



Revista Ingenierías Universidad de Medellín

ISSN: 1692-3324

revistaingenierias@udem.edu.co

Universidad de Medellín

Colombia

Hernández, Darwin; Villegas, Juan David; Castaño, Juan Mauricio; Paredes, Diego
Aprovechamiento de lodos aluminosos generados en sistemas de potabilización, mediante su
incorporación como agregado en materiales de construcción
Revista Ingenierías Universidad de Medellín, vol. 5, núm. 8, enero- junio, 2006, pp. 119-132
Universidad de Medellín
Medellín, Colombia

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=75050810>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica
Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

APROVECHAMIENTO DE LODOS ALUMINOSOS GENERADOS EN SISTEMAS DE POTABILIZACIÓN, MEDIANTE SU INCORPORACIÓN COMO AGREGADO EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Darwin Hernández*, Juan David Villegas**, Juan Mauricio Castaño*** y Diego Paredes****

RECIBIDO: 26/01/2006
ACEPTADO: 17/05/2006

RESUMEN

Uno de los problemas más relevantes en los sistemas de potabilización de agua basados en procesos de coagulación es la generación de lodos. Dadas sus características químicas, éstos son de difícil manejo y no existen en Colombia tecnologías que permitan su tratamiento y disposición final sin impactar al medio ambiente. Actualmente su disposición final se hace en rellenos sanitarios o predominantemente sobre cuerpos hídricos. Con este estudio se evaluó el uso del lodo aluminoso como agregado en la fabricación de ladrillos cerámicos, aprovechando el lodo e inmovilizando a su vez elementos tóxicos. Inicialmente se efectuaron análisis mineralógicos del lodo y de los materiales a ser reemplazados por éste; posteriormente se midió la resistencia a la compresión (Kg/cm^2) y la absorción de humedad (%) en unidades experimentales fabricadas con diferentes porcentajes de lodo. Según los resultados obtenidos, no es posible

utilizar el lodo aluminoso como agregado en ladrillos cerámicos.

Palabras clave

Potabilización, lodos aluminosos, materiales de construcción, resistencia a la compresión, absorción de humedad

ABSTRACT

One of the main problems regarding coagulation-based water potabilization systems is sludge generation. Management of these sludges is complicated, given its chemical properties. At the moment, in Colombia there are not implemented technologies for management and disposal of this kind of waste in order to avoid impacts on the environment. Generally, sludges are disposed on sanitary landfills or mostly dumped to water bodies. The purpose of the present research is

* Adm. del Medio Ambiente Esp. candidato a Msc. Docente – Investigador Grupo de Investigación en Agua y Saneamiento Básico. Coordinador del Grupo de Estudios sobre Manejo Integral de Residuos Sólidos. Facultad de Ciencias Ambientales – Universidad Tecnológica de Pereira. darwin@ambiental.utp.edu.co

** Ing. Químico. Investigador Grupo de Investigación en Agua y Saneamiento Básico. Facultad de Ciencias Ambientales – Universidad Tecnológica de Pereira. juandvillegas76@hotmail.com

*** Ingeniero químico, MSc. Director del Instituto de Investigaciones Ambientales de la Facultad de Ciencias Ambientales – Universidad Tecnológica de Pereira. jmc@utp.edu.co

**** Ingeniero sanitario, MSc. Candidato a Dr.-Ing. Docente – Investigador del Grupo de Investigación en Agua y Saneamiento Facultad de Ciencias Ambientales – Universidad Tecnológica de Pereira. diparede@yahoo.com

to assess a technological alternative for the management of water potabilization sludges, specifically alum sludges. This paper presents the evaluation of the incorporation of alum sludges as aggregates in ceramic bricks fabrication, as a reuse alternative that provides immobilization for sludge toxic compounds. Initially, the specific material to be replaced as aggregate in ceramic bridges fabrication was determined upon mineralogical analysis of the sludge. Subsequently, compression resistance test was carried out in experimental units fabricated using different proportions of alum sludge. Humidity absorption (%) was also measured for each unit. The results lead to the conclusion that using alum sludge as aggregates in ceramic bridges fabrication is not feasible.

Key words

Potabilization, alum sludges, construction aggregates, compression resistance, humidity absorption.

Introducción

Los sistemas convencionales y las plantas compactas para la potabilización de agua se basan en la adición de un coagulante para la desestabilización y posterior sedimentación de las partículas presentes en el agua a potabilizar. Aunque existen diferentes tipos de coagulantes (básicamente metálicos y polielectrolitos o ayudantes de coagulación), en Colombia se emplean principalmente sales de aluminio, como el sulfato de aluminio, aluminio amoniacal y el cloruro de polialuminio, siendo el primero el de mayor uso (Ministerio de Desarrollo Económico y Social, 1996). Por indagación directa de los autores a algunas empresas de servicios públicos, en la actualidad, la disposición de los lodos generados como consecuencia del mantenimiento de las unidades se realiza básicamente en relleños sanitarios o sobre cuerpos de agua, duran-

te las actividades de purga, vaciado y lavado, causando un alto impacto en el ambiente dada su naturaleza química.

El uso de coagulantes y en general el tratamiento de agua implica la producción de lodos como subproducto. Se estima un volumen de lodos entre el 0.3 y el 1% del agua tratada (Sandoval et al, 1998). El manejo, tratamiento y disposición de dichos lodos es un problema importante, que en Colombia y Latinoamérica no ha sido resuelto, contando con pocas experiencias sobre alternativas económicamente viables para países en vías de desarrollo como el nuestro (Berón, 1997).

El presente proyecto tiene como objetivo evaluar el posible aprovechamiento de los lodos aluminosos, generados en la planta de potabilización de la Empresa Aguas y Aguas de Pereira S. A. – ESP, mediante su incorporación en la fabricación de ladrillos cerámicos, estudiando las posibles combinaciones o dosis de lodos y su impacto en variables como la resistencia a la compresión y la absorción de humedad.

Materiales y métodos

Inicialmente se determinó la composición mineralógica, el tamaño de partícula y los límites de Atterberg. Posteriormente se evaluaron variables como resistencia a la compresión y absorción de humedad a unidades experimentales incorporando lodo aluminoso en diferentes proporciones.

Potencial de los lodos aluminosos como agregado en la fabricación de ladrillos cerámicos

El principal criterio para determinar el potencial de utilización de los lodos aluminosos en la fabricación de ladrillos cerámicos fue el análisis

mineralógico, el cual se realizó mediante la técnica de "Difracción de Rayos X". Se analizaron los difractogramas de los lodos, según procedencia y épocas del año, al igual que cada uno de los elementos constitutivos de los ladrillos cerámicos. Lo anterior con el fin de establecer la posible incidencia de la época del año en la composición de los lodos, e identificar el material del ladrillo a reemplazar.

Teniendo en cuenta que el tamaño de partícula puede incidir en la dinámica de secado y horneado de los ladrillos, se realizó el análisis granulométrico por hidrometría, a una muestra de lodo seco que pasa tamiz # 200 (0,074µm) (Mejía et al, 1998).

Posteriormente se determinaron los límites de Atterberg. Éstos límites están directamente relacionados con la cantidad de agua que contiene un material y es capaz de absorber (Mejía et al, 1998), por lo tanto, permitió establecer el posible comportamiento de las unidades experimentales en cuanto a absorción de humedad. Estos resultados permiten clasificar los lodos, de acuerdo con su plasticidad y cohesión.

Prueba preliminar de resistencia a la compresión y absorción de humedad

Con los resultados obtenidos en los análisis iniciales, y con el fin de establecer las posibles mezclas para el diseño del experimento, se realizó una prueba preliminar, la cual tuvo en cuenta los resultados del análisis mineralógico, tamaño de partícula y límites de Atterberg. Esta prueba consistió en la fabricación de nueve probetas con diferentes mezclas, con las siguientes condiciones:

Materiales a reemplazar: arcilla negra y arena.

Porcentajes de cada material: el ladrillo se compone de 50% de arcilla roja, 25% de arcilla ne-

gra y 25% de arena. Se reemplazó arcilla negra y arena por lodo aluminoso, incrementando la cantidad según lo indicado en la Tabla 1.

Tabla 1. Porcentajes de cada material empleados en la prueba preliminar

Probeta	Arcilla Roja (%)	Arcilla Negra (%)	Arena (%)	Lodo (%)
1	50	25	25	0
2	50	25	18,75	6,25
3	50	25	12,50	12,50
4	50	25	6,25	18,75
5	50	25	0	25
6	50	18,75	25	6,25
7	50	12,50	25	12,50
8	50	6,25	25	18,75
9	50	0	25	25

Condiciones de fabricación de probetas: se fabricaron probetas de 4 x 4 x 8 cm., garantizando una humedad del 20% de la masa final a moldear. Para lo anterior se tuvo en cuenta la humedad del lodo, agregando únicamente la fracción de agua faltante para alcanzar la humedad deseada. Las probetas fueron moldeadas y secadas a temperatura ambiente durante 6 días y posteriormente fueron sometidas a quemado.

Quemado: las probetas fueron horneadas en laboratorio en una mufla. El incremento de la temperatura se dio a una tasa de 100°C cada hora hasta alcanzar 700°C, para ascender directamente a 900°C; en esta temperatura se dejaron durante un tiempo de 6 horas y posteriormente se inició el enfriamiento. Las curvas de calentamiento y enfriamiento poseen la misma pendiente con signo contrario. Las variables medidas fueron absorción de agua y resistencia a la compresión.

Diseño experimental

Para efectos del presente estudio, y teniendo en cuenta los resultados preliminares, se eligió un diseño con bloques completamente al azar (DBCA), tal y como se presenta en la Tabla 2. Las unidades experimentales fueron probetas de mampostería maciza de 8cm x 4cm x 4cm (Figura 1), a las que se les realizaron pruebas de resistencia a la compresión (Kgf/cm^2) y porcentaje de absorción de agua según Norma Técnica Colombiana NTC 4017.

Tabla 2. Diseño experimental asociado al uso de lodos aluminosos como agregado en la fabricación de ladrillos cerámicos

Factor		0% 10% 20% 30% 40% 50% 60% 70% 80% 90% 100%
	Porcentaje de arena remplazada por lodo aluminoso	
Bloque		Lote 1 Lote 2
Variable de salida		Resistencia a la compresión (Kgf/cm^2)

Figura 1. Unidades experimentales y Lodos aluminosos sedimentados y deshidratados, utilizados en la prueba.



El procedimiento para su fabricación fue el mismo que se llevó a cabo en las unidades de la prueba preliminar. El análisis de varianza (ANOVA) para este diseño se realizó mediante SPSS 12. Para cada tratamiento se llevaron a cabo 10 repeticiones divididas en dos lotes de a 5 cada una. El primer lote de probetas se fabricó el 22 de marzo de 2005, con lodos recolectados el 16 de febrero de 2005, y el segundo el 16 de abril, con lodos recolectados el 29 de octubre de 2004 (Figura 1). Dado que los tamaños muestrales no difieren entre sí, se eligió el método de Tukey de comparaciones múltiples, por ser el que mejor detecta diferencias significativas, para estos casos (Ferrán, 2003).

Resultados y discusión

Resultados Preliminares

Curvas medias. Los resultados de las curvas medias que se aprecian en las figuras 2 y 3 permiten identificar dos períodos de mayor turbiedad, asociados a períodos de invierno, y dos períodos de menor turbiedad, asociados a períodos de verano.

La variación en la turbiedad del agua que ingresa al sistema incide en la operación del mismo, ya que según información suministrada por personal de la planta, los niveles de turbiedad determinan la dosificación de sulfato de aluminio, el cual no se aplica ante niveles muy bajos de turbiedad, por lo que se espera una variación en la presencia de alumina de los lodos generados. Con el fin de corroborar lo anterior, se determinó la dosificación (horas/mes) de sulfato de aluminio durante el año 2004, comparando estos valores con la turbiedad media del sistema (Figuras 2 y 3), y se obtuvo una relación directamente

proporcional entre turbiedad y aplicación de sulfato de aluminio.

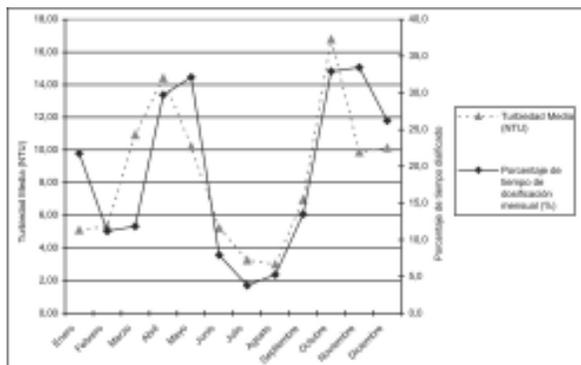


Figura 2. Relación entre turbiedad media y tiempo de dosificación de sulfato de aluminio en la planta de potabilización de agua de Pereira

Lo anterior se tomó como principal criterio para incluir los períodos del año como una variable externa en la definición de bloques en el experimento, y determinar su posible incidencia en la fabricación de ladrillos cerámicos.

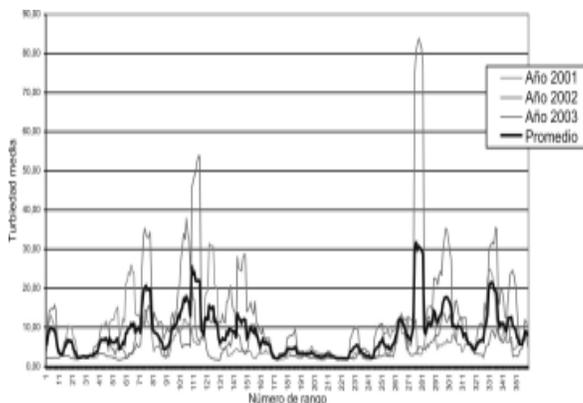


Figura 3. Curvas medias de turbiedad del agua que ingresa al sistema

Composición mineralógica

Comparación de la composición mineralógica de lodo y los materiales constitutivos del ladrillo

Los resultados de los difractogramas (figura 4), indican que el lodo aluminoso presenta una alta presencia de cuarzo, con respecto a los demás elementos, al igual que ausencia de silicatos. Aunque la caolinita no es el elemento más representativo en el lodo aluminoso, su presencia en cantidad importante sugiere posibilidades de aplicación en ladrillos cerámicos, ya que favorece la sinterización, al ser activado térmicamente el lodo.

Desde el punto de vista mineralógico, estos lodos pueden ser utilizados como desgrasante, es decir, como un material magro, poco plástico, no cohesivo. Estas características permiten concluir que el lodo aluminoso se comporta como la arena utilizada en la fabricación de ladrillos cerámicos, ya que a diferencia de las arcillas, este material presenta las características mencionadas, convirtiéndose en el material a reemplazar, según este criterio.

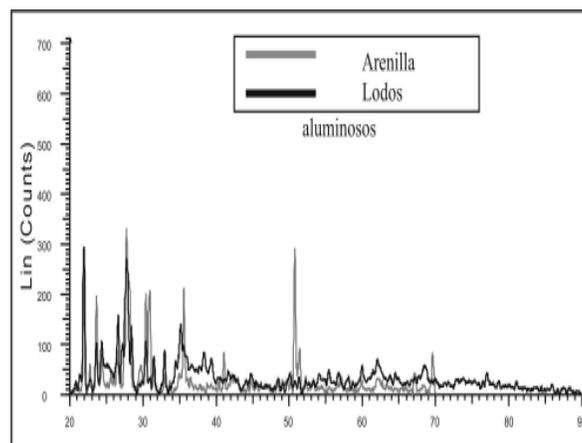


Figura 4. Comparación mineralógica del lodo aluminoso con arena

Comparación de la composición mineralógica de lodos según épocas del año

Aunque no se observan diferencias significativas en los difractogramas de la figura 4, el clima

es un factor externo no controlable que fue incluido en el diseño del experimento mediante la conformación de bloques.

Determinación de la composición mineralógica de los lodos según procedencia

No se encontraron diferencias en la composición mineralógica de los lodos generados durante las actividades de purga, lavado y vaciado. Lo anterior se puede deber a que la composición mineralógica está afectada principalmente por factores como la concentración de los sólidos que ingresan al sistema y la dosificación de sulfato de aluminio. Según este resultado, no se tuvo en cuenta la procedencia de los lodos en el diseño del experimento.

Tamaño de partícula

El tamaño de partícula se determinó mediante análisis granulométrico, y los resultados se ilustran en la tabla 3.

Tabla 3. Análisis granulométrico de lodos aluminosos generados durante actividades de lavado en la planta de tratamiento de agua de Pereira

Ensayo	Resultado promedio
Gravedad específica	2,56 g/cm ³
Análisis granulométrico	
Diámetro de partícula (mm)	Material más fino (%)
0,07400	100,0
0,04546	54,5
0,03239	52,4
0,02664	50,4
0,02323	48,3
0,01711	36,1
0,01234	30,0
0,00883	25,9
0,00657	19,8
0,00457	15,1
0,00378	11,0
0,00336	9,6
0,00241	6,1
% de Limos	55,5
% de Arcillas	44,5

La curva granulométrica obtenida (figura 5) indica el comportamiento de la muestra total de lodo, incluyendo la fracción que queda en la malla # 200.

Los resultados del análisis granulométrico indican que las partículas sólidas que conforman los lodos aluminosos son finas, de tamaño reducido, donde el 50% de las partículas tienen un tamaño inferior a 0,025 mm, aunque existe predominancia de limos sobre arcillas. El tamaño reducido de partículas puede incidir en la etapa de secado, ya que un incremento en el porcentaje de partículas finas puede favorecer la retracción y el agrietamiento de las unidades experimentales.

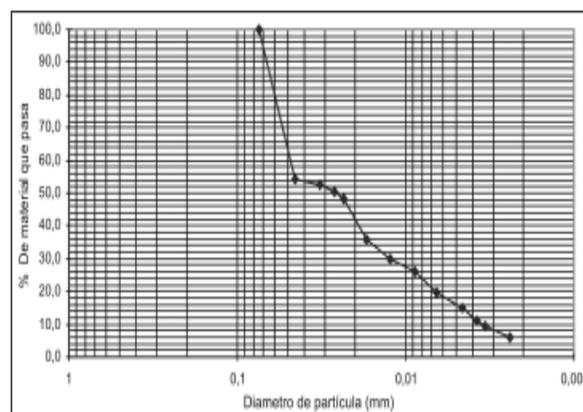


Figura 5. Análisis granulométrico lodos aluminosos generados durante el lavado, en la planta de potabilización de agua de Pereira

Límites de Atterberg

Los resultados observados en la tabla 4 permiten clasificar los lodos aluminosos como un material poco plástico (Índice de Plasticidad <7), es decir, que se trata de un material magro con poca cohesión, lo que confirma, al igual que en el análisis mineralógico, que el lodo aluminoso se comporta como la arena, y que es éste el material a reemplazar.

Tabla 4. Límites de Atterberg, lodos aluminosos planta de potabilización de Pereira

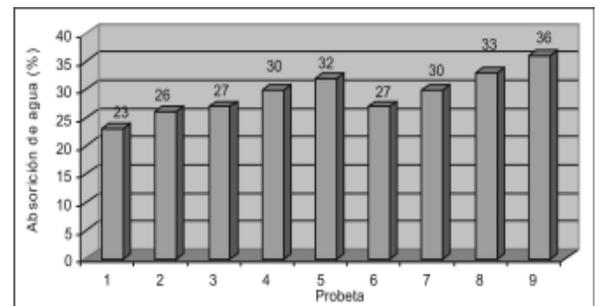
Variable	Valor
Límite líquido, %	78.2
Límite plástico, %	74.0
Índice de plasticidad % (Pi)	4.2

Prueba preliminar de resistencia a la compresión y absorción de humedad

Retracción. La retracción aumenta en la medida en que se incrementa la cantidad de lodo aluminoso adicionado a la mezcla. En el caso del material reemplazado, existe mayor retracción cuando se reemplaza arena que cuando se reemplaza arcilla negra. Lo anterior debido posiblemente a que el lodo está formado por limos y arcillas, partículas de menor tamaño que las de la arena, provocando una mayor expansión del material al ser hidratado. El incremento en la retracción causa agrietamiento en los ladrillos en las etapas de secado y cocción, debido posiblemente al incremento de caolinita, la cual tiene una alta retracción.

Absorción de humedad. Según se puede apreciar en los resultados de la figura 6, en la medida en que aumenta la cantidad de lodo adicionado crece la absorción de agua en las probetas, siendo mayor la absorción en las probetas donde fue reemplazada la arcilla negra. Lo anterior se debe posiblemente a que el lodo es un material magro, poco plástico, incrementando la porosidad en el producto después de la cocción, e igualmente puede estar relacionado con la presencia de caolinita en el lodo aluminoso. La absorción de agua es una característica que se puede relacionar directamente con la resisten-

cia de los ladrillos, de tal manera que a mayor absorción de agua (porosidad) se esperará una menor resistencia, tal como ocurrió en la prueba realizada. Este resultado permite inferir que a mayor cantidad de arcilla negra reemplazada con lodo aluminoso, menor será la resistencia a la compresión.

**Figura 6.** Absorción de agua de las probetas en las pruebas preliminares

Resistencia a la compresión. La resistencia a la compresión se tomó como el principal criterio para el diseño del experimento, ya que según la Norma Técnica colombiana Ingeniería Civil y Arquitectura - Unidades de mampostería de arcilla cocida - Ladrillos y bloques cerámicos - NTC 4205. 2003, la resistencia a la compresión se constituye en la variable más importante a ser tomada en cuenta en las pruebas realizadas a estas unidades de mampostería.

Los resultados (figura 7) permiten observar que la adición de lodo aluminoso a la mezcla sí compromete la resistencia de las probetas, ya que en la medida en que se incrementa el porcentaje de lodo adicionado disminuye la resistencia a la compresión. Las menores resistencias se alcanzaron al reemplazar la arcilla negra, seguramente por el aumento en la porosidad de las probetas, al tener en su estructura dos materiales magros, la arena y el lodo. En la probeta 3 se observa un

comportamiento que no corresponde con la tendencia; lo anterior se puede deber a que los materiales tienen propiedades que se caracterizan por ser variables aleatorias, o también pudo haberse presentado un error en la elaboración de las mezclas.

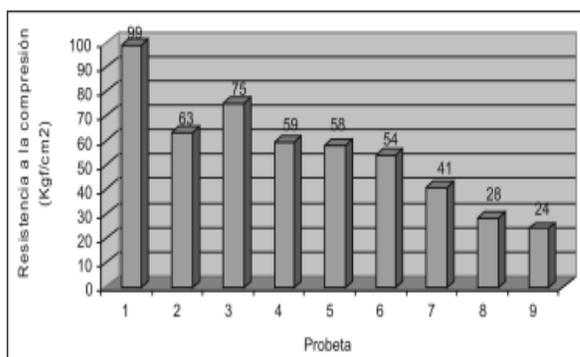


Figura 7. Resistencia a la compresión de las probetas en las pruebas preliminares

Los anteriores resultados permiten concluir que el material óptimo para reemplazar con lodo aluminoso es la arena. Lo anterior se sustenta en que los resultados obtenidos en las variables de respuesta, absorción de humedad y resistencia a la compresión, las probetas en cuya mezcla se reemplazó este material, presentaron un comportamiento más óptimo.

Resultados finales y discusión

Resistencia a la compresión

Los resultados reportados como “Lote 1” corresponden a unidades experimentales fabricadas con lodos recolectados en épocas de verano (Bloque 2), y los resultados de “Lote 2” corresponden a unidades experimentales fabricadas con lodos recolectados en épocas de invierno (Bloque 1).

Durante el proceso de cocción se presentó un fenómeno de vitrificación, el cual consistió en una mayor cocción de algunas unidades experimentales. Las unidades que presentaron este comportamiento se encontraban ubicadas cerca de las resistencias de la mufla, y presentaron una coloración más oscura y una mayor retracción (aplastamiento) en los extremos vitrificados. La vitrificación generó como consecuencia en las unidades experimentales, valores muy altos de resistencia a la compresión y muy bajos de absorción de humedad. Con el fin de evitar la alteración de los resultados, se desecharon aquellas unidades que presentaron este fenómeno de vitrificación, utilizando el criterio de imputación estadística (DANE 2002). La relación inversa entre la resistencia a la compresión y la absorción de humedad presentada en las unidades experimentales vitrificadas permiten confirmar dicha relación, en la cual la porosidad influye de manera directa en la resistencia a la compresión. La Tabla 5 resume los resultados obtenidos para cada tratamiento.

Tabla 5. Resistencia promedio a la compresión (Kgf/cm²), según porcentajes de arena reemplazada con lodo aluminoso

Porcentaje de arena a reemplazar por lodo	Media			Desviación estándar		
	resistencia media a la compresión (kgf/cm ²)			resistencia media a la compresión (kgf/cm ²)		
	Bloque			Bloque		
	Lote 1	Lote 2	Total	Lote 1	Lote 2	Total
0%	101,1	100,5	100,8	21,2	18,4	18,7
10%	61,3	104,3	82,8	23,9	27,2	33,1
20%	67,7	109,3	88,5	22,8	43,3	39,3
30%	81,5	81,4	81,4	17,9	14,6	15,4
40%	59,0	129,8	94,4	16,4	34,2	45,1
50%	38,0	80,9	59,4	2,1	19,1	26,0
60%	72,8	93,4	83,1	17,1	24,6	22,7
70%	58,9	87,7	73,3	12,3	6,4	17,8
80%	51,6	78,8	65,2	12,3	14,9	19,3
90%	56,9	65,2	61,0	6,9	8,2	8,4
100%	50,8	71,0	60,9	8,8	3,1	12,3
Total	63,6	91,1	77,4	21,9	27,3	28,2

La Figura 8 presenta los resultados organizados según rangos de reemplazo de arena, en las unidades experimentales de ambos lotes. En ella se puede apreciar inicialmente que la adición de lodo aluminoso sí compromete la resistencia media a la compresión, ya que la mayor resistencia se presenta en las unidades en las cuales no se adicionó lodo aluminoso, y la menor resistencia se encuentra en las unidades donde se reemplazó el 100% de arena por lodo aluminoso, observándose una tendencia a la disminución en la resistencia en la medida que se incrementa el porcentaje de lodo adicionado.

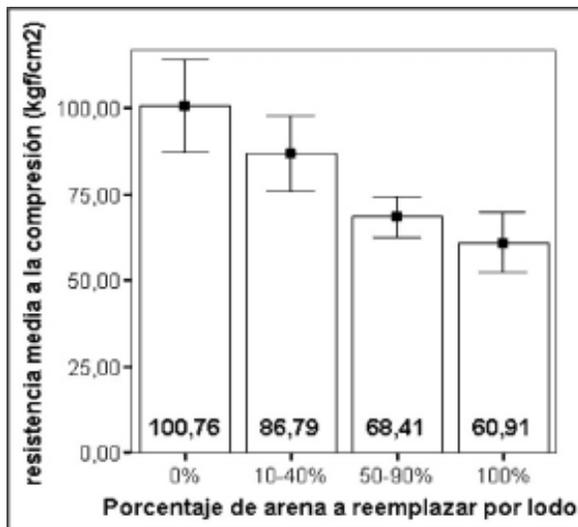


Figura 8. Resistencias promedio a la compresión (barras de error representan intervalo de confianza al 95%)

La disminución en la resistencia media a la compresión, entre las unidades en las cuales no se reemplazó arena por lodo aluminoso, y las unidades en las cuales se reemplazó el 40% es de 13,97 (Kgf/cm²), mientras que la diferencia en la resistencia de las unidades con reemplazo del 40% y hasta el 100% es de 25,88 (Kgf/cm²), no existiendo diferencias considerables (7,5 Kgf/cm²)

en la resistencia de las unidades con reemplazos entre 50 y 100%. Lo anterior permite evidenciar que la resistencia a la compresión se compromete de manera significativa, a partir de un porcentaje de reemplazo del 50%.

En la Figura 9 se presenta la resistencia a la compresión, según el lote de fabricación, y en ella se puede apreciar un comportamiento similar a los resultados anteriores, es decir, que en ambos casos a partir del 50% de reemplazo de arena por lodo aluminoso, se comienza a comprometer la resistencia media a la compresión de las unidades experimentales. Adicionalmente, al comparar los porcentajes de reemplazo con lodos de invierno y verano, se apreció mayor resistencia a la compresión en las unidades experimentales fabricadas con lodos aluminosos de invierno (Lote 2).

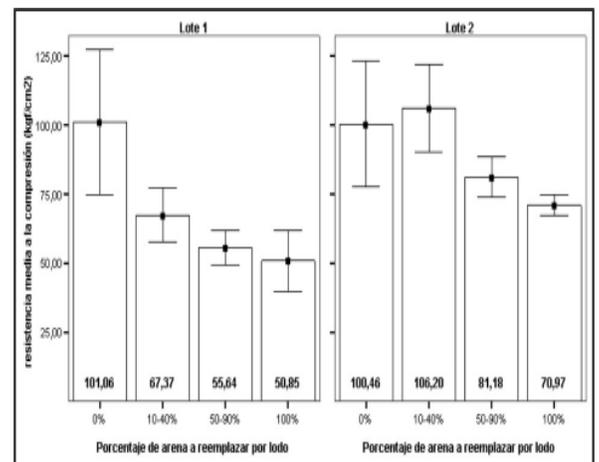


Figura 9. Resistencias promedio a la compresión, según lotes fabricados (barras de error representan intervalo de confianza al 95%)

El análisis de varianza (Tabla 6) reportó diferencias significativas en la resistencia de las unidades experimentales, tanto en la incidencia del porcentaje de lodo adicionado, como en el lote de fabricación ($p < 0,005$). El análisis Post-Hoc, por

medio del método de Tukey, igualmente permitió encontrar diferencias significativas ($p < 0,05$) entre la unidad sin adición de lodos aluminosos y unidades con un porcentaje mayor al 50% de arena reemplazada por lodos. Esto permite tener una idea del límite hasta el cual puede ser usa-

do el lodo como reemplazo del material estructurante. En este sentido, Mejía y Delvasto (1998), encontraron que con mezclas de lodos aluminosos hasta con un 33% de arena, obteniendo ladrillos con resultados aceptables en cuanto a resistencia mecánica.

Tabla 6. Análisis de varianza.

Dependent Variable: resistencia media a la compresión (kgf/cm²)

	Type III Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.	Potencia observada ^a
Modelo corregido	41457,897 ^b	11	3768,900	8,124	,000	1,000
Intercepto	658155,513	1	658155,513	1418,734	,000	1,000
Bloque	20808,368	1	20808,368	44,855	,000	1,000
Periodo	20649,529	10	2064,953	4,451	,000	,998
Error	45462,520	98	463,903			
Total	745075,931	110				
Total Corregido	86920,417	109				

a. Calculado usando alpha = ,05

b. R Cuadrado = ,477 R Cuadrado ajustado = ,418)

En la Figura 10 se aprecia nuevamente que cada vez que se reemplazó la arena por el lodo, las unidades fabricadas en el segundo lote presentaron mayor resistencia a la compresión que las fabricadas en el primer lote, observándose en ambos lotes que a medida que aumenta el porcentaje de lodo en las probetas, disminuye la resistencia a la compresión, siendo no obstante más evidente esta tendencia para las unidades del segundo lote (lodos de invierno).

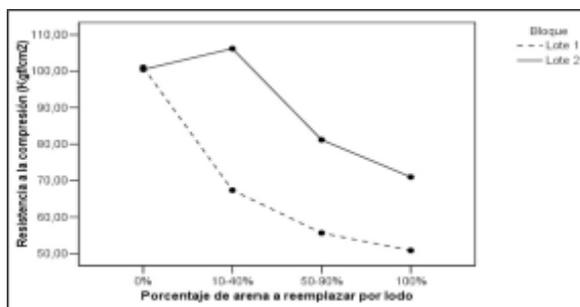


Figura 10. Resistencias promedio a la compresión, según lotes evaluados

El anterior comportamiento se puede deber a que los lodos usados en el primer lote fueron recolectados durante época de verano, y los lodos usados para la fabricación del segundo lote fueron recolectados durante época de invierno. Tal como se ilustra en la Figura 2, la dosificación de sulfato de aluminio es mayor en época de invierno. En este sentido, según información suministrada por Aguas y Aguas de Pereira, desde finales de marzo a finales de mayo se dosifica durante periodos mayores de tiempo que durante el resto del año. Asimismo, en el mes de febrero, fecha en la cual fueron recolectados los lodos para el primer lote, presenta menores periodos de dosificación. Lo anterior lleva a pensar que los lodos generados durante época invernal probablemente contengan mayores concentraciones de hidróxidos de aluminio, lo que incidiría en un mayor contenido de Al_2O_3 en las unidades fabricadas usando este tipo de lodos, lo

que de acuerdo con diversas investigaciones conllevaría a productos finales más resistentes. Es importante aclarar que los difractogramas, de muestras tomadas en diferentes épocas del año, no arrojaron diferencias desde el punto de vista mineralógico.

De acuerdo con lo anterior, se puede esperar que la dosificación de coagulantes en la planta de potabilización, la cual aumenta en época invernal debido a la mayor turbiedad del agua afluyente, incida directamente en la resistencia a la compresión de los ladrillos cerámicos fabricados con lodo aluminoso como agregado.

Finalmente, es posible que durante el segundo lote de fabricación, el control de la temperatura interna del horno no fuera adecuado, lo que influiría en la mayor resistencia promedio encontrada durante esta fase. Se puede tomar como indicador de lo anterior el hecho de que durante la fabricación del segundo lote, cerca del 18% de las unidades experimentales presentaron vitrificación, mientras que de las unidades del primer lote solo 6% presentaron este mismo comportamiento.

Desde el punto de vista normativo, ninguna unidad experimental cumplió con la Norma Técnica Colombiana NTC 4205 *"Ingeniería Civil y Arquitectura. Unidades de Mampostería de Arcilla Cocida, Ladrillos y Bloques Cerámicos"*, en cuanto a uso estructural, ya que ésta establece que las unidades de mampostería maciza (ladrillo) deben presentar una resistencia mínima a la compresión de 150 (kgf/cm²). Sin embargo se debe tener en cuenta que las unidades probadas en laboratorio fueron probetas, con dimensiones diferentes a las que tienen los ladrillos en escala real, lo cual puede alterar el comportamiento en las pruebas y, por ende, los resultados arrojados.

En cuanto a uso no estructural, cuyo valor mínimo de resistencia a la compresión debe ser, según la NTC 4205, de 100 (kgf/cm²), cumplen con esta norma las unidades experimentales en las cuales no se agregó lodo aluminoso, y aquellas unidades en las cuales se reemplazó hasta el 40% de arena por lodo aluminoso, del lote 2 (lodos de invierno). Lo anterior hace suponer que reemplazar arena por lodo aluminoso, en porcentajes iguales o inferiores al 40% permite cumplir con la NTC 4205 en cuanto a unidades de mampostería no estructural.

Se revisó igualmente la norma Española UNE 67-019-96 "Especificaciones para Ladrillos Cerámicos", del Convenio Colectivo del Grupo de Construcción y Obras Públicas de la Comunidad de Madrid 2005, AECOM (Asociación de Empresas de la Construcción de Madrid). Esta norma establece que las unidades macizas deben presentar una resistencia igual o superior a 100 (kgf/cm²), lo cual conduce a las mismas conclusiones del párrafo anterior.

Se aclara que aunque las Normas Técnicas, específicamente la NTC 4205, no son de obligatorio cumplimiento por tratarse de normas de calidad, y solamente las empresas que cuentan con certificación del ICONTEC requieren el cumplimiento de éstas, se toman como criterio válido para concluir el posible uso de lodos aluminosos como agregado en la fabricación de ladrillos cerámicos.

Absorción de agua

La Tabla 7 presenta los porcentajes promedio de absorción de agua de acuerdo con el tipo de lodo y el porcentaje de arena reemplazada. En este caso también se descartaron los valores de absorción que por vitrificación resultaron muy bajos.

Tabla 7. Absorción promedio de agua (%), según Porcentaje de arena reemplazada por lodo aluminoso

Porcentaje de arena a reemplazar por lodo	Media	Desviación estándar
	% de absorción de agua	% de absorción de agua
0%	16,9	1,7
10%	17,3	2,0
20%	18,7	2,4
30%	19,9	2,1
40%	18,6	4,7
50%	15,3	6,4
60%	12,7	5,5
70%	13,3	7,1
80%	16,1	7,6
90%	15,5	7,7
100%	26,0	2,4
Total	17,3	6,0

En general, puede apreciarse que solo las unidades en las cuales se reemplazó el 100% de la arena, presentan diferencias apreciables en cuanto a absorción de humedad (Figura 11), como era de esperarse de acuerdo con los resultados preliminares y los resultados anteriores en cuanto a resistencia a la compresión. Se destaca el hecho de no encontrar diferencias representativas entre las demás unidades experimentales. Lo anterior permite concluir que el uso de lodo aluminoso sí incrementa la absorción de humedad en las unidades experimentales, comprometiendo la resistencia a la compresión de las mismas. No se realizó análisis de varianza debido al no cumplimiento del supuesto de homogeneidad de varianza entre tratamientos (Ferrán, 2003).

Los resultados obtenidos ratifican la relación inversa que existe entre la resistencia a la compresión y la absorción de humedad, ya que las unidades experimentales con mayor absorción de humedad presentaron menor resistencia a la compresión.

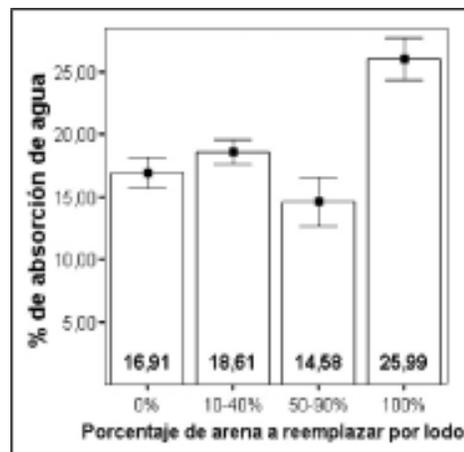


Figura 11. Porcentaje promedio de absorción de agua (barras de error representan intervalo de confianza al 95%)

La Norma Técnica Colombiana NTC 4205 establece que las unidades de mampostería no estructural deben presentar una absorción de agua máxima del 20%, por lo que las unidades experimentales cuyo porcentaje de reemplazo se encuentra entre el 0 y el 90% cumplen con esta especificación de la norma.

Conclusiones y recomendaciones

- Características como la composición mineralógica, el tamaño de partícula y la plasticidad de los lodos aluminosos generados en la planta de potabilización de agua de la ciudad de Pereira constituyen a los lodos aluminosos residuales como un material no apto para ser utilizados como agregado en la fabricación de ladrillos cerámicos.
- Los análisis mineralógicos, la plasticidad y las pruebas de resistencia a la compresión y absorción de humedad permitieron identificar a la arena como el material a ser reemplazado por los lodos aluminosos, en la fabricación de ladrillos cerámicos.

- Existe una tendencia a disminuir la resistencia a la compresión de las unidades experimentales, en la medida que se incrementa el porcentaje de lodo aluminoso adicionado.
- Existe una tendencia a incrementar la absorción de humedad en las unidades experimentales, en la medida que se incrementa el porcentaje de lodo aluminoso adicionado.
- Desde el punto de vista técnico, no es posible utilizar lodos aluminosos como agregado en la fabricación de ladrillos cerámicos.
- Con valores superiores al 50% de reemplazo de arena por lodo aluminoso, se empieza a comprometer de manera significativa la resistencia a la compresión.
- Las probetas cuya resistencia a la compresión fue mayor presentaron menor porcentaje de absorción de humedad, relacionado con menor porosidad. Lo anterior permite asumir una relación inversa entre la absorción de humedad y la resistencia a la compresión.
- Las unidades experimentales en las cuales se reemplazó arena por lodo aluminoso recolectado en época de invierno, y cuyo porcentaje de reemplazo fue hasta del 40%, cumplen como unidades de mampostería no estructural, frente a los parámetros de resistencia a la compresión (kgf/cm^2) y absorción de humedad (%), según la Norma Técnica Colombiana NTC 4205.
- Aunque las normas técnicas no son de obligatorio cumplimiento, los resultados arrojados por el presente estudio permiten suponer como una alternativa no viable la incorporación de lodo aluminoso como agregado en la fabricación de ladrillos cerámicos. Lo anterior obliga a pensar en la necesidad de continuar estudiando esta alternativa, hasta encontrar las condiciones óptimas de la incorporación de los lodos aluminosos en ladrillos cerámicos.

Agradecimientos

Los autores agradecen la cofinanciación del Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología – “Francisco José de Caldas” – COLCIENCIAS, Servicio Nacional de Aprendizaje – SENA, Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Pereira Aguas y Aguas S. A. – ESP, Universidad Tecnológica de Pereira – UTP, Ladrillera Bellavista y el apoyo de la Ingeniera Sanitaria Patricia Torres Lozada.

BIBLIOGRAFÍA

- BERÓN C. F. 1997. Incidencia de los pretratamientos en medios porosos en el tratamiento de agua químicamente coagulada. Tesis de Maestría. Universidad del Valle.
- CHEN-FENG CHAN and YUNG-CHAO KO. 1994. *Ceramics International* Volume 20, Issue 2. Pages 79-84.
- DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA. 2002. Metodología y tratamiento de la no respuesta en encuestas estadísticas. *En: Estadísticas al Día*. No 3, marzo.
- FERRÁN, M. 2003. SPSS para Windows. Análisis estadístico.
- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS (ICONTEC). 2003. Norma Técnica colombiana Ingeniería Civil y Arquitectura - Unidades de mampostería de arcilla cocida - Ladrillos y bloques cerámicos - NTC 4205.

- MEJÍA R. Y DELVASTO S. 1998. Aprovechamiento de lodo aluminoso generado en el proceso de potabilización del agua. Cali.
- MINISTERIO DE DESARROLLO ECONÓMICO Y SOCIAL. 1996. Diagnóstico del sector agua potable y saneamiento en Colombia.
- SALVINI, V. R., INNOCENTINI, M. D. M. y RODRIGUES, J. A. 2001. Creep in Al_2O_3 ceramic filters. *Cerâmica*, Oct./Nov./Dec, vol.47, no.304, p.193-198. ISSN 0366-6913.
- SANDOVAL, L., FLORES, L. M., MONTELLANOS, L., MORÁN, M. A., RUBI, R., SÁNCHEZ, L. O., SANTANA, M. L., VÁSQUEZ, S. y MARTÍN, A. 1998. Tratabilidad de los lodos producidos en la coagulación de aluminio en la potabilización del agua. Seminario Regional Bienal sobre Potabilización. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México
- STAMENKOVIC, V. SIMICIC, F. SIGULINSKI, P. MARTINOVIC and R. STEFANOVIC. 1977. *Ceramurgia International*. Volume 3, Issue 4, october-december, Page 168.
- TENORIO, J. A. S., ARAÚJO, F. G. S, y PEREIRA, S. S. R., 2003. Decomposição da fase majoritária do cimento Portland - Parte II: alita com adições de Fe e Al. *Rem: Rev. Esc. Minas*, Apr./June, vol.56, no.2, p.113-117. ISSN 0370-4467.