

MULTICIENCIAS, Vol. 8, N° Extraordinario, 2008 (18 - 26)
ISSN 1317-2255 / Dep. legal pp. 200002FA828

Evaluación fisicoquímica y mecánica de un material de construcción a partir de lodos residuales municipales

Diana Pinto Osorio y Deisy Morán Villasmil

Escuela de Ingeniería Química, Universidad del Zulia, Maracaibo 4011, Venezuela.

E-mail: dianipin@hotmail.com; deisymv@gmail.com

Resumen

En este trabajo se evalúan fisicoquímicamente los lodos residuales provenientes del tratamiento de aguas residuales para determinar la posibilidad de utilizarlos en sustitución del cemento. Se calcinaron lodos a 830°C. Las cenizas fueron clasificadas según la Norma ASTM C-618, de carácter puzolánico, Clase C perteneciendo al tipo II, según la Norma COVENIN 28 para cemento Portland. Se fabricaron morteros con 5, 10, 15, 20 y 25% de cenizas de lodo en sustitución de cemento; los cuales fueron sometidos a prueba de esfuerzo, donde se aproximaban al patrón de medición, a medida que pasaba el tiempo de fraguado. En proyección de 70 días los morteros con 5, 10, 15 y 20% de cenizas de lodo alcanzan el similar endurecimiento al patrón de medición.

Palabras clave: Lodos residuales, cenizas, carácter puzolánico, material de construcción.

Physic-Chemical and Mechanic Evaluation of Construction Materials from Waste Municipal Sludge

Abstract

In this paper, residual *sludge* of wastewaters evaluated physic-chemical parameters to determinate the possibility to use them in cement substitution. The mud was burned on 830°C. The ashes were classified according to the Norma ASTM C-618 rule of puzholanic character, type C it were Type II according to the Norma COVENIN 28 to the cement Portland. Mortars were manufactured with 5, 10, 15, 20, and 25% of sludge ash, in cement substitution, it were subjected to effort test: they approached to the measure pattern as they left forging. In projection to 70 days, the mortars with 5, 10, 15 and 20% of sludge ash got the same hardening than the measure pattern.

Key words: Waste sludge, ashes, puzholanic character, construction materials.

Introducción

La legislación de muchos países condiciona el vertido de las aguas residuales a cuerpos de aguas naturales (ríos, lagos, mares) sin ser previamente tratadas. Los residuos sólidos de estos procesos se han convertido en un problema, por ser potencialmente contaminantes para el medio ambiente. Estos residuos se han utilizado como fertilizante en agricultura y jardinería por su contenido de materiales orgánicos y nutrientes. Sin embargo la gran cantidad de estos induce a buscar nuevas y mejores formas para su disposición final. Una factibilidad de uso propuesta es emplearlos como materia prima para la elaboración de materiales de construcción, después de un tratamiento de *puzolanización*, mediante el cual se obtiene un material que fija el hidróxido de calcio para lograr compuestos con propiedades hidráulicas [2].

Esta actividad suprime un foco contaminante, introduce un nuevo material a la industria de construcción logrando abaratar costos, sobre todo en construcción de edificios que no requieran materiales especiales. En Colombia se han elaborado materiales de construcción usando “cenizas puzolanizadas” como elemento aglutinante, artificialmente, provenientes de la calcinación de lodos residuales del tratamiento de aguas servida [3], estudiándose allí la temperatura de activación de la puzolana, a diferencia de

este estudio donde se evalúa la cantidad de ceniza que se debe sustituir para elaborar el material de construcción.

Materiales y Métodos

Los lodos crudos provenían de la planta de Tratamiento de Aguas Servidas, ubicada en el sector Cardón, del Municipio Carirubana. Fueron sometidos a calcinación y posterior caracterización fisicoquímica, se comparó con las normas COVENIN 28 [4] y ASTM C-618 [5], se determinó su capacidad aglutinante, se prepararon morteros en los que se sustituyó cemento en cantidades de 5, 10, 15, 20 y 25% y se contrastó con la muestra patrón 0% de ceniza. Se trató el lodo residual seco (triturado) para convertirlo en polvo, fue calcinado a una temperatura de 830°C por 3h aproximadamente basándose en la temperatura de activación de la puzolana, [3]. Las cenizas se tamizaron con tamaño de partícula de 300 μm de diámetro, se determinó su composición química según lo establecido en la norma COVENIN 109 [6].

Se determinaron las propiedades fisicoquímicas de los lodos crudos y sus cenizas: pH siguiendo el método potenciométrico con electrodo de vidrio combinado en una solución de 10g de muestra en 25mL de H₂O destilado [1] y conductividad eléctrica usando un conductímetro en una solución de 10g de muestra en 100mL de H₂O destilado

[1]. Se determinó la concentración de Ba, Al, Fe, Ni, Mg, Cd, Co, Cr, Li, Mo, Ag, Zn, Pb, Cu, Mn, Sn y V; siguiendo el método de digestión ácida con 0,05-0,2g muestra, 12mL de HNO₃ concentrado (180°C/2h) y 5mL de HClO₄, con un espectrofotómetro de absorción atómica PERKIN-ELMER 3030B [1].

Se evaluó el índice de actividad puzolánica según la norma ASTM C-311 [7]. Se caracterizó el poder puzolánico de las cenizas con la norma ASTM C-618 [5]. Se diseñó y elaboró una serie de morteros de 125cm³, con las composiciones indicadas en la Tabla 1. Se realizaron ensayos de resistencia de compresión a 7, 14 y 28 días, de peso unitario y de absorción según lo especificado en las Normas COVENIN 109, COVENIN 42 y COVENIN 484 [6, 8, 9]. Se empleó el programa estadístico Statistix 3.0, para establecer si los resultados de la compresión son aceptables y representativos mediante el análisis de varianza.

Resultados y Discusión

Al comparar las características de los lodos y sus cenizas, se apreció un incremento en el pH de 6,50 a 11,16, y de la conductividad eléctrica en un 50,78%, después de la calcinación (Tabla 2). El cambio de pH se debió a que las sales disueltas en el lodo crudo se concentran en la calcinación, originando un pH básico; Esto se atribuye a la presencia de alcalinos concentrados por la disminución considerable de la humedad a 0,89%, ya que la calcinación elimina la materia orgánica responsable de la acidez, y concentra los óxidos metálicos los cuales presentan hidrólisis básica.

La conductividad en los lodos residuales es generalmente mayor de 3dS/m [1], sin embargo, los valores 1,93dS/m y 2,91dS/m de lodo crudo y cenizas respectivamente están por debajo de éste debido a que los lodos son almacenados en lechos de secado al aire, expuestos a lluvia, por lo que las sales solubles pueden disolverse o lixiviarse disminuyendo la conductividad eléctrica. Al com-
 rar la concentración de metales en las diferentes fases del tratamiento térmico, se observó que la concentración de los metales se incrementó, por efecto de la combustión de la materia orgánica (MO) (Tabla 2).

La composición química de los lodos residuales provenientes de aguas servidas presentó un 43,67% de MO. La muestra tiene 7,14mg/kg de Ca, elemento abundante en la piedra caliza, materia prima para elaborar cemento. En cuanto a la composición química de las cenizas, el CaO constituye la mayor cantidad de compuesto de éstas (54,51%), seguido del SiO₂ (22,10%), el resto de los compuestos se encuentran en cantidades reducidas, valores característico del cemento (Tabla 3).

Comparando los resultados de la composición química de las cenizas con la Norma COVENIN 28, para la elaboración de cemento Portland, se aprecia que cumplen con casi todas las exigencias del cemento Tipo II, (Tabla 4). Respecto a la actividad puzolánica, las cenizas se aproximan a las de clase C, normalmente cenizas volantes producidas por carbón subbituminoso o fósil, se le conocen requerimientos aplicables y se considera tienen propiedades puzolánicas, además de algunas propiedades cementantes (ASTM C-618) (Tabla 5).

Según resultados presentados en la Tabla 6, se observa que el silicato dicalcico y tricálcico de las cenizas, están alrededor del 60%, el cual es considerable, ya que al comparar con el cemento Portland estos corresponden aproximadamente al 75% p/p del cemento y son responsables de la formación de hidróxido de calcio e hidrato de silicato de calcio al reaccionar con el agua, y proporcionan las propiedades aglutinantes al concreto.

Respecto al aluminato férrico tetracálcico (Tabla 7), se toma en cuenta la relación Al₂O₃/Fe₂O₃, ya que al ser menor de 0,64 se formará una solución sólida de aluminato férrico de calcio (4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃+2CaO.Fe₂O₃). En las cenizas de lodos de la muestra, esta relación es de 1,20; por lo que no se forma una solución sólida de

Tabla 1. Proporciones empleadas para la elaboración de los morteros

	Composición (%)					
	Patrón 0	5	10	15	20	25
Cemento (g)	750,00 ^a	712,50 ^b	675,00 ^b	637,50 ^b	600,00 ^b	562,50 ^b
Cenizas (g)	-	37,50 ^c	75,00 ^c	112,50 ^c	150,00 ^c	187,50 ^c
Arena (g) ^d	2250,00	2250,00	2 250,00	2250,00	2 250,00	2250,00
Agua (mL) ^e	625,00	625,00	625,00	650,00	670,00	685,00

Fuente: ^a g arena / 3. ^b g patrón * (1 - % sust / 100). ^c g patrón * (% sust / 100). ^d peso ocupado por 12 morteros con un volumen de 125cm³ c/u. ^e requerida para preparación de la mezcla.

Tabla 2. Comparación de las características del lodo crudo y las cenizas

Parámetros (unidad)	Lodo crudo	Cenizas	Dif. A ^a
pH	6,50	11,16	
Conductividad eléctrica [CE] (dS/m)	1,93	2,91	0,98
Materia orgánica [MO] (%)	43,67	5,91	-37,76
Metales totales (mg/kg)			
Calcio [Ca]	7,14	38,96	31,82
Plata [Ag]	1,00	42,80	414,80
Aluminio [Al]	13646,00	29251,41	15605,41
Bario [Ba]	100,80	11038,13	10937,33
Cadmio [Cd]	3,70	720,00	716,30
Cobalto [Co]	4,50	19,88	15,38
Cromo [Cr]	26,00	69,48	43,48
Cobre [Cu]	206,60	438,04	231,44
Hierro [Fe]	18422,48	25546,00	7123,52
Litio [Li]	3,40	56,83	53,43
Manganeso [Mn]	149,00	460,31	311,31
Molibdeno [Mo]	4,80	62,57	57,30
Níquel [Ni]	28,10	91,36	63,26
Plomo [Pb]	253,00	449,97	196,97
Zinc [Zn]	575,60	1255,86	377,26

Fuente: Valores de la evaluación fisicoquímica de los lodos y las cenizas. ^a Diferencia absoluta.

Tabla 3. Composición química de las cenizas de lodos residuales municipales

Parámetros	M ₁ ^a	M ₂ ^a	M ₃ ^a	M _{media} ^b
Dióxido de silicio [SiO ₂] (%)	22,10	22,11	22,08	22,10 (0,015)
Óxido de aluminio [Al ₂ O ₃] (%)	4,69	4,69	4,68	4,69 (0,006)
Óxido férrico [Fe ₂ O ₃] (%)	3,90	3,91	3,91	3,91 (0,006)
Óxido de calcio [CaO] (%)	54,52	54,51	54,50	54,51 (0,010)
Óxido de magnesio [MgO] (%)	2,63	2,49	2,40	2,51 (0,116)
Óxido de potasio [K ₂ O] (%)	0,85	0,88	0,88	0,87 (0,017)
Óxido de sodio [Na ₂ O] (%)	0,23	0,24	0,24	0,24 (0,006)
Trióxido de azufre [SO ₃] (%)	3,62	3,63	3,61	3,62 (0,010)
Humedad (%)	0,92	0,86	0,88	0,89 (0,031)
Pérdida al fuego (%)	5,00	5,23	5,32	5,18 (0,167)
Total (%)	98,46	95,55	98,50	98,50 (0,045)

Fuente: Valores de la evaluación fisicoquímica de las cenizas. ^aM₁, M₂ y M₃: Muestra 1, 2 y 3 respectivamente. ^bM_{media}: Muestra promedio (su desviación estándar).

Tabla 4. Comparación de la composición química de las cenizas con la Norma COVENIN 28 para Cemento Portland

Características	Normas COVENIN 28 para Cemento Portland			Cenizas de lodos
	Tipo I	Tipo II	Tipo III	
Dióxido de silicio [SiO ₂] (% mín.)		21,00		22,10
Óxido de aluminio [Al ₂ O ₃] (% máx.)		6,00		4,69
Óxido férrico [Fe ₂ O ₃] (% máx.)		6,00		3,91
Óxido de calcio [CaO]				54,51
Óxido de magnesio [MgO] (% máx.)	5,00	5,00	5,00	2,51
Óxido de potasio [K ₂ O]				0,87
Óxido de sodio [Na ₂ O]				0,24
Trióxido de azufre [SO ₃] (% máx.)	3,50	2,51	4,50	3,62
Humedad				0,89
Pérdida al fuego (% máx.)	4,00	4,00	4,00	5,18
Residuos insolubles	1,50	1,50	1,50	
Aluminato tricálcico [3CaO.Al ₂ O ₃] (%máx.)		8,00	15,00	5,81

Fuente: Elaboración propia con Norma COVENIN 28 y datos arrojados por análisis de laboratorio.

Tabla 5. Comparación de la composición química de las cenizas con la Norma ASTM C-618 para Cemento Portland

Características	Norma ASTM C 618			Cenizas de lodos
	Clase N	Clase F	Clase C	
Dióxido de silicio (SiO ₂)	70,00	70,00	50,00	30,70
Óxido de aluminio (Al ₂ O ₃)				
Óxido férrico (Fe ₂ O ₃) (% mín.)				
Trióxido de azufre (% máx.)	4,00	5,00	5,00	3,62
Humedad (% máx.)	3,00	3,00	30,00	0,89
Pérdida al fuego (% máx.)	10,00	10,00	6,00	5,18

Fuente: Elaboración propia con Norma ASTM C-618 y datos arrojados por análisis de laboratorio.

Tabla 6. Relación de silicatos tricálcico y dicálcico en las cenizas

Muestra	% Silicato tricálcico ^a (3Ca.SiO ₂)	% Silicato dicálcico ^b (2CaO.SiO ₂)
M ₁ ^c	6,58	58,49
M ₂ ^c	6,45	58,52
M ₃ ^c	6,73	58,23
M _{prom} ^d	6,59 (0,140)	58,47 (0,068)

Fuente: Valores de la evaluación fisicoquímica de las cenizas. ^a(4,071 * % CaO) – (7,600 * % SiO₂) – (6,718 * % Al₂O₃) – (1,430 * % Fe₂O₃) – (2,852 * % SO₃) ^b(2,867 * % SiO₂) – (0,7544 * % 2CaO.SiO₂), ^cM₁, M₂ y M₃: Muestra 1, 2 y 3 respectivamente. ^d Muestra promedio (su desviación estándar).

4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃+2CaO.Fe₂O₃ sino que se obtuvo aluminato férrico tetracálcico (4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃+2(3CaO.Al₂O₃)).

La resistencia a la compresión de los morteros fue evaluada, los valores arrojados a 7 días de edad (Tabla 8), indi-

can que al incrementar la cantidad de cenizas se observa una ligera disminución del peso por ser éstas más ligeras, lo cual ocasiona una menor carga de ruptura y por consiguiente el esfuerzo promedio disminuye, comparando estos resultados con el valor del patrón a 138kg/cm² en la que

Tabla 7. Relación de aluminato tricálcico y aluminato-férrico tetracálcico en las cenizas.

Muestra	% Aluminato tricálcico ^a (3CaO.Al ₂ O ₃)	% Aluminato-férrico tetracálcico ^b (4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃ +2(3CaO.Al ₂ O ₃))
M ₁ ^c	5,83	11,87
M ₂ ^c	5,81	11,90
M ₃ ^c	5,79	11,90
M _{prom} ^d	5,81 (0,02)	11,88 (0,012)

Fuente: Valores de la evaluación fisicoquímica de las cenizas. ^a (2,650 * % Al₂O₃) - (1,692 * % Fe₂O₃). ^b (3,043 * % Fe₂O₃). ^c M₁, M₂ y M₃: Muestra 1, 2 y 3 respectivamente. ^d M_{media}: Muestra promedio (su desviación estándar).

Tabla 8. Resistencia a la compresión de morteros de 125cm³, a 7 días de edad.

Muestra (%)	Peso ^a (g)	Área (cm ²)	Carga de Ruptura ^a (kg)	Esfuerzo ^a (kg/cm ²)
Patrón 0	282,37	25	4200,00	168,00
5	273,93	25	3450,00	138,00
10	269,30	25	3133,33	125,33
15	266,00	25	3000,00	120,00
20	267,77	25	2583,33	103,33
25	265,87	25	2000,00	80,00

Fuente: Valores de la evaluación de la compresión con el equipo Compresión Universal Hidráulica, marca Forney's INC., escalas 0-12 000 y 0-120 000 kg de presión. ^a promedio.

se sustituye el 5% de cemento por ceniza, y a 80kg/cm² cuando se sustituye el 25% (Fig. 1). Los resultados a los 14 días de edad de los morteros son similares a los obtenidos a los 7 días. Todos los morteros han resistido mayor carga de esfuerzo con el paso del tiempo (fraguado) (Tabla 9).

La muestra que más incremento la resistencia fue la del patrón en 28kg/cm², seguidamente en la que se sustituye el 5% con 19,33kg/cm² y en la de 25% con 16,00kg/cm², en las que menos se observó incremento fueron el las de 10%, 20% y 15 % con valores de 11,35kg/cm², 10,00 kg/cm² y 5,33kg/cm² respectivamente esto de los 7 a los 14 días de fraguado. De los 14 a los 28 días, el patrón aumentó en 3,33kg/cm² alcanzando una resistencia de 199,33kg/cm², mientras que en los otros morteros, el incremento fue muy superior al de la muestra patrón; destacando en la que se sustituye el 15% de cemento que aumenta su resistencia en 32,67kg/cm² (Tabla 10 y Fig. 1).

La puzolana aportada por la ceniza presenta un proceso de activación mayor con el paso del tiempo al ser comparado con el patrón, ya que el incremento del esfuerzo soportado por los morteros a los 28 días correspondientes al 0% de cenizas, es apreciablemente menor respecto al resto de los morteros. El patrón a los 28 días había incrementado la resistencia en 18,65%, mientras que los morteros

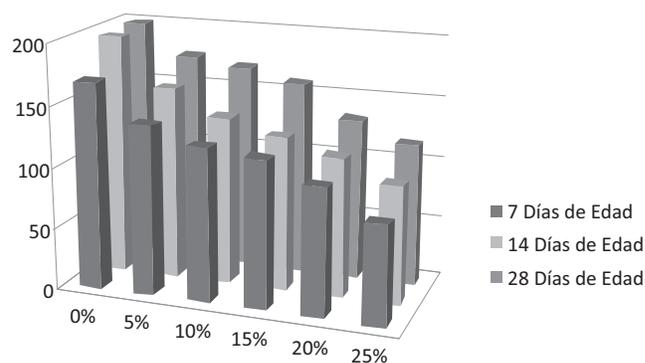


Figura 1. Compresión de los morteros de 125cm³ a distintas edades.

ros con 5% de cemento sustituido aumentaron la resistencia en 36kg/cm², 26,09%; los morteros con 10% de cenizas aumentaron 42,67kg/cm², 34,05%.

Debido a que los morteros con cenizas a 28 días aumentan su resistencia, se aplicó un análisis estadístico. Para el 5% p/p en cenizas, el análisis de varianza (prueba de medias poblacionales), muestra la variación del esfuerzo soportado por los morteros a distintas edades, con % de ceniza fijo para cada estudio. Se tienen 3 observaciones

Tabla 9. Compresión de los morteros de 125cm³, a distintas edades

Muestra (%)	7 Días(kg/cm ²)	14 Días(kg/cm ²)	28 Días (kg/cm ²)
Patrón 0	168,00	196,00	199,33
5	138,00	157,33	174,00
10	125,33	136,67	168,00
15	120,00	125,33	158,00
20	103,33	113,33	132,00
25	80,00	96,00	116,00

Fuente: Datos obtenidos en laboratorio con el equipo Compresión Universal Hidráulica, marca Forney's INC., escalas 0-12 000 y 0-120 000 kg de presión.

Tabla 10. Relación absoluta y porcentual de la resistencia de kg/cm² de los morteros según edades indicadas.

Muestra (%)	7 días		14 días		28 días		Totales		
	kg/cm ²	kg/cm ²	Dif.A ^a	Dif.% ^b	kg/cm ²	Dif.A ^a	Dif.% ^b	Dif.A.T ^c	Dif.%T ^d
Patrón 0	168,00	196,00	28,00	16,67	199,33	3,33	1,70	31,33	18,65
5	138,00	157,30	19,33	14,01	174,00	16,67	10,60	36,00	26,09
10	125,33	136,70	11,35	9,06	168,00	31,32	22,91	42,67	34,05
15	120,00	125,30	5,33	4,44	158,00	32,67	26,07	38,00	31,67
20	103,33	113,30	10,00	9,68	132,00	18,67	16,47	28,67	27,75
25	80,00	96,00	16,00	20,00	116,00	20,00	20,83	36,00	45,00

Fuente: Datos de Compresión. ^a Diferencia absoluta. ^b Diferencia porcentual. ^c Diferencia absoluta total. ^d Diferencia porcentual total.

que se toman de cada una de las 3 poblaciones presentes [10], con medias μ_1 , μ_2 y μ_3 respectivamente; empleando los valores de la Tabla 11.

Donde: Hipótesis nula: $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$; Hipótesis alternativa: H_1 : al menos 2 de las medias no son iguales; $\alpha = 0,05$; Región crítica: Se rechaza H_0 si $P < 0,05$ (P es el nivel más bajo de significancia). Decisión: Como $P < 0,05$ ($0,0228 < 0,05$), se rechaza H_0 , por lo que las diferencias encontradas son significativas, concluyendo que las mezclas no tienen el mismo esfuerzo medio.

Como $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$ es rechazada se debe analizar la diferencia entre pares de medias, para ello se utiliza el método de Tukey. Para aplicar este método, las medias muestrales están dadas por: $\bar{Y}_1 = 138,00$; $\bar{Y}_2 = 157,33$ y $\bar{Y}_3 = 174,00$; con $\alpha = 0,05$, predeterminado por el programa; $K = 3$ (3 tratamientos). $n = 3$ (número de observaciones por tratamiento). $S^2 = 128,44$ (cuadrado medio del error), extraído de la tabla A.22 (puntos porcentuales superiores de la distribución de rangos estudentizados: valores $q(0,05; k; \nu)$) [12]. Con 6 grados de libertad.

$$q(0,05; 3; 6) = 4,34; \quad (1)$$

Luego, al comparar con (desviación estándar del estadístico o la media)

$$q(0,05; k; \nu) \sqrt{\frac{S^2}{n}} = 4,34 \sqrt{\frac{128,44}{3}} = 28,397 \quad (2)$$

la diferencia por cada par de medias es:

$$\bar{Y}_3 - \bar{Y}_1 = 174 - 138 = 36 \quad (3)$$

$$\bar{Y}_3 - \bar{Y}_2 = 174 - 157,33 = 16,67 \quad (4)$$

$$\bar{Y}_2 - \bar{Y}_1 = 157,33 - 138 = 19,33 \quad (5)$$

El par de medias significativamente diferente utilizando este procedimiento es el 3 y 1, por lo que el ensayo se considera como aceptable. En la regresión lineal para los promedios de esfuerzos soportados por los morteros a diferentes edades, dada la correlación positiva perfecta, se tiene que, al aumentar la edad se incrementa la resistencia, alcanzándose el valor mínimo en 31 días, utilizando 3 muestras (Ec. 6).

$$\text{Esfuerzo} = 129,665 + 1,639 \text{ edad}, \quad (6)$$

con una correlación de 0,973

Tabla 11. Tratamiento para morteros de 125cm³ con 5% de cenizas.

Esfuerzo (kg/cm ²)	Edad para el análisis		
	7 Días	14 Días	28 Días
M ₁ ^a	144,00	156,00	158,00
M ₂ ^a	128,00	148,00	186,00
M ₃ ^a	142,00	168,00	178,00

Fuente: Datos de Compresión. ^a M1, M2 y M3: muestra 1, 2 y 3 respectivamente, n= 3.

Se aplica el mismo procedimiento de análisis para el resto de las muestras, con el 10% de cenizas, en el análisis de varianza, la decisión es $p < 0,05$ ($0,00009 < 0,05$), se rechaza H_0 por tanto las diferencias encontradas son significativas, concluyéndose que las mezclas no tienen el mismo esfuerzo medio. Mediante el Método de Tukey, la diferencia del par media significativa es el 3 y 1, por lo que el ensayo es aceptable y en la regresión lineal se refleja que la relación directa entre el esfuerzo soportado y la edad del mortero, alcanza el valor mínimo en 35 días, utilizando 3 muestras (Ec. 7).

$$\text{Esfuerzo} = 109,665 + 2,061 \text{ edad},$$

con una correlación de 0,997. (7)

Para el 15% p/p en cenizas, la decisión es $p < 0,05$ ($0,0001 < 0,05$), se rechaza H_0 por tanto las diferencias encontradas son significativas, concluyéndose que las mezclas no tienen el mismo esfuerzo medio. Mediante el Método de Tukey, la diferencia del par media significativa son el 3 y 1, y el 2 y 1, por lo que el ensayo es aceptable y en la regresión lineal se refleja la relación directa entre el esfuerzo soportado y la edad del mortero, alcanzándose el valor mínimo permitido en 41 días, utilizando 3 muestras (Ec. 8).

$$\text{Esfuerzo} = 103,665 + 1,884 \text{ edad},$$

con una correlación de 0,979 (8)

En el 20% p/p en cenizas, la decisión es $p < 0,05$ ($0,0004 < 0,05$), se rechaza H_0 por tanto las diferencias encontradas son significativas, concluyéndose que las mezclas no tienen el mismo esfuerzo medio. Mediante el Método de Tukey, la diferencia del par media significativa son el 3 y 1, y el 2 y 1, por lo que el ensayo se considera aceptable y en la regresión lineal, reflejándose la relación directa entre el esfuerzo soportado y la edad del mortero, alcanzándose el valor mínimo permitido en 64 días, utilizando 3 muestras (Ec. 9)

$$\text{Esfuerzo} = 93,995 + 21,360 \text{ edad},$$

con una correlación de 0,999 (9)

En el 25% p/p en cenizas, la decisión viene dada por: $p < 0,05$ ($0,0130 < 0,05$), aceptándose la hipótesis nula, por tanto las diferencias no son significativas, concluyéndose que las mezclas tienen el mismo esfuerzo medio, por lo que no se aplica el estudio de aceptación del prototipo.

Conclusiones

Las cenizas de los lodos residuales una vez activadas a 830°C, con una hidratación adecuada y un tamaño de partícula de 300µm, forman aluminatos y silicatos de calcio hidratados, confiriéndole propiedades aglutinantes similares a las del cemento Portland; aptas para ser utilizadas en la elaboración de materiales de construcción, bloques y similares, en sustitución de parte del cemento.

A medida que se incrementan los porcentajes de ceniza provenientes de lodos calcinados disminuye la resistencia de los morteros, siendo los más aceptables los valores entre el 5 y 20% en sustitución de cemento. Con el 25% de ceniza pierde mucha resistencia comparada con el patrón. El que contiene 5%, alcanzó una resistencia a la compresión aceptable respecto al patrón en el mismo tiempo.

Los morteros elaborados con el 10, 15 y 20% lograron la resistencia adecuada en un lapso de tiempo mayor, 70 días aproximadamente, aumentando el tiempo en que deben someterse a curado durante el fraguado.

La sustitución de parte de cemento por cenizas para elaborar bloques para paredes divisorias que no soportan carga, como ornamentales es factible; debido a los buenos resultados obtenidos en la evaluación de la resistencia al esfuerzo por los morteros. Además la calcinación de lodos residuales de aguas servidas reduce más del 50% en peso y volumen de estos, contribuyendo a mitigar el daño ambiental que supone la acumulación y disposición final de los lodos residuales.

Agradecimientos

Esta investigación fue realizada con el apoyo del Laboratorio de Investigaciones y Servicios Ambientales (LISA) “Dr. Humberto Fernández Morán” de La Universidad del Zulia Núcleo Punto Fijo, y el Laboratorio de Construcción Civil del Instituto Universitario de Tecnología Alonso Gamero de Coro.

Referencias

- [1] ACOSTA, Y.; PAOLINI, J.; FLORES, S.; BENZO, Z.; EL ZUAHRE, M.; TOYO, L.; SENIOR, A. (2003). Evaluación de metales pesados en tres residuos orgánicos de diferente naturaleza. **Multiciencia** vol. 3, no.1: 51-60.
 - [2] ESCUDERO, J.; LABRADOR, A.; PUCHADES, S.; ROMERO, L. (2001). Trabajos de campo y laboratorio para la reutilización de los lodos de la albufera como material de construcción en la arquitectura tradicional. Tesis de grado, Universidad Politécnica de Valencia, España.
 - [3] JIMENEZ L.; M.; TROCHEZ N. (2000). Diseño de un material de construcción a partir de lodos de desecho de la ciudad de Cali. Tesis de grado en Ingeniería de Materiales, Universidad el Valle.
 - [4] Norma COVENIN 28-93 (1993). **Cemento Portland**. Especificaciones.
 - [5] Norma C618-08a (2008). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.
 - [6] Norma COVENIN 109-90 (1990). Método de Ensayo para Análisis Químicos de Cementos Hidráulicos.
 - [7] Norma ASTM C 311-07 (2007). Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete.
 - [8] Norma COVENIN 42-82 (1982). Bloques Huecos de Concreto.
 - [9] Norma COVENIN 484-93 (1993). **Cemento Portland**. Determinación de la Resistencia a la Compresión de Morteros en Probetas Cúbicas de 50,8 mm de Lado.
 - [10] MORÁN, D.; PINTO, D. (2005). Evaluación Físicoquímica y Mecánica de un Material de Construcción Obtenido de Lodos Residuales Municipales. Tesis de Grado en Ingeniería Química. Universidad del Zulia, Venezuela.
 - [11] SALAZAR, A. (1993). **Los materiales en el ámbito de la Ingeniería. Producción de materiales de construcción reciclando desechos industriales y escombros de construcción**. Editor Oficina de Publicaciones, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle.
 - [12] WALPOLE, R.; MYERS, R. (1999). **Probabilidad y Estadística**. Mc.GrawHill, 6ªed, México. p. 720.
-