se estudia la posibilidad de utilizar un residuo de la industria petroquímica, como sustitución parcial del cemento Portland, evaluando la presencia de elementos contaminantes en el residuo y su encapsulación, una vez se haya confinado con el cemento. Lo anterior, con el fin de determinar si su uso como material de construcción, puede o no causar un efecto negativo al medio ambiente. El residuo, denominado catalizador usado de craqueo catalítico (FCC), es un material que está compuesto por una zeolita tipo Y, dispersa en una matriz de óxidos inorgánicos. Se aplicó la técnica

¹ Ing. de Materiales, Ph.D, jtorresa@unal.edu.co, Profesora Asociada, Universidad Nacional de Colombia sede Palmira, Grupo de investigación Materiales y Medio Ambiente GIMMA, Palmira Colombia.

² Ingeniera de Materiales, Jenny.trochez@correounivalle.edu.co, estudiante de Doctorado en Ingeniería con énfasis en Ing. de Materiales, Universidad del Valle, Cali Colombia

³ Química, Ph.D, ruby.mejia@correounivalle.edu.co, Profesora Titular, Universidad del Valle, Grupo de investigación Materiales Compuestos, Cali Colombia

de TCLP (del inglés Toxicity Characteristic Leaching Procedure), en morteros adicionados con un 20%, de FCC con respecto a la cantidad de cemento. Los resultados mostraron que el catalizador no representa un problema desde el punto de vista de la lixiviación de elementos, tales como el As, Pb, Zn, Cr y La, los cuales estuvieron por debajo de los límites permisibles. Adicionalmente, se evaluó la actividad puzolánica del FCC, a partir de la norma ASTM C311, donde se demuestra la efectividad del residuo como adición cementicia. Con los resultados, se destaca la importancia de la reutilización de un residuo de la industria petroquímica, que además de lograr disminuir la cantidad de cemento a utilizar, mejora las resistencias mecánicas de los materiales que lo contienen.

Palabras claves: Catalizador usado de craqueo catalítico, metales pesados, estabilización/solidificación, cemento adicionado.

Abstract

In this article the possibility of using waste from the petrochemical industry, as partial replacement of Portland cement is studied, evaluating the presence of contaminants in the waste and the encapsulation, once it is confined on the cement. This has been done, in order to find a use to this residue without cause damage to the environment. This residue, called spent fluid catalytic cracking catalyst (FCC), is mainly formed by a type Y zeolite, which is dispersing in an inorganic oxides matrix. The toxicity characteristic leaching proceeding was applied, in mortars adding with 20% of FCC as Portland cement replacement. The results showed that the residue does not represent a problem from the point of view of the leaching of elements, such as As, Pb, Zn, Cr, and La, which were below to the permissible limits. Additionally, the pozzolanic activity of FCC was evaluated according to ASTM C311, where the efficiency of the residue as pozzolanic addition is demonstrated. With the results the importance of reusing a residue of the petrochemical industry is emphasized, that decreases the amount of cement to be used and improves the mechanical resistance of the materials containing it.

Key words: Spent fluid catalytic cracking catalyst, heavy metals, stabilization/solidification, blended cement.

Resumo

O presente trabalho avaliou o uso do resíduo de catalisador de processo de craqueamento catalítico (FCC) em argamassas à base de cimento Portland. O FCC é um resíduo gerado na indústria petroquímica, composto por uma zeólita tipo Y e óxidos inorgânicos. Foram preparadas argamassas contendo teores de 20% de FCC em substituição ao cimento. Estas argamassas foram submetidas a ensaios de lixiviação (TCLP), conforme procedimentos da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (US EPA). Os resultados apresentados mostraram que as concentrações de elementos como o As, o Pb,

o Zn, o Cr e o La ficaram abaixo das concentrações máxima estabelecidas pela EPA. Isto mostra que as matrizes cimentantes apresentaram bom desempenho ambiental na tecnologia de solidificação/estabilização (S/S). Ensaio complementares mostraram que o FCC apresentou características pozolánicas (ASTM C311). Portanto, os resultados verificados neste trabalho mostraram que o FCC apresenta potencial de uso na construção civil, sobretudo por apresentar propriedades pozolánicas. Com os resultados indicam a importância de reutilizar o resíduo proveniente da indústria petroquímica, que, além de realização diminuir a quantidade de cimento a serem utilizados, melhora a resistência mecânica dos materiais que o contenham.

Palavras chaves: catalisador de processo de craqueamento catalítico, metais pesados, solidificação/estabilização, cimento misturado.

1 Introducción

La tecnología de estabilización/solidificación (E/S) de residuos, es un proceso para reducir la peligrosidad de éstos, formando un material monolítico que permite restringir el área superficial expuesta a los agentes del medio ambiente [1]. La industria cementera, es una de las que presenta la mayor capacidad de absorber residuos de otras actividades industriales, ya sea dentro de sus etapas de producción o como adición para la elaboración de materiales basados en cemento [2].

La E/S de residuos utilizando cemento Portland, se fundamenta en dos aspectos, uno es la encapsulación física por la fijación de los contaminantes sobre la superficie de los productos de hidratación del cemento, además de la baja permeabilidad de las pastas endurecidas; por otro lado, se presenta una fijación química, que consiste en la interacción de los contaminantes con los productos de hidratación del cemento [3][4]. Para el caso de los metales, ésta E/S se lleva a cabo mediante la inmovilización de los iones metálicos a través del gel de Silicato Cálcico Hidratado (C-S-H) [5][6].

Entre los inconvenientes que presentan los residuos, es que además de tener componentes inertes, contienen sustancias y/o elementos químicos que causan daños al medio ambiente y a la salud de los seres vivos [1]. Una vez confinados los residuos en un material monolítico, existe la posibilidad que los contaminantes migren al exterior a través de procesos de lixiviación; esto debido a las interacciones que se presentan entre los residuos y los agentes del

medio ambiente, es por ello que es necesario realizar ensayos para evaluar la efectividad de la aplicación de la técnica de E/S [7].

El catalizador gastado del proceso de craqueo catalítico (del inglés Fluid catalytic cracking, FCC), es un residuo resultante de las refinerías de petróleo en las unidades de ruptura catalítica en lecho fluido, que está compuesto principalmente por sílice y alúmina en órdenes de hasta un 90 %; la producción a nivel mundial de este residuo se estima en 400.000 toneladas métricas al año [8]. Se ha reportado a este material como una puzolana muy activa, que cuando se mezcla con el cemento produce mejoras sustanciales en el desempeño mecánico y durable de los morteros y concretos que lo contienen [9][10][11][12][13][14]. Este residuo procede de la refinación del petróleo, y trae consigo elementos peligrosos tales como metales pesados y tierras raras en cantidades apreciables; por lo tanto, es de gran importancia estudiar el nivel de toxicidad generado cuando este material es adicionado en matrices cementicias.

En el presente artículo, se analiza la lixiviación de elementos tóxicos, en morteros de cemento Portland adicionados con un 20 % de FCC. Para tal fin se aplicó la técnica de TCLP (del inglés Toxicity Characteristic Leaching Proceeding), aprobada por la Agencia de Protección Medioambiental de Estados Unidos (US-EPA). Adicionalmente, con el fin de evaluar la viabilidad en la utilización de este residuo para la elaboración de materiales de construcción, se determinó la actividad puzolánica del residuo, según la norma ASTM C311 en morteros adicionados con el 20 % de FCC con respecto a la cantidad de cemento.

2 Materiales y procedimiento experimental

2.1 Caracterización de materiales

Para el estudio se utilizó un residuo de catalizador (FCC) el cual fue suministrado por una industria petrolera colombiana, y un cemento Portland comercial no-adicionado (OPC). Las características físicas y químicas son presentadas en la tabla 1. En esta tabla se observa que el FCC está compuesto en su mayoría por alúmina y sílice, en un orden cercano al 90 %, y posee un tamaño medio de partícula superior al cemento. Teniendo en cuenta lo anterior, se

tomó la determinación de realizar un proceso de molienda durante 5 horas, para lo cual se utilizó un molino con cuerpos moledores cilíndricos marca Gilson Company 764AVM, obteniéndose un material con un tamaño medio de partícula de $19,87 \mu\text{m}$.

Tabla 1: Características químicas y físicas del FCC y del cemento utilizado.

Características	FCC	Cemento (OPC)
Propiedades Químicas		
SiO_2	48,09	19,43
Al_2O_3	41,57	4,00
Fe_2O_3	0,91	3,61
CaO	0,22	64,46
MgO	0,13	1,52
K_2O	0,09	0,39
TiO_2	0,85	0,34
Pérdidas por ignición	2,19	2,58
Propiedades físicas		
Densidad (kg/m^3)	2,63	3,20
Tamaño medio de partícula (μm)	83,00	16,07

En la figura 1 se presentan imágenes tomadas por la técnica de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), en un equipo FEI QUANTA 200, para el FCC original y molido. En las imágenes se aprecia que el material originalmente, está conformado por algunas partículas esféricas y algunas otras de forma irregular.

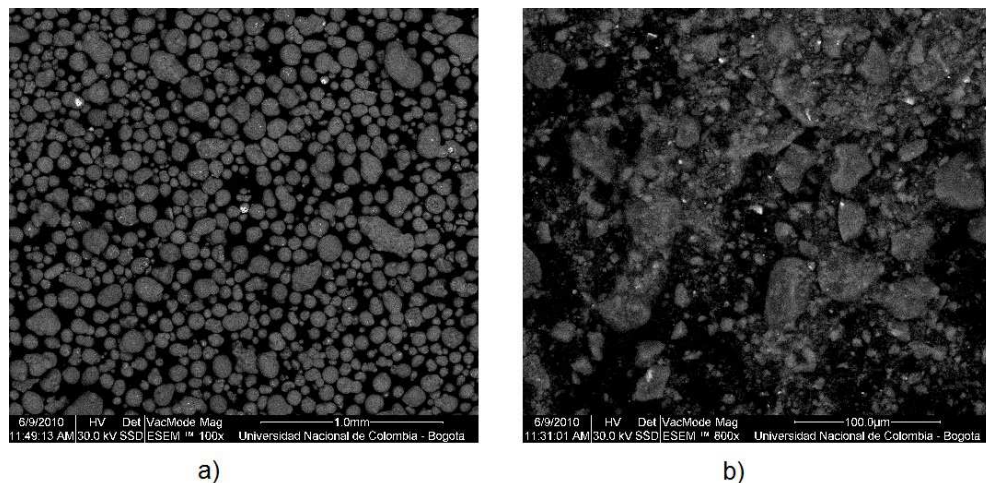


Figura 1: Imágenes por MEB del FCC. a) original b) molido por 5 horas

La figura 2 muestra un espectro Infrarrojo del FCC, el cual fue realizado en un espectrómetro Spectrum 100 de Perkin Elmer en el rango de longitudes de onda de 650 a 4000cm^{-1} . En el espectro se observa una banda intensa ubicada a 1070cm^{-1} , la cual puede ser atribuida a las vibraciones de estiramiento asimétrico del enlace Si-O-Si y/o Al-O-Si, mientras que la banda observada alrededor de 798cm^{-1} se atribuye a las vibraciones de estiramiento simétrico del enlace Si-O-Si ó Si-O-Al. La banda débil entre $3000-3600\text{cm}^{-1}$ y centrada alrededor de 3416 , y la ubicada en 1630cm^{-1} pueden ser atribuidas a la presencia de agua en la muestra, correspondientes a vibraciones de valencia -OH (asimétrica y simétrica) y de deformación H-O-H.

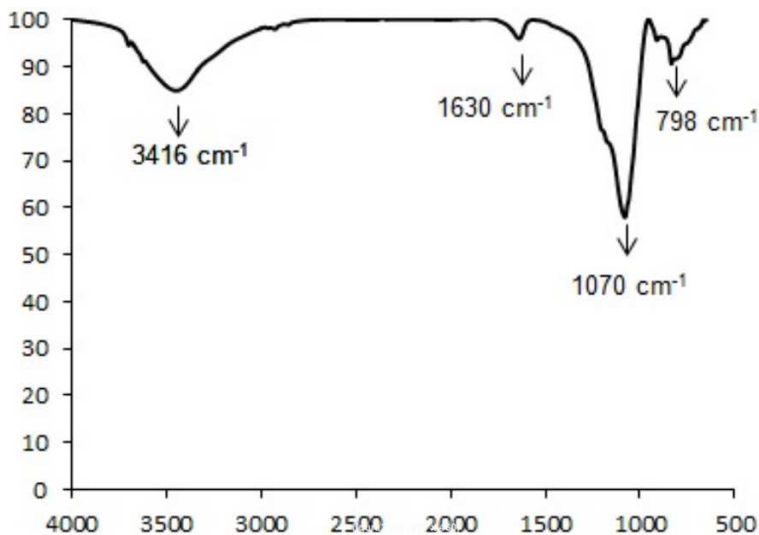


Figura 2: Espectro Infrarrojo del FCC

2.2 Preparación de muestras y ensayos realizados

Para evaluar tanto la actividad puzolánica del FCC, así como la efectividad de la técnica de estabilización/solidificación del FCC utilizando cemento, se elaboraron morteros en una relación de 1 : 2,75 (cemento:arena), utilizando arena de Ottawa. Los morteros se prepararon en proporciones del 0 y 20 % de FCC con respecto a la cantidad de cemento, y una relación agua/cementante de 0,52. El curado se llevó a cabo sumergiendo las muestras en agua saturada con $\text{Ca}(\text{OH})_2$, a temperatura ambiente, hasta una edad de 28 días, fecha en la cual se procedió a realizar los ensayos.

La actividad puzolánica del residuo FCC, se evaluó a partir de la resistencia a la compresión aplicando la norma ASTM C311 y C618. La efectividad de la técnica de E/S del FCC se evaluó mediante el ensayo de TCLP, con el fin de determinar la lixiviación de elementos peligrosos.

El procedimiento de TCLP (del inglés Toxicity Characteristic Leaching Proceeding) [15], consiste en determinar la movilidad de determinados constituyentes tóxicos desde un residuo hacia el medio exterior, sean éstos elementos o compuestos químicos, tanto de origen orgánico como inorgánico. Esta movi-

lidad se determina a partir del contacto de la muestra con fluidos de extracción indicados en la norma.

Para el ensayo TCLP, una vez cumplido el tiempo de curado de los morteros, se redujo el tamaño de partícula de éstos hasta aproximadamente 1,0 cm de diámetro. Seguidamente se realizó el procedimiento descrito en la norma, para la determinación del fluido extractor. En este caso, se seleccionó el fluido No. 1, el cual es una solución compuesta de 5,7 ml de ácido acético glacial y 64,3 ml de hidróxido de sodio, diluida a un volumen de 1 L con agua destilada. Según la norma EPA (1991)[15], la cantidad de fluido de extracción debe ser 20 veces el peso de la muestra; por lo cual, se tomaron las cantidades necesarios, y se agitaron por un tiempo aproximado de 18 ± 2 horas a una temperatura de $22 \pm 3^\circ C$. Al finalizar este procedimiento, se realizó una filtración por medio de un filtro de vidrio de un tamaño efectivo de poro de $0,7(\mu m)$; posteriormente se acidificaron cada uno de los extractos, con ácido nítrico hasta un pH de 2,0. Este líquido extraído, es el extracto de TCLP, al cual se le hicieron los análisis correspondientes. La determinación de metales pesados, se realizó por medio de un Espectrofotómetro de Absorción Atómica marca Perkin Elmer, referencia AAnalyst 400. Para el caso de la determinación del Lantano, se aplicó la técnica de Fluorescencia de Rayos X, en un equipo MagixPro PW - 2440 Philips.

3 Resultados y discusión

3.1 Ensayo de lixiviación

En la tabla 2 se presenta el listado de los elementos más importantes para el estudio, que fueron identificados en la muestra original de FCC. Para el caso del cemento, también fueron analizados los mismos elementos, con el fin de verificar si éste incluye concentraciones adicionales, que puedan intervenir en el ensayo de toxicidad para el FCC, estos análisis se realizaron por duplicado. En la tabla 2 también se encuentran los límites permisibles de estos elementos para el caso de agua para uso doméstico y agrícola basado en la normatividad de Colombia, Estados Unidos y la Organización Mundial de la Salud (OMS). Estos valores son tomados a partir de la normativa del Ministerio de Protección Social y de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (Decretos 2811 de 1974 y 1594 de 1984, resolución número 2115

de 2007), la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) y la OMS, respectivamente (IDEAM, 1984; EPA, 2000; OMS, 1993) [16][17][18].

Tabla 2: Elementos presentes en el FCC y OPC. Límites permisibles, agua para consumo humano y doméstico, y destinación agrícola

Elemento (mg/Kg)	FCC	OPC	Límites permisibles (mg/L)		
			Uso Humano y doméstico		Uso agrícola*
			Colombia-EPA	OMS	
Zn	81	0,60	–	3,00	2,00
Cr	19	48	0,10 - 0,05*	0,05	0,10
Pb	25	–	0,015	0,01	0,10
As	12	–	0,01	0,01	0,10
La	41100	–	**	**	**

*Normatividad, Colombia (IDEAM, 1984).

** No hay información disponible para este elemento.

En la tabla 2 se observa que el FCC contiene cantidades apreciables de Zn, Cr, Pb, As y La, las cuales sobrepasan los límites permisibles citados. La comparación de los límites permisibles se hicieron en los casos de agua para destinación humana y doméstica, y agua para destinación agrícola; siendo la primera más exigente que la segunda (IDEAM, 1984). En ambos casos, la concentración de los metales presentes en el FCC, están por encima de los valores permitidos. Antes de realizar el ensayo de TCLP en morteros, éste fue realizado para el FCC solo y para el cemento. En la tabla 3 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 3: Lixiviación de los metales en el FCC y cemento.

Metales (mg/L)	TCLP-FCC	TCLP-Cemento
Zn	0,55	0,15
Cr	0,09	0,21
Pb	< 0,025	–
As	< 0,04	–
La	1020	–

Con los resultados reportados en la tabla 3, se observa que todos los meta-

les, a excepción del Lantano, se encuentran estabilizados dentro de la matriz tipo zeolita SiO_2/Al_2O_3 del residuo FCC. Las zeolitas, tienen una red estructural tridimensional, que contiene túneles y cavidades; debido a esto, tienen la capacidad de absorber diversos elementos y es por ello que son utilizadas como catalizadores [19].

Seguidamente, se realizó el ensayo de TCLP, a los morteros adicionados con el 20 % de FCC y al mortero patrón (0 % de FCC), siguiendo el procedimiento de la normativa, descrito anteriormente. En la tabla 4 se presentan los resultados.

Tabla 4: Resultados del ensayo de TCLP en morteros.

Metales (mg/L)	TCLP-Mortero FCC	TCLP-Mortero patrón
Zn	0,41	0,22
Cr	0,11	0,09
Pb	*	–
As	*	–
La	*	–

*Por debajo del límite de detección.

Haciendo una comparación entre las tablas 3 y 4, se observa que, en general, la concentración de los metales presentes en el mortero de FCC fueron más bajas, lo que quiere decir que la técnica de E/S para el FCC, fue efectiva. Estos resultados coinciden con diversos autores [8][20][21], quienes han aplicado diversas técnicas de lixiviación y han concluido que los materiales cementicios fabricados con adición de este subproducto no son peligrosos, ya que cumplen con los requisitos medioambientales exigidos y, por lo tanto pueden ser incorporados en materiales de construcción. Lo anterior se debe a que el gel de Silicato Cálcico Hidratado (C-S-H), proveniente de la hidratación del cemento, inmoviliza los iones metálicos, tal como lo afirman diversos autores [5][22].

En la tabla 5, se presentan los valores límites permitidos por la EPA (del inglés Environmental Protection Agency, United States), de metales en los lixiviados extraídos del ensayo de TCLP. Como se observa, la adición del 20 % en FCC, cumple a cabalidad con los requisitos exigidos.

Los resultados reportados serán de gran valor, para la seguridad ambiental que supone el uso de este residuo, pues se debe tener en cuenta que el FCC,

Tabla 5: Máximas concentraciones permitidas en los lixiviados de TCLP. (U.S. EPA)

Metales	Concentración permisible(mg/L)
Cr	5,0
Pb	5,0
As	5,0
Ba	100,0
Cd	1,0
Hg	0,2
Se	1,0
Ag	5,0
La	*

*No hay información disponible para este elemento.

es un material que procede de una industria altamente contaminante, como es la industria del Petróleo. Trabajos posteriores se encaminarán en utilizar diferentes porcentajes de adición del FCC al cemento, con el fin de determinar hasta qué porcentaje permite ser éste utilizado sin que cause problemas en el medio ambiente, aunado a la respuesta a nivel de resistencias mecánicas y de durabilidad en morteros y concretos. Vale la pena destacar que el FCC por sí solo, evita en gran medida la lixiviación de los metales, lo que puede permitir su utilización para la elaboración de materiales de construcción.

3.2 Actividad puzolánica del FCC

La evaluación del índice de actividad puzolánica con cemento se llevó a cabo aplicando la Norma ASTM C311. Se elaboraron cubos de 5cm de lado, con Cemento Portland ordinario (OPC) y arena de Ottawa en proporción de 1: 2,75. En la figura 3 se presentan los resultados obtenidos del cálculo del índice de actividad puzolánica a 28 días de curado, y se comparan con los resultados encontrados por otros autores. En la norma ASTM C618, se indica como valor mínimo un índice resistente igual o superior al 75% a 28 días para considerar un material como puzolana. Para este caso se encontró un índice del 105 %, lo cual indica que este residuo se puede considerar como un material idóneo para adicionar al cemento. Igualmente, en la figura 3 se reportan las actividades puzolánicas obtenidas por otros autores [13][23], de tal manera

que son comparables con los obtenidos con el residuo nacional.

Se ha reportado que este buen desempeño del FCC, se debe a la reacción entre el hidróxido de calcio proveniente de la hidratación del cemento y el residuo, lo cual genera como principales productos de hidratación el silicato cálcico hidratado (CSH), aluminatos cálcicos hidratados (CAH) y silicoaluminatos cálcicos hidratados (CASH) de diferentes composiciones [24][25][26][27]. Por lo anterior, la adición del residuo de catalizador FCC al cemento, contribuye significativamente a las propiedades mecánicas y de durabilidad de los morteros y concretos que lo contienen [12][13][14][23][24][25][26].

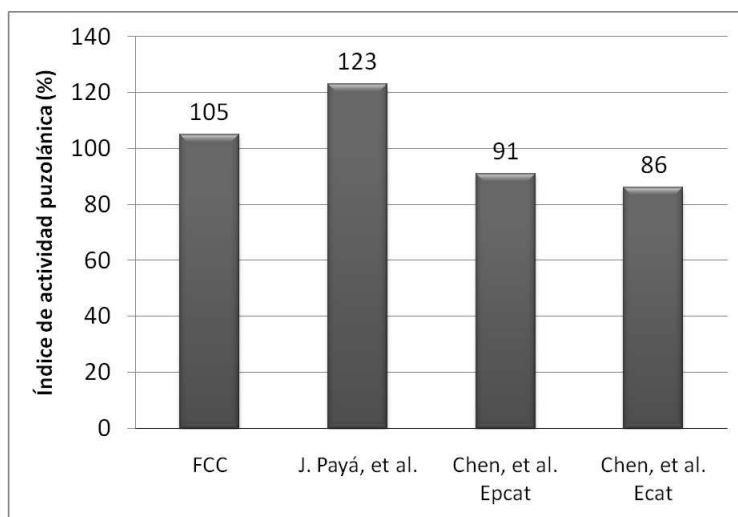


Figura 3: Índice de actividad puzolánica para el FCC a 28 días de curado; comparación con otros autores.

4 Conclusiones

Con los resultados del estudio se concluye lo siguiente:

A partir de los resultados de TCLP, aplicado al residuo solo, se encuentra que éste por sí mismo tiene la capacidad de retener metales pesados, ventaja que puede ser aprovechada en el momento del uso y manipulación.

Los valores iniciales de concentración de metales en el FCC, lo definen

como un residuo peligroso, sin embargo una vez encapsulado dentro de la matriz cementicia, se presenta una mínima lixiviación de estos elementos. Esto es de gran importancia, ya que indica que este material puede ser utilizado como adición al cemento para la elaboración de materiales de construcción.

La actividad puzolánica reportada para el residuo, clasifica el material como una puzolana, lo que indica que puede ser utilizado como adición en materiales cementicios. Se destaca también la importancia de la reutilización de un residuo industrial que además de lograr disminuir la cantidad de cemento a utilizar, mejora sustancialmente las resistencias mecánicas de los morteros que lo contienen.

Agradecimientos

Los autores, miembros de los grupos de Materiales Compuestos y Materiales y Medio Ambiente, agradecen a la Universidad del Valle, la Universidad Nacional de Colombia y a Colciencias (proyecto código 1101-452-21170) por el apoyo en la realización del estudio.

Referencias

- [1] MD. LaGrega, PL. Buckingham, JC. Evans. *Hazardous wastes management*, ISBN 9780070195523. McGraw-Hill, New Jersey, 1994.
Referenciado en 143
- [2] M. Frías, M. Sánchez de Rojas, O. Rodríguez. *Novedades en el reciclado de materiales en el sector de la construcción: Adiciones puzolánicas*, II Jornadas de investigación en Construcción , ISBN 978-84-7292-367-6. Madrid,2008.
Referenciado en 143
- [3] TE. Mayers, ME. Eappi. *Laboratory evaluation of stabilization/solidification technology for reducing the mobility of heavy metals in New Bedford Harbor superfund site sediment Stabilization of hazardous Radioactive and mixed wastes*. ISBN 978-0-8031-5186-4. ASTM publication, Philadelphia, 1992.
Referenciado en 143
- [4] C. Shi, RL. Day, X. Wu, M. Tang. *Uptake of metal ions by autoclaved cement pastes..* Proceedings of Materials Research Society, ISSN 1946-4274, **245**, 1141-149 (1992). Referenciado en 143

- [5] M. Bhatti. *Fixation of metallic ions in Portland Cement. 4th national conference on hazardous wastes and hazardous materials* , ISBN 0944989454. Washington, 140 - 145 (1987). Referenciado en 143, 150
- [6] SY. Hong, FP. Glasser. *Alkali sorption by C-S-H and C-A-S-H gels -part II, role of alumina*. Cement and Concrete Research, ISSN 0008-8846, **32**(7), 1101-1111 (2002). Referenciado en 143
- [7] A. Hidalgo, C. Alonso. *Evaluación del impacto medioambiental debido a la lixiviación de productos de base cemento*. las jornadas de investigación en construcción, ISBN 84-931709-4-1, Madrid, 571-581(2005). Referenciado en 144
- [8] E. Furimsky. *Review of spent refinery catalyst: environment, safety and utilization*. Catalysis today, ISSN 0920-5861, **30**, 223-86 (1996). Referenciado en 144, 150
- [9] SK. Antiohos, E. Chouliar, S. Tsimas. *Re-use of spent catalyst from oil-cracking refineries as supplementary cementing material*. Journal China Particuology, ISSN 1674-2001, **4**(2), 73-76 (2006). Referenciado en 144
- [10] J. Payá, J. Monzó, M. Borrachero, S. Velázquez. *Evaluation of the pozzolanic activity of fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R), Thermogravimetric analysis studies on FC3R-Portland cement pastes*. Cement and Concrete Research, ISSN 0008-8846, **33**, 603-609 (2003). Referenciado en 144
- [11] B. Pacewska, M. Burowska, I. Ska, M. Swat. *Modification of properties of concrete by a new pozzolan a waste catalyst from the catalytic process in a fluidized bed*. Cement and Concrete Research, ISSN 0008-8846, **32**, 145-152 (2002). Referenciado en 144
- [12] J. Payá, J. Monzó, M. Borrachero. *Fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R) an excellent mineral by-product for improving early strength development of cement mixtures*. . Cement and Concrete Research, ISSN 0008-8846, **29**, 1773-1779 (1999). Referenciado en 144, 152
- [13] J. Payá, J. Monzó, M. Borrachero. *Physical, chemical and mechanical properties of fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R) blended cements*. Cement and Concrete Research, ISSN 0008-8846, **31**, 57-61 (2001). Referenciado en 144, 151, 152
- [14] J. Torres, E. Baquero, A. Silva. *Evaluación de la actividad puzolánica de un residuo de un residuo de la industria del petróleo*. Revista Dyna, ISSN 0012-7353, **76**(158), 49-53 (2009). Referenciado en 144, 152

- [15] EPA Test Method 1311 - TCLP. *Toxicity Characteristic Leaching Procedure. Code of Federal Regulations, 40 CFR part 261, appendix II*. Julio 1991. Referenciado en 147, 148
- [16] Instituto de Hidrología, Meteorología y estudios ambientales, IDEAM *Decreto 1594 DE 1984, Usos del agua y residuos líquidos*. Bogotá D. C., Junio 26 de 1984. Referenciado en 149
- [17] Agencia de Protección ambiental de los Estados Unidos, EPA. *Estándares del Reglamento Nacional Primario de Agua Potable. EPA 815-F-00-007, Abril de 2000*. http://water.epa.gov/drink/guide/upload/book_waterontap_full.pdf, Marzo de 2011. Referenciado en 149
- [18] Organización Mundial de la Salud, OMS. *Directrices de la OMS para la calidad del agua potable. 1993*. <http://www.aguaessalud.com/directricesOMSaguapotable.html>, Enero de 2011. Referenciado en 149
- [19] EM. Flanigen, LB. Sand. *Molecular sieve zeolites-I, Advances in Chemistry Series*, American Chemical Society ISBN 0065-2393. Washington, 1971. Referenciado en 150
- [20] U. Rattanasak, Ch. jaturapitakkul, T. Sudaprasert. *Compressive strength and heavy metal leaching behaviour of mortars containing spent catalyst*. Waste Management & Research, ISSN 1096-3669, **19**,456-464 (2001). Referenciado en 150
- [21] D. Sun, X. Li, M. Brungs, D. Trimm. *Encapsulation of heavy metals on spent fluid catalytic cracking catalyst..* Water Science Technology, ISSN 0273-1223, **38**(4-5), 211-217 (2001). Referenciado en 150
- [22] FP. Glasser. *Fundamental aspect of cement solidification and stabilization*. Journal of Hazardous Materials, ISSN 0304-3894, **52**, 151-170 (1997). Referenciado en 150
- [23] H-L. Chena, Y-S. Tsengb, K-Ch. Hsu. *Spent FCC catalyst as a pozzolanic material for high-performance mortars*. Cement and Concrete Research, ISSN 0008-8846, **26**, 657-664 (2004). Referenciado en 151, 152
- [24] J. Payá, J. Monzó, M. Borrachero, S. Velázquez, M. Bonilla. *Determination of the pozzolanic activity of fluid catalytic cracking residue. Thermogravimetric analysis studies on FC3R- lime pastes*. Cement and Concrete Research, ISSN 0008-8846, **33**, 1085-1091 (2003). Referenciado en 152
- [25] J. Payá, J. Monzó, M. Borrachero, S. Velázquez. *Chemical activation of pozzolanic reaction of fluid catalytic cracking residue (FC3R) in lime pastes: thermal*

- analysis*. Advances in Cement Research, ISSN 0951-7197, **16**(3), 123-130 (2004). Referenciado en 152
- [26] J. Payá, J. Monzó, M. Borrachero, S. Velázquez. *The chemical activation of pozzolanic reaction of fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R) in lime pastes*. Advances in Cement Research, ISSN 0951-7197, **19**(1), 9-16 (2007). Referenciado en 152
- [27] J. Trochez, J. Torres, R. Mejía de Gutiérrez. *Estudio de la hidratación de pastas de cemento adicionadas con catalizador de craqueo catalítico usado (FCC) de una refinería colombiana*. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, ISSN 0120-6230, **55**, 26 -34 (2010). Referenciado en 152