

Research Article

# The Use of Ash From Waste Water Treatment Sludge as a Mineral Addition in the Cement Industry

## El Uso de Cenizas de Lodos de Tratamiento de Agua Residuales como Adición Mineral en Planta Productoras de Cemento

Julio López Ayala<sup>1\*</sup>, Rashell Cazorla<sup>1</sup>, Goering Zambrano<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Epoch, Recursos Naturales, Sede Morona Santiago, Riobamba, Ecuador

II INTERNATIONAL  
CONGRESS OF SCIENCE  
AND TECHNOLOGY  
MORONA SANTIAGO 2021 (II  
CICTMS 2021)

Corresponding Author: Julio  
López Ayala; email:  
julio.lopez@epoch.edu.ec

Published: 9 August 2022

Production and Hosting by  
Knowledge E

© Julio López Ayala  
et al. This article is distributed  
under the terms of the  
Creative Commons  
Attribution License, which  
permits unrestricted use and  
redistribution provided that  
the original author and  
source are credited.

### ORCID

Julio López: <https://orcid.org/0000-0002-8625-1091>

### Abstract

Los lodos producidos en las plantas de tratamiento de agua residuales (TAR) son elementos patógenos y metales nocivos descargados y gran cantidad de sólidos en suspensión, lo que eventualmente hace que el cuerpo de agua se acumule. El estudio investigó la posibilidad de utilizar lodos de TAR como adición mineral, para lo cual se determinó la reactividad con cemento Portland, analizándose el material a diferentes temperaturas de calcinación y tiempos de residencia. Las muestras con mejores resultados se utilizaron para investigar el desempeño de mezclas de concreto en las que se sustituyó el lodo de TAR por cemento Portland en concentraciones del 5% al 30% en tres proporciones diferentes de agua / aglutinante (p / b) (0,35, 0,50 y 0,65). Los resultados indican que el uso de cenizas de lodo TAR mejora la resistencia de las mezclas de concreto siendo su uso posible para obtener la misma resistencia de una mezcla de hormigón con cemento Portland 100% y reducir el consumo de cemento en 37-200 kg / m<sup>3</sup> de hormigón, dependiendo de la concentración de sustitución y el nivel de resistencia deseado.

**Keywords:** cenizas de lodos, tratamiento de agua residual, minerales, cemento portland, concretos.

### Resumen

The sludge produced in the wastewater treatment (TAR) plants is pathogens and harmful metals discharged and a large amount of suspended solids, which eventually causes the water body to accumulate. The study investigated the possibility of using TAR sludge as mineral addition, for which the reactivity with Portland cement was determined, analyzing the material at different calcination temperatures and residence times. The samples with the best results were used to investigate the performance of concrete mixtures in which the TAR mud was replaced by Portland cement in concentrations of 5% to 30% in three different proportions of water / binder (w / b) (0.35, 0.50 and 0.65). The results indicate that the use of TAR mud ash improves the resistance of concrete mixtures, being its use possible to obtain the same resistance of a concrete mix with 100% Portland cement and reduce cement consumption by 37-200 kg / m<sup>3</sup> of concrete, depending on the concentration of substitution and the level of resistance desired.

**Palabras Clave:** sludge, ash, mieras, porlandcement, concretos.

 OPEN ACCESS



## 1. Introducción

La industria cementera reconoce el sólido argumento comercial para mejorar la productividad de sus recursos asociados al sistema de economía circular que mantienen el valor añadido de los productos durante el mayor tiempo posible y prácticamente eliminan los residuos.

La transición a una economía más circular requiere cambios a lo largo de las cadenas de valor, desde nuevas formas de convertir los residuos en un recurso hasta nuevos modos de comportamiento del consumidor. [1].

Entre los residuos más interesantes, que puede utilizarse de forma eficaz y respetuosa con el medio ambiente, son los lodos depurados procedentes del tratamiento de aguas residuales municipales donde su uso correcto genera un impacto ambiental mínimo o nulo.

El principal problema durante su manejo es su olor desagradable; además, el alto contenido de humedad, metales pesados y otras sustancias potencialmente nocivas hace que la utilización sea uno de los procesos más difíciles de protección del medio ambiente.

Los lodos depurados son un producto renovable que nunca terminará y su producción anual aumentará de acuerdo a su procesamiento, actualmente existe métodos empleados en su tratamiento y nos concentramos principalmente en su contenido sólido que se produce tras el tratamiento del alcantarillado entrante de la planta de tratamiento de aguas residuales. [2].

El análisis de sustentabilidad en cuanto a estos proyectos ambientales concluyó que el objetivo principal de utilizar los lodos de las plantas de tratamiento como componente adicional en un material de construcción, el hormigón de cemento Portland, es posible.

La industria del hormigón es uno de los principales usuarios de recursos naturales y su crecimiento ha tenido como resultado importantes impactos ambientales asociados con el uso de materias primas, incluida el agua, así como la liberación de gases de efecto invernadero durante la producción de cemento Portland. [3].

Se evaluaron las propiedades físicas y mecánicas más importantes de los lodos de las plantas de tratamiento que contienen concreto.

No obstante, se deben tener en cuenta otras características, como el origen de los lodos, los materiales utilizados, la compatibilidad de los lodos dentro de la matriz de cemento y la producción de probetas. [4].



La concentración óptima de una sustitución dada depende del tipo de material cementoso utilizado, las modificaciones previstas al hormigón y las características del entorno al que estará expuesto el hormigón.

El uso de arcilla calcinada como sustitución parcial del cemento Portland se ha estudiado en detalle debido a sus beneficios técnicos, económicos y ambientales. Por otro lado, el crecimiento de la población también se traduce en un aumento en el consumo de agua, lo que se traduce en una mayor producción de lodos por las plantas de tratamiento de agua (TAR). [5].

La cantidad y composición de los lodos depende del volumen de agua tratada en la planta, el proceso utilizado y las características del agua no tratada. Varias investigaciones han probado la viabilidad de utilizar lodos sin tratar como sustitución parcial del material silíceo en la fabricación de cemento.

El lodo TAR también se ha utilizado como agregado grueso ligero (lodo de tratamiento de agua y compuesto de aserrín de madera blanda) y en la producción de arcilla pesada. [6].

Sin embargo, existen pocos estudios sobre la posibilidad de utilizar cenizas de lodo de TAR como agente puzolánico en morteros de hormigón y cemento Portland. Por lo tanto, el presente estudio tiene como objetivo determinar la temperatura y el tiempo de residencia óptimos para producir un material con actividad puzolánica que pueda usarse como una sustitución parcial del cemento sin comprometer la resistencia mecánica y los ciclos de producción y que pueda mejorar la sostenibilidad de las obras y reducir los costos del hormigón. [7].

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Materiales

Se utilizaron como aglutinantes cemento Portland de alta resistencia temprana y cenizas de lodo de TAR. En su primera fase el lodo fue secado en un horno a 110° C durante 24 horas. Posterior a ello se homogeneizó y calcinó en un horno de mufla a temperaturas de 400, 500, 600 y 700° C, con tiempos de residencia de una y dos horas, a excepción de la temperatura de 700° C, caso particular que utilizó un tiempo de residencia de 30 min. Después de la calcinación, las cenizas se trituraron en un molino de bolas durante 1 hora. Las características físicas y químicas de los diferentes materiales se muestran en Tabla 1.

\* diámetro esférico equivalente (mismo volumen) 10%, 50% y 90% de la distribución de partículas está por debajo.

**Table 1**

*Características físicas y químicas de los materiales cementosos.*

Propiedades físicas		
Características	PC	Cenizas de lodo (600°C)
Gravedad específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,13	2,56
Superficie específica (m <sup>2</sup> /g)	1,14	27,7
Distribución de tamaño de partícula (µm)		
D(v,0,1)*	3,67	-
D(v,0,5)*	14,1	20,07
D(v,0,9)*	38,81	65,07
Composición química (% en peso)		
SiO <sub>2</sub>	20,4	66,2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,37	17,7
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,64	8,76
CaO	62,9	0,57
MgO	2,7	0,96
SO <sub>3</sub>	2,2	-
Na <sub>2</sub> O	0,13	0,32
K <sub>2</sub> O	0,95	1,16
MnO	<0,10	0,13
TiO <sub>2</sub>	0,29	0,86
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	<0,10	0,33
LOI	3,16	3,37

El agregado fino utilizado consistió en arena de cuarzo natural, con un peso específico de 2.66 g / cm<sup>3</sup>, unidad de masa de 1.62 g / cm<sup>3</sup>, módulo de finura de 1.85 y tamaño máximo de partícula de 1.2 mm.

El agregado grueso consistió en piedra triturada con un peso específico de 2.48 g / cm<sup>3</sup>, unidad de masa de 1.38 g / cm<sup>3</sup> y tamaño máximo de partícula de 19.0 mm. La temperatura de fundición se fijó en 18 ± 1 °C y el agua de la mezcla se calentó o enfrió para ajustar la temperatura de los otros materiales.

Las cantidades de materiales utilizados por metro cúbico de hormigón se muestran en Tabla 2.

## 2.2. Método

Mediante el método experimental se prepararon un total de siete mezclas de aglutinantes. Las mezclas de referencia se etiquetaron como REF y las mezclas con 5%, 10%,



15%, 20%, 25% y 30% de cenizas de lodo de TAR se etiquetaron como 5 RCE, 10 RCE, 15 RCE, 20 RCE, 25 RCE y 30 RCE, respectivamente.

**Table 2**

*Composición de la mezcla de hormigón (kg / m<sup>3</sup>).*

Mezcla	a/b	CM	PC	SA	Fino	Grueso	Agua	P	SP
REF	0,35	487	487	-	633	1076	170	1,46	-
	0,50	359	359	-	740	1055	180	-	-
	0,65	284	284	-	804	1045	185	-	-
5RCE	0,35	487	463	24	626	1076	170	1,94	-
	0,50	359	341	18	736	1055	180	-	-
	0,65	284	270	14	798	1045	185	-	-
10RCE	0,35	487	414	73	619	1076	170	4,84	1,45
	0,50	359	305	54	731	1055	180	0,36	-
	0,65	284	256	28	798	1045	185	-	-
15RCE	0,35	487	414	73	619	1076	170	4,84	1,93
	0,50	359	305	54	731	1055	180	0,36	-
	0,65	284	241	43	797	1045	185	-	-
20RCE	0,35	487	390	97	614	1076	170	4,84	2,17
	0,50	359	287	72	729	1055	180	1,07	-
	0,65	284	227	57	795	1045	185	-	-
25RCE	0,35	487	365	122	609	1076	170	4,84	2,41
	0,50	359	269	90	725	1055	180	1,43	-
	0,65	284	213	71	792	1045	185	-	-
30RCE	0,35	487	341	146	606	1076	170	4,84	3,13
	0,50	359	251	108	722	1055	180	3,21	-
	0,65	284	199	85	790	1045	185	0,71	-

a / b - relación agua / cemento; CM - materiales cementosos; PC Cemento Portland; SA cenizas de lodo; P plastificante; SP superplastificante. Para cada mezcla, se utilizaron tres relaciones a / b (0.35, 0.50 y 0.65) con un contenido de mortero del 51% en peso de materiales secos. En las mezclas con cenizas de lodos de depuradora, se ajustó la cantidad de arena para asegurar que el contenido de mortero fuera el mismo que en la mezcla de referencia. Esto fue necesario debido a la menor gravedad específica de las cenizas de lodo en comparación con el cemento Portland.

### 2.3. Procedimientos de prueba

Para la evaluación de la actividad puzolánica con cemento Portland, las muestras se analizaron de acuerdo con la norma ecuatoriana INEN 160, 192, 203, 1506 Y 1505 [8].



Este procedimiento es similar al definido en ASTM C 311. La diferencia es el uso de un plastificante para lograr el mismo flujo para muestras con la misma relación a / b.

El método consiste en preparar probetas de mortero con proporción de mezcla = 1: 3 y proporción a / b = 0,48. El mortero " A " se preparó con cemento Portland TIPO II, mientras que en Mortero " B " el 25% de material puzolánico se utiliza como sustituto del cemento.

El cemento tipo II contiene, además de clínker y yeso, del 6 al 10% de piedra caliza molida. Ambos morteros deben tener la misma consistencia y se debe utilizar un plastificante, según sea necesario. El índice de actividad de resistencia del cemento se calculó como la relación entre la resistencia a la compresión del mortero B a los 28 días dividida por la resistencia a la compresión del mortero A (referencia) a la misma edad, multiplicada por 100.

La fuerza compresiva modelo ocho probetas cilíndricas de  $\varnothing$  10 y 20 cm para cada mezcla, cuatro de las cuales se curaron en húmedo durante siete días y cuatro durante 28 días. Las muestras de prueba se retiraron de los moldes después de 24 horas y se almacenaron en un gabinete húmedo a  $23 \pm 2^\circ \text{C}$  y  $\text{HR} > 95\%$  hasta que estén listas para la prueba.

### 3. Resultados

La determinación de la actividad puzolánica con Cemento Portland es presentado en la Tabla 3 resultados de la resistencia a la compresión y el índice de actividad de resistencia del cemento para las diferentes temperaturas de calcinación y tiempos de residencia en el ensayo.

\*IAF índice de actividad de la fuerza.

Los resultados muestran que incluso cuando se utilizan la temperatura más baja y los tiempos de residencia más cortos (400 °C por una hora) en una mezcla con solo 75% de cemento, los resultados de resistencia a la compresión a los 28 días (44 MPa) son muy similares a los valores encontrados para el mezcla de referencia - 100% cemento Portland (45 MPa). La resistencia a la compresión de la mezcla calcinada a 600 °C durante 1 hora fue 54.5 MPa, superior a los valores encontrados para la mezcla calcinada a 700 °C durante 30 min y 2 h (50.2 y 50.7 MPa, respectivamente).

La distribución del tamaño de partícula para temperaturas de calcinación de 600° C y superiores, que produjo la mayor resistencia a la compresión. Se observaron distribuciones de tamaño de partícula similares en las muestras con cenizas de lodo de TAR calcinadas a diferentes temperaturas y tiempos de residencia.

**Table 3**

*Resistencia a la compresión de los morteros a los 28 días e índice de actividad de resistencia.*

Mezcla	Resistencia a la compresion 28 días (Mpa)	IAF (%)*
REF	45	100
400°C-1 h	44	98
400°C-2 h	45,4	101
500°C-1 h	47,3	105
500°C-2 h	48,6	108
600°C-1 h	54,2	120
600°C-2 h	51,4	114
700°C-1/2 h	50,2	112
700°C-1 h	56,3	125
700°C-2 h	50,7	113

Para determinar la temperatura de calcinación óptima, es importante asegurarse de que la distribución del tamaño de partícula de las arcillas calcinadas sea similar. De esta forma, el efecto físico asociado a la sustitución de cenizas de lodos por cemento será el mismo. Cabe recordar que las partículas de ceniza de lodo de TAR son ligeramente más grandes que las del cemento Portland.

A pesar de que el mejor índice de actividad de resistencia fue la muestra con ceniza de lodo de TAR calcinada a 700° C durante una hora (56.3 MPa), este valor fue muy cercano al de la muestra calcinada a 600° C durante una hora (54.2 MPa - solo un 3.5% más bajo).

Un aumento en la fuerza de solo el 3.5% no compensa la energía necesaria para alcanzar una temperatura de 700° C. Por lo tanto, se adoptó una temperatura de 600° C durante una hora para las pruebas de hormigón.

El análisis de XRD y termogravimétrico el difractograma identifican que la ceniza del lodo de TAR está compuesta principalmente de cuarzo y caolinita. También hay pequeñas cantidades de feldespatos y hematita. La pérdida de masa teórica de caolinita (13.9%) se utilizó para estimar la concentración de este mineral en las muestras.

Los resultados se muestran en Tabla 4. El análisis térmico también indica que la muestra presenta una pérdida de masa entre 200 y 400 °C asociada a un pico exotérmico correspondiente a la descomposición de materia orgánica.

En términos generales, se puede decir que la actividad puzolánica de una arcilla aumenta a medida que aumenta también la cantidad de estructuras amorfas o aleatorias en el material. Estos incluyen materiales como diatomitas de minerales arcillosos. Las



mejores arcillas para la activación térmica son ricas en minerales arcillosos (concentraciones superiores al 50%) y tienen un bajo contenido de cuarzo asociado (fase de alta dureza, sin actividad puzolánica).

**Table 4**

*Resultados del análisis termogravimétrico - Lodos de TAR.*

Muestra	Perdidas de masa (%)			Contenido Caolinita (%)
	20-200 °C	200-400 °C	400-800 °C	
Cenizas de lodos depurados	5,3	5,4	4,9	37

Las arcillas de caolín son las mejores para la producción de puzolanas activadas térmicamente, que muestran una actividad óptima después de la calcinación entre 600 y 800 °C [9].

Las muestras de cenizas de lodos de TAR calcinadas en este estudio muestran una concentración de caolinita del 37%, que es menor que el mínimo recomendado. Sin embargo, los niveles de resistencia a la compresión se pueden mantener e incluso aumentar a partir de los 28 días sustituyendo arcillas calcinadas que contienen una gran proporción de impurezas (más del 40% de cuarzo) por el 30% del cemento en los morteros.

Del mismo modo, un material con actividad puzolánica similar a los de calidad comercial se puede producir con arcillas que tienen un contenido de caolinita <40%, siempre que la misma tenga un tratamiento térmico entre 600 y 800 °C.

La sustitución parcial de las cenizas de los lodos por cemento resultó en un aumento de la resistencia a la compresión en comparación con el hormigón de referencia (100% cemento Portland), tanto a los siete como a los 28 días. La excepción fue en la mezcla con 5% de cenizas de lodo TAR con la relación a / b de 0.35 a los siete días. Para las mezclas restantes, el aumento en la resistencia osciló entre el 3% y el 30%, dependiendo de la relación a / b utilizada y la concentración de la sustitución de cenizas de lodo de TAR por cemento.

Todas las adiciones minerales, ya sean cementosas o puzolánicas, contribuyen a mejorar la resistencia mecánica. Para un rendimiento óptimo, el material debe sedimentarse, con el fin de enriquecer los minerales arcillosos. [10]. En este caso, las mezclas se prepararon con el mismo tipo y marca de cemento, agregados similares y las mismas relaciones a / b. La única diferencia fue que las mezclas con cenizas de cascarilla de arroz requerían el uso de un aditivo superplastificante, lo que las hacía más caras que las mezclas con cenizas de lodo de TAR.





## 4. Discusión

Los valores de resistencia a la compresión y el índice de actividad de resistencia (en términos porcentuales) en relación con la muestra de referencia después del curado húmedo durante siete y 28 días, respectivamente son mostrados en la Tabla 5.

La sustitución parcial de las cenizas de los lodos de la TAR por cemento resultó en un aumento de la resistencia a la compresión en comparación con el hormigón de referencia (100% cemento Portland), tanto a los siete como a los 28 días.

La excepción fue para la mezcla con 5% de cenizas de lodo TAR y una relación  $a/b$  de 0,35 a los siete días. Para las mezclas restantes, el aumento en la resistencia osciló entre el 3% y el 30%, dependiendo de la relación  $a/b$  utilizada y la concentración de la sustitución de cenizas de lodo de TAR por cemento.

**Table 5**

*Resistencia a la compresión de mezclas de hormigón con cenizas de lodos de TAR.*

Mezcla	a/b	Fuerza de Compresión (Mpa)		Mezcla de cenizas de lodos	
		Tiempo (días)			
		7	28	7	28
REF	0,35	49,5	54,7	100	100
	0,50	34,8	40,7	100	100
	0,65	25,4	28,8	100	100
5RCE	0,35	46,4	56,5	1,03	1,03
	0,50	34,7	43,5	1,07	1,07
	0,65	28,4	34,5	1,20	1,20
10RCE	0,35	54,8	66,5	1,21	1,22
	0,50	35	44,0	1,08	1,08
	0,65	29,4	36	1,25	1,25
15RCE	0,35	55,8	67	1,22	1,22
	0,50	35,3	48,5	1,19	1,19
	0,65	28	35,5	1,23	1,23
20RCE	0,35	55,8	67	1,22	1,22
	0,50	35,3	48,5	1,19	1,19
	0,65	28	35,5	1,23	1,23
25RCE	0,35	54,5	71	1,30	1,30
	0,50	41,3	47,8	1,17	1,17
	0,65	29	33,3	1,16	1,16
30RCE	0,35	53,5	65,3	1,19	1,19
	0,50	38,5	46,3	1,14	1,14
	0,65	27,2	33	1,14	1,14



a / b - relación agua / cemento (aglutinante)

A partir de los pares de valores de resistencia a la compresión a los 28 días y las relaciones a / b, los coeficientes de la ecuación fueron calculado para todas las mezclas en el estudio (Tabla 6).

De esta manera, se calcularon las relaciones a / b para las mezclas con cenizas de lodo de TAR requeridas para obtener el mismo valor de resistencia a la compresión que la mezcla de referencia a los 28 días. Estos fueron etiquetados (w / b'). De los pares de valores 'consumo de aglutinante' y 'resistencia a la compresión', los coeficientes de la ecuación  $C = D / ECs$  se calcularon para todas las mezclas en este estudio.

De esta forma, el consumo de aglutinante de las mezclas con cenizas de lodos de depuradora requerido para obtener el mismo valor de resistencia a la compresión como mezcla de referencia a los 28 días - Se calcularon 54-7, 40-7 y 28-8 MPa.

Estos se identificaron como 'Consumo de materiales cementosos'. A partir de este valor, el cemento Portland y los consumos de cenizas de lodos se calcularon con referencia al contenido de sustitución de cemento.

En la mezcla con 5% de ceniza de lodo TAR, se requieren 468 kg de ligante para obtener un valor de resistencia a la compresión de 54.7 MPa. Este peso se desglosa de la siguiente manera: 445 kg de cemento ( $0.95 * 468$ ) y 23 kg de cenizas de lodo ( $0.05 * 468$ ).

Para obtener la misma resistencia en la muestra de referencia, se necesitan 485 kg de cemento. Por lo tanto, los 23 kg de cenizas de lodos de depuradora equivalen a 42 kg de cemento ( $487-445$  kg).

Por lo tanto, a partir de los datos obtenidos, fue posible establecer la reducción del consumo de cemento Portland en las mezclas de hormigón preparadas con diferentes concentraciones de cenizas de lodo TAR para obtener la misma resistencia que el hormigón de referencia. Constituye la parte más relevante de la investigación desarrollada, ya que se constatan los resultados obtenidos, en referencia a otros autores.

## 5. Conclusiones

El análisis de los resultados de la determinación de la actividad puzolánica con cemento Portland muestra que incluso a la temperatura de calcinación más baja ensayada (400° C), los valores obtenidos son similares a los de la mezcla de referencia.

El índice de actividad puzolánica óptimo se obtuvo con una temperatura de calcinación de 700°C durante 30 minutos. Sin embargo, este valor es solo un 3.5% superior al valor obtenido con una temperatura de calcinación de 600° C durante 1hora, lo que



**Table 6**

Ecuaciones de coeficientes  $C = D / E^{C_s}$  y  $C_s = A / B^{w/b}$ .

Mezcla	w/b	Materiales Cementosos		Fuerza Compresión 28 días (Mpa)	
<b>REF</b>	0,35	487	-	54,7	$R^2=1$
	0,50	359		40,7	$C_s = \frac{116,6864}{8,513456^{w/b}}$
0,65	284		28,8		<b>5RCE</b>
0,35	487	$R^2=0,98$	56,5	$R^2=0,99$	
0,50	359	$C_s = \frac{122,87906}{0,97586^{C_s}} = C_s = \frac{126,2019}{5,1772^{w/b}}$	43,5	0,65	284
	34,5		<b>10RCE</b>	0,35	487
$R^2=0,97$	66,5	$R^2=0,96$	0,65	0,50	359
$C_s = \frac{161,9419}{0,9833^{C_s}} = C_s = \frac{131,3381}{7,7339^{w/b}}$	44		284		
36		<b>15RCE</b>	0,35	487	$R^2=0,98$
67	$R^2=0,99$		0,50	359	$C_s = \frac{155,6019}{0,9831^{C_s}} = 48,5$
$C_s = \frac{140,3112}{8,3078^{w/b}}$		0,65	284		35,5
	<b>20RCE</b>	0,35	487	$R^2=0,96$	69
$R^2=0,98$		0,50	359	$C_s = \frac{180,2122}{0,9856^{C_s}} = C_s = \frac{165,6965}{12,6201^{w/b}}$	45,6
	0,65	284		32,3	
<b>25RCE</b>	0,35	487	$R^2=0,97$	71	$R^2=0,99$
	0,50	359	$C_s = \frac{178,9445}{0,9859^{C_s}} = 47,8$	$C_s = \frac{167,7014}{11,9293^{w/b}}$	
0,65	284		33,3		<b>30RCE</b>
0,35	487	$R^2=0,99$	65,3	$R^2=0,99$	
0,50	359	$C_s = \frac{164,7168}{0,9834^{C_s}} = C_s = \frac{144,7362}{9,7423^{w/b}}$	46,3		0,65
284		33			

requiere menos energía. Como resultado, usar una temperatura de 700 °C no sería económico.

La concentración de caolinita (% - peso seco) fue 37%, que está por debajo del nivel mínimo deseado para arcillas calcinadas (50%). La cantidad de cuarzo asociado debe ser baja, lo que no es el caso de este material.

Para idénticas proporciones a / b, las mezclas de concreto preparadas con ceniza de lodo de TAR mostraron incrementos en la resistencia que van del 3% al 30%, dependiendo de la proporción a / b y la concentración de

sustitución utilizada. El hecho de que la resistencia mejorada ya esté presente después de 7 días significa que el flujo de operaciones en los sitios de construcción no se ve afectado.



Se puede obtener el mismo nivel de resistencia a la compresión observado en el hormigón de referencia con reducciones en el consumo de cemento que oscilan entre 37 y 200 kg de cemento por m<sup>3</sup> de hormigón. La cantidad depende del nivel de resistencia requerido y de la concentración de cenizas de lodo TAR utilizadas

## 6. Agradecimientos

Los autores desean agradecer a los siguientes por su apoyo:

Union Cementera UCEM Planta Chimborazo y Planta de Tratamiento de Agua Ambato por su apoyo tecnico de investigación inicial.

## 7. CONFLICTO DE INTERESES

Se declara no tener conflicto de intereses.

## References

- [1] Gálvez A, Conesa JA, Martín I, Font R. Interacción entre pululantes producidos en la combustión de lodos de depuradora y materia prima de cemento. 2007. *Chemosphere* p. 387 - 394.
- [2] Álvarez GL, Nazari A., Bagheri A, Sanjayan JG, De Lange, C. Microestructura, Propiedades eléctricas y mecánicas de los morteros de cemento reforzado con fibras de acero con adición parcial de metacaolín y caliza. *Constr. Construir.* 2017. p. 8 - 20.
- [3] Chakchouk A, Trifi L, Samet B, Bouaziz S. Formulación de cemento mezclado: efecto de las variables del proceso sobre la actividad puzolánica de la arcilla. *Construir.* 2009. p. 1365 -373.
- [4] Boesch ME, Hellweg S, Huijbregts M, Frischknecht R. Applying cumuindicadores de demanda de energía lativa (CExD) a la base de datos de ecoinvent. En t. J. Evaluación del ciclo de vida. 2007. 190 p.
- [5] Tironi A. Evaluación de la actividad puzolánica de diferentes arcillas calcinadas, *.Cement Concr.* 2013. p. 319–327.
- [6] Cenni R, Janisch B, Spliethoff H, Hein K. Cuestiones legislativas y medioambientales sobre el uso de cenizas de carbón y cocombustión de lodos de depuradora municipal como material de construcción. *Waste Manage.* 2000. p. 17–31



- [7] Dirk Hansjörg L. Combustibles alternativos para hornos rotatorios en la producción de clínker. RETEMA revista técnica de Medio Ambiente. 2017,p.40-45
- [8] Instituto Ecuatoriano de Normalización. Cemento Hidráulico Definición de Términos. Quito: INEN. 2010.
- [9] Lafferriere R. El Mecanismo de Desarrollo Limpio del protocolo de Kyoto. Buenos Aires: Lulu.com. 2008.
- [10] Alfaro T, Laura L. Estudio comparativo para la sustitución de un cemento portland tipo V entre un cemento puzolánico con especificaciones de la performance tipo HS en la fábrica de cemento Yura S.A. Universidad Nacional San Agustín. 2014. p. 45-47.
- [11] Antoni M, Rossen J, Scrivener K. Investigación de la sustitución del cemento mediante la adición combinada de arcillas calcinadas y piedra caliza. En: XIII Congreso Internacional de Química del Cemento, Madrid, 2011. 96 p.
- [12] Guzmán A, Camargo L, Álvarez YA. Aprovechamiento de lodos de una PTAP en la elaboración de morteros y concretos. En: XII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y XIV Congreso de Control de Calidad en la Construcción. 2011. p. 637–644.
- [13] Lara R et al., Estudio de la adición de arcillas calcinadas en la durabilidad de hormigones, 2011. Revista Ingeniería de Construcción p. 25–40.
- [14] Lübeck A, Gastaldini ALG, Barin DS, Siqueira HC. Resistencia a la compresión y propiedades eléctricas del hormigón con cemento Portland blanco y escoria de alto horno, Cement Concr. 2012. p. 392–399.
- [15] Martirena JF, Fernandez R, Alujas A, Castillo R, Scrivener K. Producción de arcillas activadas para materiales de construcción de bajo costo en países en desarrollo. En: XIII Congreso Internacional ICCO de Química del Cemento, Madrid.2011. p.95.
- [16] Rukzon S, Chindapasirt P. Utilización de ceniza de bagazo en hormigón de alta resistencia. En : LXI Congreso Brasileño de Concreto 2012. p. 45–50.
- [17] Steenberg M, Herfort D, Poulsen SL, Skibsted J, Damtoft JS. Cemento compuesto a base de clínker de cemento Portland, piedra caliza y arcilla calcinada. En: XIII Congreso Internacional de Química del Cemento, Madrid. 2011. p. 97.