

APLICACIÓN DE LODOS DE PLANTAS POTABILIZADORAS PARA ELABORAR MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Oswaldo CERÓN, Sandra MILLÁN, Fabricio ESPEJEL, Arturo RODRÍGUEZ y Rosa María RAMÍREZ

Instituto de Ingeniería, UNAM. Coordinación de Ingeniería Ambiental, Edif. 5, Ciudad Universitaria. Coyoacán CP. 04510 México, D.F. Tel. 56 23 36 00, ext. 8657 y 8668 Fax 56 16 21 64. E-mail: rmrz@pumas.iingen.unam.mx, OCeronA@iingen.unam.mx

Palabras clave: lodos, aprovechamiento, cementantes, morteros, concretos

RESUMEN

En este trabajo se planteó como objetivo general evaluar la viabilidad técnica de emplear lodos de plantas potabilizadoras en la elaboración de productos utilizados en la industria de la construcción. Con este fin, en una primera etapa del estudio se realizó un muestreo y caracterización de los lodos producidos y almacenados en una planta potabilizadora. En una segunda etapa se realizaron pruebas de elaboración y caracterización de especímenes a base de diferentes formulaciones de mezclas binarias y ternarias compuestas por lodo y materiales cementantes (cemento, cal, yeso y mortero). Finalmente, en una tercera etapa se elaboraron, con las mejores formulaciones de especímenes, tabicones y ladrillos. A los especímenes elaborados se les determinó la resistencia a la compresión y la contracción por secado para evaluar la viabilidad para fabricar morteros de mampostería y concretos de relleno. Las mezclas binarias, compuestas por 90% lodo y 10% cemento y 90% lodo y 10% cal, presentaron valores más altos de resistencia a la compresión (153.63 Kg/cm^2 y 144.13 Kg/cm^2 respectivamente), con respecto al reportado para morteros tipo I y concretos de relleno (125 Kg/cm^2). La mejor mezcla ternaria compuesta por 90% lodo, 5% yeso y 5% cemento, presentó un valor de 109.6 Kg/cm^2 , superior al valor recomendado en normas técnicas para un mortero tipo II (75 Kg/cm^2). Los resultados obtenidos para tabicones y ladrillos fueron menos alentadores. Con base en estos resultados, se determinó que el lodo es un material que posee una aceptable viabilidad técnica para ser utilizado en este tipo de materiales.

INTRODUCCIÓN

La potabilización de agua es la aplicación de una serie de procesos de tratamiento para producir agua que no contenga contaminantes objetables, ya sean químicos o agentes infecciosos y que no cause efectos nocivos al ser humano. Las fuentes de aguas superficiales son, por lo general, más turbias que las aguas subterráneas y contienen un mayor número de sólidos suspendidos y bacterias (Schultz y Okun, 1990), por lo que es necesario aplicar coagulantes para remover los contaminantes en suspensión, generando como resultado residuos o lodos, que, en caso de no darles una disposición final adecuada, contribuyen de manera

importante a la contaminación de la atmósfera, de las aguas y de los suelos, afectando los ecosistemas del área de disposición (NOM-004-SEMARNAT-2002).

El proceso de potabilización de aguas superficiales genera, en el proceso de coagulación-floculación, un residuo o lodo del orden del 5% del volumen total de agua tratada (Armenter y Cristiá, 2002). En México, no se tienen datos sobre producción de lodos, sin embargo, se considera que puede ser significativa, tomando en cuenta que se reportan 307 plantas potabilizadoras que utilizan ese proceso, para tratar un flujo de 2.8×10^8 m³/año (CNA, 2004). Estos lodos, formados principalmente por hidróxidos y por material suspendido, son descargados comúnmente en cuerpos de agua o una vez deshidratados, en vertederos destinados a tal efecto, u ocasionalmente utilizados en suelos agrícolas o forestales (Elliot *et al.*, 1990; Roy y Couillard, 1998; Basta, 2000).

La toxicidad potencial de los lodos de las plantas potabilizadoras en seres humanos y organismos acuáticos depende de diferentes factores como son: características del agua cruda; el coagulante utilizado y los posibles contaminantes removidos por el coagulante, así como las reacciones químicas que ocurran durante el proceso, el tiempo de retención del lodo en los sedimentadores; características físicas, químicas y biológicas del influente. Los lodos que tienen concentraciones elevadas de aluminio al ser vertidos a los lagos o a los ríos con una velocidad baja de caudal pueden formar sedimentos que aíslan la capa bentónica (Cordeiro, 1996).

Este impacto significativo de las descargas en cuerpos receptores, además de las limitaciones ambientales en materia de descarga de lodos y el alza de los costos por el transporte y manejo de los mismos a los sitios de disposición, han obligado a los organismos operadores a buscar alternativas técnica y económicamente viables para el aprovechamiento de los lodos de modo que representen un beneficio económico y ambiental.

Una de las opciones de aprovechamiento, que presenta una alta factibilidad técnica, es la elaboración de materiales cementantes, como morteros, constituidos parcial o totalmente por residuos con propiedades mecánicas similares, o en muchos casos superiores, a las de productos comerciales (Escalante, 2002; Salazar, 2003). Como antecedentes de esta opción de aprovechamiento se pueden mencionar a Dillon *et al.* (1996), que mostraron el potencial que resulta al incorporar lodos provenientes de coagulación con sales de aluminio y sales férricas en varios procesos de manufactura de cemento, ladrillos, hierro y acero, cerámica y materiales refractarios en el Reino Unido. Goncalves, *et al.* (2002) presentó un estudio sobre la incorporación de lodos de una planta de tratamiento de agua potable en Portugal, como aditivo en la elaboración de mortero, encontrando que el lodo deshidratado y secado a 105 °C inhibe el proceso de secado y endurecimiento de la pasta del mortero, por lo que concluye el lodo tratado térmicamente a no menos de 450 °C, es la mejor opción para fabricar mortero, mejorando el tiempo de secado, pero disminuyendo un poco la resistencia mecánica. Finalmente, en Colombia, un grupo de investigadores de la

Universidad del Valle y de la Corporación Construir, tomaron lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales con el objeto de evaluar su potencial en productos cementantes y bloques para construcción, produciendo un material de alta resistencia y con una característica importante como es la impermeabilidad, lo cual permite que los metales pesados o sustancias lixiviables queden “encapsuladas” y no salgan al contacto con el agua (Salazar, A. 2003). Con base en lo anterior, el objetivo que se planteó en este estudio fue determinar la viabilidad técnica de utilizar los lodos de una planta potabilizadora para elaborar morteros y concretos, minimizando el impacto ambiental y obteniendo un beneficio social y económico.

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología empleada en este estudio se dividió en tres etapas. En una primera etapa se realizó el muestreo y caracterización de los lodos espesados de la planta potabilizadora de estudio, así como también de los almacenados en la misma. En el área de almacenamiento de lodos se tomaron 6 muestras compuestas, mientras que en la zona de espesadores se obtuvieron 3 muestras compuestas. Posteriormente, se realizó una caracterización fisicoquímica y microbiológica de los lodos.

En una segunda etapa se elaboraron, por duplicado, especímenes cúbicos de 2 pulgadas de lado, preparados con diferentes formulaciones de mezclas binarias y ternarias, compuestas por lodo (0, 25, 40, 75 y 90%), combinado con materiales como cemento, cal, mortero, yeso y arena. Los materiales y reactivos que se emplearon en la elaboración de especímenes, ladrillos y tabicónes fueron: cemento Pórtland compuesto, cal hidratada, yeso, mortero tipo I, arena andesita malla 8, arena de río malla 8, agua destilada y aceite desmoldante, todos de tipo comercial. Los moldes utilizados fueron bastidores para cubos de cemento elaborados de latón y bronce forjado, resistente a la corrosión. A los especímenes elaborados se les aplicaron pruebas de resistencia a la compresión y contracción por secado, las cuales se describen más adelante.

La metodología para la elaboración de especímenes fue la siguiente: en una balanza analítica se pesaron una cantidad de lodo y otra de material (cemento, cal, yeso, mortero, arena) con los porcentajes en masa requeridos; la mezcla (sola o con agua) se homogeneizó y se prepararon los moldes para especímenes; agregando un poco de aceite desmoldante en las paredes. Se agregó una capa de la mezcla preparada y se apisonó 16 veces, cuatro por cada lado del molde. Este paso se repitió tres veces para rellenar el molde y con una espátula se retiró el exceso de muestra de la parte superior del molde. Después de 24 horas se retiraron los especímenes de los moldes para su secado a temperatura ambiente. Con los especímenes elaborados, se realizó una programación de pruebas de compresión de especímenes a 14, 21 y 28 días después de elaborados. Para tal efecto se midió el área, altura y peso de cada espécimen para conocer su volumen y densidad. La prueba de resistencia a la compresión se realizó, de acuerdo a la norma C-109 ASTM, colocando el espécimen en una prensa hidráulica SATEC

Systems, Inc., modelo 500WHVL, para comprimir a una velocidad de 1.5 ton/min, y determinar la resistencia mecánica en kilogramos por unidad de área. La contracción por secado se obtuvo por diferencia de volúmenes (C-157, ASTM), del espécimen húmedo contra el volumen del espécimen totalmente seco.

En la tercera etapa se hicieron pruebas preliminares para fabricar ladrillos y tabicones. Los ladrillos fueron del tipo de adobe de 12x5x2.5 cm y de 24x12x2.5 cm, elaborados con las formulaciones con mejores resultados de resistencia a la compresión. Los tabicones se hicieron de acuerdo al procedimiento comercial, incorporando el lodo en sustitución de arena, tepojal, o agua. Debido al alto porcentaje de humedad del lodo de espesadores, sólo se incluyó en las formulaciones para tabicones, incorporándolo como agua.

RESULTADOS

Los resultados generales de muestreo y caracterización de lodos de la planta potabilizadora en estudio se presentan en la **tabla I**.

Tabla I. Valores promedio de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de los lodos evaluados en estudio.

Parámetro	Lodos Almacenados	Lodos Espesados	Parámetro	Lodos Almacenados	Lodos Espesados
<i>FÍSICOQUÍMICOS</i>			<i>METALES</i>		
pH (unid. de pH)	5.94	7.05	Aluminio (mg/kg)	88,392.22	82,336.33
Textura: Arena (%)	46.83	56.16	Hierro (mg/kg)	194.33	142.17
Limo (%)	32.64	26.72	<i>METALES PESADOS</i>		
Arcilla (%)	20.20	17.12	Cobre (mg/kg)	13.94	11.36
Porosidad (%)	39.41	28.43	Cromo (mg/kg)	2.86	< 2
Humedad (%)	86.18	95.96	Arsénico (mg/kg)	1.30	1.23
Densidad Real (g/mL)	1.80	1.5	Cadmio (mg/kg)	0.17	0.21
Alcalinidad (% CaCO ₃)	8.51	10.39	Mercurio (mg/kg)	0.46	0.70
Cloruros (mg/kg)	721.44	884.5	Níquel (mg/kg)	10.75	7.71
Conduct. (µmhos/cm)	623.78	1,170.00	Plomo (mg/kg)	16.06	14.44
Fluoruros (mg/kg)	0.14	0.11	Titanio (mg/kg)	< 15	< 15
Sulfatos (mg/kg)	2,865.50	3,617.20	Zinc (mg/kg)	192.32	108.84
Fosfatos (mg/kg)	5.55	23.38	<i>MICROBIOLÓGICOS</i>		
Carbono total (%)	5.54	10.02	Coliformes. fecales (NMP/g)	3,666.67	28,400.00
N-amoniac. (mg/kg)	250.46	195.00	<i>Salmonella</i> (NMP/g)	416.67	23.00
N-orgánico (mg/kg)	5,194.78	13,037.67	Huevos de helminto (HH/2g)	3.44	0.60

Tabla II. Contenido promedio de óxidos en los lodos de la planta potabilizadora en estudio.

Contenido de Óxidos (%)	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ t	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	PXC
Lodos almacenados	33.23	0.48	31.98	4.94	0.32	0.63	0.64	0.41	0.43	0.4	26.1
Lodos generados	19.58	0.19	33.01	3.34	0.8	0.46	0.65	0.26	0.23	0.7	39.97

PxC= Pérdida por calcinación

En las **tablas III y IV** se presentan los valores de resistencia a la compresión (RC) a 14, 21 y 28 días y los % de contracción por secado (CxS) de los especímenes elaborados con lodo.

Tabla III. Resultados de las pruebas aplicadas a los especímenes elaborados con mezclas binarias a base de lodos de la planta potabilizadora en estudio.

Mezcla		Densidad	RC a 14 días	RC a 28 días	CXS
% Lodo	% Cemento	(g/cm ³)	(Kg/cm ²)	(Kg/cm ²)	%
100	0	1.54	168.09	146.83	84.4
90	10	1.34	103.335	132.305	84.4
75	25	1.27	47.48	54.765	22.1
40	60	0.68	3.885	2.715	22.1
25	75	0.76	1.225	0.8	5.9
0	100	2.03	650	679.6	11.1
% Lodo	% Cal				
90	10	1.465	104.19	137.115	86.5
75	25	0.975	31.98	27.65	61.9
40	60	0.5	1.585	1.87	16.9
25	75	0.615	3.17	3.4	16.9
0	100	0.935	5.2	7.21	18.1
% Lodo	% Yeso				
90	10	1.455	96.385	88.33	79.1
75	25	1.525	87.405	99.9	74.6
40	60	1.27	41.295	64.275	66.7
25	75	1.085	14.38	23.555	57.3
0	100	0.76	17.6	8.84	0
% Lodo	% Mortero				
90	10	1.415	94.165	103.72	83.1
75	25	1.36	72.22	96.665	80.5
40	60	1.125	12.485	9.52	65
25	75	0.865	3.045	2.975	36.4
0	100	1.595	200	171.2	0

N.D. Valor No Disponible.; RC: Resistencia a la compresión.

Tabla IV. Resultados de las pruebas aplicadas a los especímenes elaborados con mezclas ternarias a base de lodos de la planta potabilizadora en estudio.

Mezcla			Densidad	RC a 14 días	RC a 21 días	CXS
% Lodo	% Yeso	% Cemento	(g/cm ³)	(Kg/cm ²)	(Kg/cm ²)	%
90	5	5	1.45	97.135	71.245	80.5
75	12.5	12.5	1.4	78.48	53.1	79.8
40	30	30	0.75	4.6	4.085	40.8
25	37.5	37.5	0.7	17.705	19.365	2
% Lodo	% Yeso	% Cal				
90	5	5	1.4	63.49	N.D.	84.8
75	12.5	12.5	1.4	60.34	N.D.	80.5
40	30	30	0.65	2.995	3.58	27.1
25	37.5	37.5	0.7	11.345	12.29	0
% Lodo	% Cal	% Cemento				
90	5	5	1.45	82.785	98.21	84.2
75	12.5	12.5	1.25	53.335	43.265	79.8
40	30	30	0.4	0.42	0.9	9.7
25	37.5	37.5	0.6	4.845	4.33	0
% Lodo	% Yeso	% Andesita				
40	30	30	1.3	40.385	31.145	68.6
25	37.5	37.5	1.1	25.27	17.92	56.1
% Lodo	% Yeso	% Arena				
40	30	30	1.35	37.065	30.75	68.6
25	37.5	37.5	1.15	19.645	19.835	61.4

Por otra parte, en las **figuras 1, 2 y 3** se presentan las gráficas de resistencia a la compresión de las mezclas que obtuvieron los mejores resultados en esta prueba

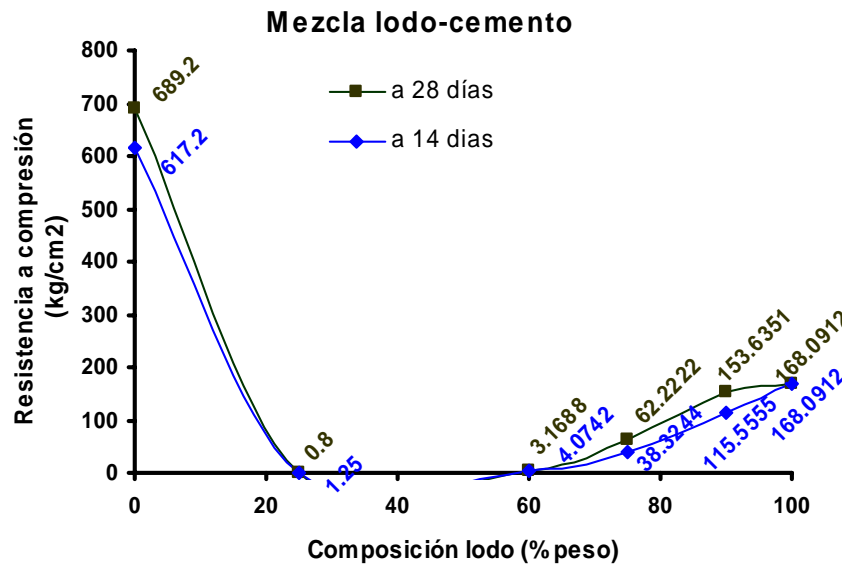


Figura 1. Resistencia a la compresión de mezclas lodo-cemento

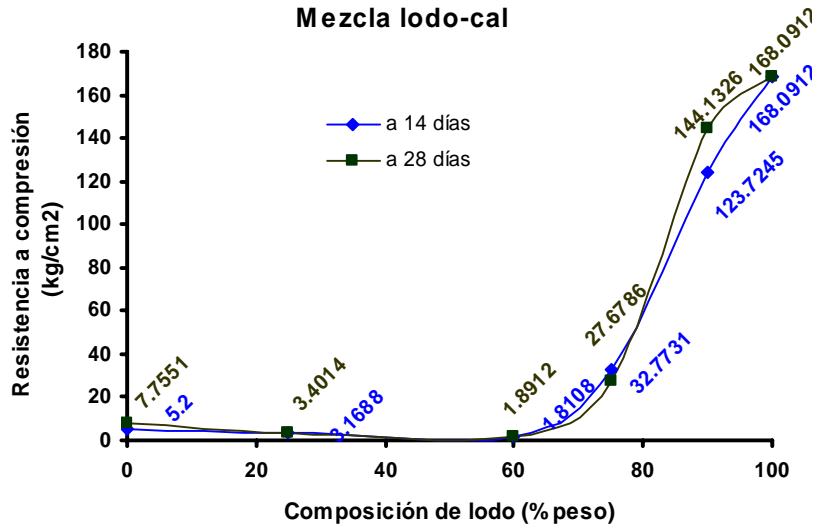


Figura 2. Resistencia a la compresión de mezclas lodo-cal

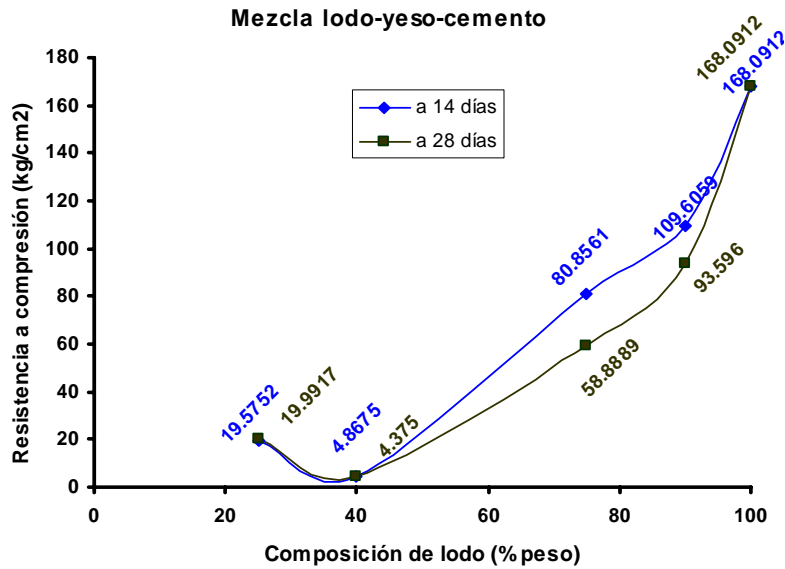


Figura 3. Resistencia a la compresión de mezclas lodo-yeso-cemento

Las **tablas V** y **VI** muestran una comparación de los valores de resistencia a la compresión de las mezclas realizadas en el laboratorio con respecto a los reportados para las mezclas empleadas en la elaboración de morteros de cemento, morteros mixtos y de cal, mientras que la **tabla VII** presenta las mezclas elaboradas con lodo, que por sus valores de resistencia a la compresión pueden utilizarse en mezclas para concretos de relleno, con base en lo reportado en las normas técnicas complementarias del Colegio de Ingenieros Civiles de México.

Tabla V. Comparación de mezclas elaboradas con lodo y materiales cementantes con respecto a mezclas para elaborar morteros de cemento y mixtos para mampostería

Mezcla a base de lodo			Mortero equivalente (Colegio de Ingenieros Civiles)				
Composición	Relación (Vol.)	RC (kg/cm ²)	Clasif.	Composición (relación en volumen)			RC (kg/cm ²)
				cemento	cal	arena	
90% lodo- 10% cemento	1:6	91-153	I	1	0-0.25	2.25-3	125
75% lodo- 25% cemento	1:2	38-62					
90% lodo-10% mortero	1:2.25-3:6	94-150					
75% lodo-25% mortero	1:2.25-3:3	72-98					
90% lodo-5% cal-5% cemento	1:0.5:12	98-134	II	1	0.25-0.5	2.25-3	75
75% lodo-12.5% cal-12.5% cemento	1:0.5:4	43-55					
90% lodo-5% yeso-5% cemento	1:0.72:12	84-110	III	1	0.5-1.25	2.25-3	40
75% lodo-12.5% yeso-12.5% cemento	1:0.72:4	47-80					

Tabla VI. Comparación de mezclas elaboradas con lodo y materiales cementantes con respecto a mezclas para elaborar morteros de cal

Especificaciones		Mezclas a base de lodo			
Relación (volumen) Cal:Arena	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	Mezcla		Relación (volumen)	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)
		% Lodo	% Cal		
1:1	18	90	10	1:12	104-137
1:2	10	75	25	1:4	27-32
1:3	5				
1:4	2				
		% Lodo	% Yeso		
		90	10	1:8.37	88-96
		75	25	1:2.79	87-100
		40	60	1:0.65	41-64

Tabla VII. Propuesta de mezclas elaboradas con lodo y materiales cementantes para elaborar concreto de relleno

Mezcla a base de lodo			Concreto equivalente (Colegio de Ingenieros Civiles)				
Composición	Relación partes (vol)	RC (kg/cm ²)	Composición (relación en volumen)				RC (kg/cm ²)
			cemento	cal	arena	grava	
90% lodo-10% cemento	1:6	91-153	1	0-0.1	2.25-3	1-2	125
90% lodo-10% mortero	1:2.25-3:6	94-150					
90% lodo-5% cal-5% cemento	1:0.5:12	98-134					

En la **tabla VIII** se muestran los resultados de las pruebas preliminares de la fabricación de tabicones, donde se utilizó el lodo almacenado para disminuir la

proporción de tepojal y cemento utilizado y el lodo de espesadores para sustituir el agua de acuerdo a la formulación comercial.

Tabla VIII. Pruebas preliminares de fabricación de tabicones

Mezcla (Relación en Kg)				Peso (Kg)	Volumen (cm ³)	Densidad (g/ cm ³)	RC (kg/ cm ²)
lodo	tepojal	cemento	Cal				
0	120	25	0	11.90	9360	1.27	31.44
20	30	0	0	10.15	9240	1.10	5.84
20	55	5	0	10.25	9360	1.10	6.30
10	30	0	5	8.15	9192	0.89	1.75
22 L*	120	25	0	10.70	9240	1.16	17.28

- Lodo de espesador (98% humedad)

DISCUSIÓN

La cuantificación de óxidos realizada mediante un análisis de FRX, determinó que la composición del lodo almacenado es similar a la del lodo espesado y que está compuesto en un 30% de Al₂O₃, 20% SiO₂, 4% FeO₃, y 30% de materia orgánica, Esta composición fue similar a los resultados reportados para lodos producidos a partir de la coagulación-floculación de agua superficial con sulfato de aluminio. Este lodo presentó los cuatro óxidos principales contenidos en los materiales de construcción CaO, Al₂O₃, SiO₂ y FeO₃, y los compuestos que pueden afectar la calidad del concreto y mortero, como es el caso de limo, materia orgánica, partículas rocosas y sales minerales, principalmente sulfatos. Con base en estos resultados, se pudo determinar que el lodo, de acuerdo a su composición presenta un gran potencial para ser utilizado como materia prima para la elaboración de este tipo de productos de la construcción.

Las pruebas realizadas a los especímenes determinaron que las mezclas elaboradas con la composición 90-10%, lodo-cemento, cumplen con el requerimiento de resistencia a la compresión para el mortero tipo I (91-153.6 Kg/cm²); para morteros mixtos o tipo II, la mezcla elaborada con la composición 90-5-5%, lodo-cal-cemento (98-134 Kg/cm²), cumple con el requerimiento de compresión; mientras que las mezclas elaboradas con la composición 90-5-5% y 75-12.5-12.5%, lodo-yeso-cemento, cumplen con lo especificado para mortero tipo III (88-110 y 47-80 Kg/cm²), con la observación que para este caso se sustituyó la cal por el yeso. Las mezclas elaboradas con lodo-cal y lodo-yeso presentaron resultados de resistencia a la compresión superiores a los valores de los diferentes tipos de morteros de cal, que son utilizados básicamente para aplanados y rellenos.

Por otra parte, las mezclas binarias con la composición 90-10% de lodo-cemento y lodo-mortero, así como la mezcla ternaria 90-5-5%, lodo-cal-cemento, presentaron valores superiores a los reportados para concreto de relleno (125 Kg/cm²). Estos resultados fueron muy buenos tomando en cuenta que no se utilizó grava en la mezcla. Cabe señalar que todas estas mezclas presentaron valores de

contracción por secado superiores al 50% debido al alto porcentaje de humedad intersticial del lodo.

Con respecto a los ladrillos, los ejemplares pequeños no presentaron fisuras y mostraron buena apariencia, pero al consolidarse presentaron un ligero encurvamiento y altos porcentajes de contracción, mientras que los grandes se fisuraron durante la consolidación, por lo que se determinó que estas mezclas no son aptas para ladrillos grandes. Los tabicones fabricados presentaron valores de resistencia a la compresión 40 a 90% más bajos que los obtenidos para tabicones de tipo comercial.

De acuerdo a las pruebas realizadas se puede concluir que, el lodo fisicoquímico (producido a partir de sulfato de aluminio) evaluado presenta una aceptable viabilidad técnica para fabricar concretos de relleno y morteros para mampostería. Lo anterior, permitiría reducir costos de producción y minimizar el impacto ambiental derivado de las descargas de estos residuos y del almacenamiento de éstos. La opción de ladrillos tipo adobe también es viable siempre y cuando se disminuya la contracción por secado, por lo que en pruebas posteriores a realizarse, se evaluará el efecto del secado del lodo sobre la calidad de ladrillos elaborados con este lodo.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a los ingenieros Alberto Fuentes y Raymundo Mondragón, del laboratorio de Materiales del Instituto de Ingeniería por las facilidades otorgadas para la realización de las pruebas de este trabajo.

REFERENCIAS

- Armenter Ferrando, J.L; Cristiá Roca, J., Cusidó Fabregas, J.A., Arteaga Nuñez, F. y Cremades Oliver, L. (2002) Innovación en el tratamiento de fangos de una ETAP. Secado por atomización y aprovechamiento en la industria cerámica. Tec. Agua. Barcelona, España.
- Basta, N.T. (2000). Examples and case studies of beneficial re-use of municipal by-products. In: Power J.F and Dick, WA. Land Application of Agricultural Industrial and Municipal By-products. ASDA, CSSA, and SSSA, Madison, WI.492-504.
- CNA (2004). Potabilización, desinfección y tratamiento de agua. En: *Situación del Subsector agua potable, alcantarillado y saneamiento*. Méx. Pag. 27.
- Cordeiro, J.S. (1996) O problema dos lodos gerados em decantadores de estações de tratamento de água.
- Dillion G.R., Hall, T., Sweet, N., Wolstenholme, R. and Woods, V. (1996). Novel methods for the treatment and disposal of waterworks sludge: Final report. WRc Report No. PT1084.
- Elliot H.A., Dempsey, B.A. y Maille P.J. (1990) Contents and fractionation of heavy metals in water treatment sludges. J.Environ. Qual. 19.

Escalante-García, J.I (2002). Materiales Alternativos al cemento Portland. Avance y Perspectiva, 21. marzo-abril, Pp. 79-88.

Goncalves, A., Esteves, A. y Carvalho M. (2004), Incorporation of Sludges from a Water Treatment Plant in Cement Mortars. En: The Conference Use of Recycled Materials in Building and Structures, Barcelona, España.

NOM-004-SEMARNAT-2002. Norma Oficial Mexicana. Protección Ambiental. Publicada en el Diario Oficial el 15 de agosto de 2003.

Roy, M. y Couillard, D. (1998). Metal leaching following sludge application to a deciduous forest soil. Water Res. 32: 1642-1652.

Salazar, A. (2003). Los Ecomateriales: Una alternativa económica para la construcción. Agencia Universitaria de Periodismo Científico y Cultural. Universidad del Valle, Cali, Colombia.

Schultz C y Okun D. (1990). Tratamiento de aguas superficiales para países en desarrollo. Edit. Noriega-Limusa. México.