

Estudio del uso del lodo residual de la empresa Extralum S. A. como material alternativo en la fabricación de cementos especiales

Maricruz Vargas Camareno¹
Mavis L. Montero Villalobos²

Considerando que el cemento es un producto con demanda creciente, que para su producción requiere altos consumos de energía, cualquier avance que se realice para disminuir el consumo energético, tiene importantes beneficios económicos y ambientales.

Palabras clave

Lodo residual, alúmina, cemento modificado.

Resumen

La empresa Extralum S. A. es una industria dedicada a la manufactura de aluminio crudo, anodizado y laqueado para uso arquitectónico. En su proceso de tratamiento de aguas residuales, genera alrededor de 90 toneladas al mes de un sólido blanco, el cual ya ha sido caracterizado, y se encontró que es rico en óxidos de aluminio hidratados; en la actualidad este material es desechado en rellenos sanitarios.

Considerando que el cemento es un producto con demanda creciente, que para su producción requiere altos consumos de energía, cualquier avance que se realice para disminuir el consumo energético,

tiene importantes beneficios económicos y ambientales. Dentro de las soluciones posibles, se encuentra la utilización de materiales alternativos que pueden ser utilizados como materias primas o materiales cementosos de reemplazo parcial o total del cemento Pórtland.

Las pruebas realizadas a las diferentes mezclas demuestran que el lodo incorporado al cemento como relleno, modifica sus características iniciales, acelerando los tiempos de fragua, aumentando la porosidad del material, condición que afectó, negativamente, la resistencia del cemento, pero aumentó su capacidad aislante.

Introducción

El crecimiento industrial en las últimas décadas ha incrementado la capacidad productiva de nuestro país, pero, paralelo a este desarrollo, se ha generado un

1. Investigadora del Centro de Investigación en Protección Ambiental. (CIPA). Escuela de Química. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
Correo electrónico: mvargas@itcr.ac.cr
2. Escuela de Química. Investigadora del Centro de Investigación en Ciencia e Ingeniería de Materiales. Universidad de Costa Rica.
Correo electrónico: mmontero@equi.ucr.ac.cr

aumentado de los residuos industriales, que se constituyen en algunos casos en un serio problema de importante impacto ambiental y de salud pública.

Dentro de los residuos que se generan, encontramos los lodos industriales provenientes de los sistemas de tratamiento de aguas, los cuales se encuentran distribuidos en distintos sectores productivos; sus constituyentes son muy diversos dados los distintos tipos de industrias presentes, desde la industria alimentaria hasta la industria química y farmacéutica.

Según un estudio en este campo, se logró identificar un total de 43.800 ton/año de lodos industriales de distintos sectores industriales de nuestro país, distribuidos en una muestra de 80 empresas en la Gran Área Metropolitana¹; aunque existen algunas iniciativas de acopio, recolección y transporte de este tipo de residuo, en algunos casos los lodos industriales no son tratados convenientemente en la fuente de generación, no reciben un tratamiento o disposición adecuada y muchos terminan en los rellenos, botaderos municipales o en vertederos clandestinos.²

Es por ello que la reducción, la reutilización, el reciclaje, el coprocesamiento, son algunas de las oportunidades apropiadas para la gestión ambiental de los residuos, que las industrias pueden utilizar ya que no solamente solucionan un problema de disposición y de impacto negativo al ambiente, sino que convierten algunos residuos en productos con valor económico.^{3, 4, 5}

Por otra parte, la competitividad actual obliga a los sectores productivos no solo a optimizar sus procesos, sino, también, a ver la posibilidad de obtener el máximo aprovechamiento de los recursos, y parte de esto consiste en tratar de darle un valor agregado a los residuos de sus empresas para que estos, en lugar de convertirse en un problema como hasta hora lo son en la

mayoría de las empresas, se constituyan en una fuente de ingresos y aumenten el valor agregado de sus actividades industriales.

Este tipo de iniciativas tienen efectos muy positivos, ya que si estos residuos no van a los botaderos o rellenos, se aumenta la vida útil de estos espacios, que, por sus características tan particulares, tienen un costo alto a la hora de establecerlos; adicionalmente, se contribuye a conservar un ambiente más limpio.

Uno de los sectores importantes en la generación de lodos residuales son las industrias químicas; sus lodos se caracterizan, en su mayoría, por un alto contenido de humedad, metales pesados, compuestos orgánicos, entre otros.¹

Dentro de este sector se encuentra la empresa Extralum S.A., ubicada en Tejar de El Guarco, Cartago, dedicada a la manufactura de aluminio crudo, anodizado y laqueado para uso arquitectónico.⁴

En su proceso de anodinado, las piezas de aluminio inicialmente son sometidas a una *limpieza alcalina* o *enjuague*, con el objetivo de eliminar residuos de aceites, grasas, polvo y suciedad en general, adheridas a estas por la manipulación propia del proceso. A este proceso se le llama *decapado* y durante esta parte del aluminio se disuelve en el medio básico. Al mezclar las aguas básicas y ácidas provenientes de estos procesos para neutralizarlas, se produce un precipitado, el cual se pasa a través de un filtro prensa, generando un lodo blanco.⁴

La empresa produce alrededor de 90 toneladas al mes de este material, el cual ya ha sido caracterizado y se ha encontrado que es rico en óxidos de aluminio hidratados.^{4, 6}

En la actualidad, este lodo se desecha en los rellenos sanitarios municipales, el costo por el transporte y disposición de los lodos tiene un valor promedio de \$1.100/mes.⁷

Dentro de los residuos que se generan, encontramos los lodos industriales provenientes de los sistemas de tratamiento de aguas, los cuales se encuentran distribuidos en distintos sectores productivos; sus constituyentes son muy diversos dados los distintos tipos de industrias presentes, desde la industria alimentaria hasta la industria química y farmacéutica.

Sobre los cementos de mayor consumo, se encuentran el "UG" o de uso general, seguido del "MP-AR", que básicamente es un cemento de alta resistencia inicial con moderada resistencia a los sulfatos y moderado calor de hidratación.^{11, 13}

Esta fuente de óxido de aluminio se ha estudiado como materia prima en la producción de zeolitas, sulfato de aluminio, como aditivo de asfaltos; actualmente, se realizan estudios para su uso en la fabricación de ladrillos refractarios y como aditivo en pinturas.^{4, 6}

Esta investigación se centra en el uso de este lodo como material alternativo para la fabricación de cementos especiales.

El cemento es un material de construcción que ha sido utilizado por más de 2.000 años en algunas de sus formas. En general, se distinguen dos tipos de cementos: naturales y artificiales. Los primeros se obtienen de materiales naturales, lleva un proceso sencillo de fabricación y su composición depende de las zonas de obtención de materias primas.

Actualmente, los más utilizados son los cementos artificiales, de los que existe un considerable número de ellos, el más importante y de mayor utilización es el cemento *Pórtland*, que fue el primer cemento moderno fabricado por Joseph Aspdin, en Gran Bretaña, alrededor de 1825.⁸

El cemento *Pórtland* consiste en un polvo fino, usualmente de color gris, compuesto, primordialmente, por óxidos de calcio, silicio, aluminio y hierro. Las fases presentes comprenden principalmente silicatos de calcio (3CaOSiO_2 y 2CaOSiO_2) y en menor proporción aluminato de calcio ($3 \text{CaOAl}_2\text{O}_3$) y ferroaluminato de calcio ($4 \text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$).⁹

La producción del cemento es un proceso de alta demanda energética de combustibles ($\approx 4000 \text{ kJ/kg}$ cemento, 25% de pérdidas) y con alta emisión de contaminantes ($0,85\text{-}1 \text{ kg CO}_2/\text{kg}$ cemento) por descarbonatación de materias prima y uso de combustibles.¹⁰

La producción mundial de cemento es aproximadamente 1.500 millones de toneladas al año¹¹, (año 2002), cantidad que aumenta por la demanda del crecimiento de la población que cada vez requiere de

más infraestructura para asentamientos humanos, actividades productivas, etc.

Considerando que el cemento es un producto con demanda creciente y para su producción se requiere de altos consumos de energía, cualquier avance cuyo fin sea disminuir el consumo energético tiene importantes beneficios económicos y ambientales.

En relación con las soluciones posibles, se pueden citar el uso de combustibles más económicos en donde algunos residuos pueden actuar como combustibles alternativos; por ejemplo, aceites usados, disolventes residuales de la industria y plásticos, entre otros^{5, 12}, y la utilización de materiales alternativos que pueden ser utilizados como materias primas o materiales cementosos de reemplazo parcial o total del cemento *Pórtland*¹⁰. Un material de relleno alternativo se define como aquel que tenga propiedades cementosas *per se* o latentes (que requieren ser potenciadas externamente), el cual pueda emplearse como sustituto parcial o total del cemento *Pórtland*.

Entre las características que debe tener un material de reemplazo del cemento, *Pórtland* es un estado estructural amorfo; esto es, con alta energía interna; por lo tanto, es inestable termodinámicamente y muy reactivo químicamente. Existe una gran cantidad de materiales que pueden utilizarse: materiales puzolánicos e hidráulicos; existen otras fuentes por ejemplo; el yeso proveniente de la industria cerámica tradicional, lodos de drenaje y lodos de producción de aluminio.¹⁰

Sobre los cementos de mayor consumo, se encuentran el "UG" o de uso general, seguido del "MP-AR", que básicamente es un cemento de alta resistencia inicial con moderada resistencia a los sulfatos y moderado calor de hidratación.^{11, 13}

En cuanto a los cementos especiales en Costa Rica, su desarrollo se ha visto afectado por el tamaño del mercado y por

La empresa Extralum S.A, consciente del gasto asociado a su proceso de tratamiento de aguas, el costo del transporte, disposición de los residuos, inició un programa de minimización de residuos y estudios de reutilización.

la alta demanda energética que implica la fabricación de diferentes tipos de *clinker*.

Sin embargo, el uso de diferentes tipos de rellenos incorporados al *clinker* en el proceso de molienda se ha convertido en una importante práctica para la fabricación de cementos con propiedades particulares, de acuerdo con las características cementosas del material en el cemento y la legislación vigente puede haber sustituciones de *clinker* desde 5% hasta un 90%.¹⁰

Otra forma de darle características especiales al cemento es por medio de la adición de aditivos, pero estos, a diferencia de los rellenos, se incorporan al momento de hacer la pasta de cemento, ya sea agregando estos directamente a la pasta o al agua que se va a utilizar. Las proporciones del material que se utilizan como aditivo generalmente no superan el 5% en peso.¹¹

Dependiendo de las características del material de reemplazo y de su proporción en el cemento *Pórtland*, se obtiene cementos con diferentes propiedades en cuanto a resistencia mecánica, resistencia térmica, tiempo de fraguado, trabajabilidad, dando origen al desarrollo de cementos especiales.

La empresa Extralum S.A, consciente del gasto asociado a su proceso de tratamiento de aguas, el costo del transporte, disposición de los residuos, inició un programa de minimización de residuos y estudios de reutilización.^{4, 6}

El objetivo general de este trabajo de investigación fue estudiar el lodo residual de la Empresa Extralum S.A., como material alternativo para la fabricación de cementos especiales, mediante uso como relleno. Esta posibilidad podría constituirse en una buena alternativa para el consumo de todos los lodos residuales producidos por Extralum S.A., ya que en Costa Rica el cemento es un tipo de material que tiene gran demanda y se manejan grandes volúmenes. En nuestro

país se consume, aproximadamente, 1,2 millones de toneladas anuales.¹¹

Parte experimental

Preparación de la muestra: Para el trabajo de investigación, se utilizó, aproximadamente, 400 kilogramos de lodos residuales húmedos (aprox. 80% de humedad); se llevaron a sequedad en estufa a 110 °C por 24 horas, tiempo suficiente para eliminar el agua de hidratación.

Se obtuvo alrededor de 85 kilogramos de material seco, el cual se molió en un molino de martillos, marca Sanchi Industrial, con malla de 5 mm; posteriormente, se tamizó con un tamizador eléctrico utilizando una malla N.º 100 (150 µm); se logró obtener alrededor de 35 kilogramos de material. Se obtuvo un traslapo en tamaños de partícula que oscilan entre los 1,5 µm y 90 µm, con lo que el lodo podría tener un tamaño similar a un cemento grueso. Las determinaciones del tamaño de partícula se realizaron en un equipo de análisis de tamaño de partículas láser marca Cilas Modelo 920.

Se preparó además una muestra de granulometría denominada gruesa, en donde aproximadamente el 67% de la masa retenida corresponde a tamaños entre 425 y 150 micrómetros. El contenido final en la muestra de lodo de aluminio expresado como Al₂O₃ fue de (47,63 ± 0,04) % m/m y de sulfatos (4,27 ± 0,02) % m/m.

Preparación de los cementos modificados

Se prepararon mezclas "cementantes", modificadas con lodo de acuerdo con el cuadro 1.

Pruebas físicas: El estudio de las propiedades del cemento tanto fresco como endurecido es muy importante, ya que estas determinarán el manejo y los usos potenciales que puede presentar un material para fines constructivos.

Cuadro 1. Proporciones de cemento/lodo para el estudio del comportamiento del material

Mezcla	% de cemento	% de lodo	% Al ₂ O ₃ (*)
1	100	0	4,14
2	75	25	15,01
3	50	50	25,89
4	25	75	36,75

(*) Cálculo con base en el dato reportado por la empresa HOLCIM para el cemento de uso general y el análisis de aluminio del lodo de trabajo.

Las pruebas realizadas a las diferentes mezclas demuestran que el lodo incorporado al cemento modifica sus características iniciales, al acelerar los tiempos de fragua, aumentan la porosidad del material, condición que afectó negativamente la resistencia del cemento, pero aumentó su capacidad aislante.

Entre las propiedades físicas más importantes que se le debe determinar a un cemento se encuentran: la trabajabilidad, consistencia normal, tiempo de fragua y resistencia mecánica.

Para todas las pruebas físicas realizadas a las mezclas, se cumplieron con las siguientes normas generales: la norma ASTM-C-305-99¹⁴ para el proceso de mezclado y la norma ASTM-C-778-00¹⁵ para las especificaciones de la arena estándar utilizada en las pruebas de morteros.

Estudio de la porosidad y conductividad térmica del cemento modificado

Se prepararon mezclas según las proporciones del cuadro 1, pero utilizando lodo en dos granulometrías: fino y grueso, con el fin de observar diferencias, especialmente en la porosidad con las distintas granulometrías. Las mezclas se realizaron manteniendo los tiempos y velocidades de mezclado establecido por las normas ASTM C-109-99¹⁶ para morteros. La mezcla 2 no fue apta para estas pruebas ya que una vez seco el material perdía cohesión y se fracturaba fácilmente.

La prueba de porosidad se realizó mediante la sumersión en agua por 24 horas de los especímenes, midiendo luego la masa de

la pieza en base seca y húmeda. Todas las medidas fueron realizadas por triplicado.

Se valoró la conductividad térmica del material lodo-cemento, mediante un método basado en la medición del flujo de calor a través de varios materiales y la aplicación de la ecuación de Fourier¹⁷. Se prepararon tres placas de material, con la siguiente composición: cemento 100%, 50% lodo fino - 50% cemento, 50% lodo grueso - 50% cemento. Se siguió el procedimiento descrito por Vásquez¹⁸, en donde se utilizó un equipo que consiste de una plantilla de calentamiento como fuente de calor, sobre las cuales se dispone una serie de placas de materiales en el siguiente orden: cobre, aluminio, material (k desconocida), aluminio, baño de agua. Se colocaron termopares entre cada una de las placas, para determinar los cambios de temperatura en el proceso de transferencia de calor. Se encendió el calentador al mínimo (aprox. 250 W), se tomaron lecturas con un potenciómetro digital (marca Termocupla Temp. JKT, Acorn Series) hasta alcanzar el estado estacionario.

Resultados y discusión

Las pruebas realizadas a las diferentes mezclas demuestran que el lodo incorporado al cemento modifica sus características iniciales, al acelerar los tiempos de fragua, aumentan la porosidad del material, condición que afectó negativamente la resistencia del cemento, pero aumentó su capacidad aislante.

En el cuadro 2, se observa que la adición de lodo al cemento muestra cambios drásticos en los tiempos de fraguado, en las mezclas 2 y 3 actúa como un acelerador, en donde hay reducciones importantes tanto para la fragua inicial como para la fragua final. Para la mezcla 4, se invierte el comportamiento del material, en donde se incrementan, significativamente, los tiempos de fragua inicial y final. Estos resultados van a ser importantes al realizar las pruebas

Cuadro 2. Tiempos de fragua para diferentes tipos de mezclas

Tipo de mezcla	Tiempo de fraguado	
	Fraguado inicial minutos	Fraguado final minutos
1 Patrón 100% cemento	195	296
2 25% lodo 75% cemento	10	32
3 50% lodo 50% cemento	26	59
4 75% lodo 25% cemento	393	553

Cuadro 3. Resistencia a la compresión de cubos, con diferentes proporciones de lodo a flujo constante (110 ± 5 %) y curado a 7 días

Mezcla	% agua	Resistencia	
		Mpa	Kg/cm ²
Mezcla1 (patrón)	57	17,4	176,9
Mezcla 2	94	0,8	8,0
Mezcla 3	111	2,9	30
Mezcla 4	122,6	0,9	9,6

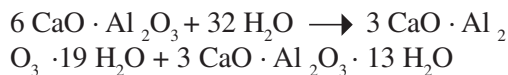
Cuadro 4. Resistencia a la compresión de cubos, con diferentes proporciones de lodo a flujo constante (110 ± 5 %) y curado 28 días

% mezcla	% agua	Resistencia	
		Mpa	Kg/cm ²
Patrón	94	12,4	126
Mezcla 2		0,8	8,4
Patrón	111	8,3	84,7
Mezcla 3		3,1	31,2
Patrón	122,6	7,7	78,1
Mezcla 4		1,1	11,6

siguientes ya que la velocidad de fraguado afecta la resistencia del cemento.

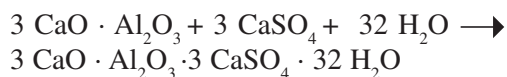
Para mantener una trabajabilidad adecuada se determinó la resistencia a la compresión de los morteros a flujo constante de $(110 \pm 5) \%$ (cuadros 3 y 4). Para el caso de especímenes curados por 7 días, se observa que la resistencia disminuye con la adición de lodo; solamente la mezcla 3 (50% lodo-50% cemento), muestra un ligero incremento en la resistencia; sin embargo, está muy por debajo del resultado de la muestra patrón. La resistencia a la compresión de las diferentes mezclas presenta un comportamiento similar tanto en muestras de 7 y 28 días, lo cual indica que no existe un aumento significativo en la resistencia del mortero conforme se incrementa el tiempo; por lo tanto, entre estos dos tiempos de curado a 7 días se ha desarrollado la máxima capacidad de resistencia de los materiales.

Esta situación se genera probablemente debido a que la nueva formulación con los óxidos hidratados de aluminio, no contiene la suficiente cantidad de $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$ para inhibir la siguiente reacción¹⁹:



Sin sulfato de calcio, el aluminato de calcio reacciona con el agua directamente a aluminato de calcio hidratado, llenando los espacios entre las partículas de cemento con cristales grandes, generando una falsa pero muy rápida solidificación de la pasta de cemento, no permitiendo ello la hidratación del silicato tricálcico y silicato dicálcico, los cuales son los responsables del desarrollo de la resistencia del cemento *Pórtland*.¹⁹

Con suficiente sulfato de calcio, se da la siguiente reacción¹⁹:



Esta reacción permite que se formen cristales de estringita, los cuales son tan finos inicialmente que estos no pueden construir espacios entre las partículas de cemento, y no posibilita que se forme una estructura sólida. Por esta reacción se da la demora en la solidificación del cemento.¹⁹

Normalmente, un cemento *Pórtland* solidifica después de 1 a 3 horas, periodo en el cual las finas agujas de cristales de estringita recrystalizan en forma de agujas más largas, en la cual enlazan las partículas de cemento.

En el caso particular de las mezclas lodo cemento, posiblemente el CaO del cemento reaccionó con los óxidos de aluminio hidratados aportado por el lodo, generando así más $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ hidratado, lo cual también inhibió la hidratación del silicato tricálcico y silicato dicálcico.

Por lo tanto, la carencia de sulfato de calcio propició el fraguado rápido de las mezclas por la formación directa a aluminatos de calcio hidratado, reacción que fue también favorecida al suministrarse una mayor cantidad de óxido de aluminio.

La baja resistencia está asociada entonces, en el caso de las mezclas 2 y 3, con el rápido fraguado y la generación de aluminato de calcio hidratado, que son frágiles y a su vez no permiten la generación de estringita, principal causante del endurecimiento del cemento.

La mezcla 3 presenta un mayor tiempo de fragua que permite más tiempo a la reacción, por lo cual se logra una mejor resistencia, aunque no muy significativa para fines constructivos.

Para el caso de la mezcla 4, aunque se presentó un mayor tiempo de fraguado, no se generó una resistencia adecuada del material, por lo que se demuestra la baja capacidad "cementante" del lodo bajo las condiciones de trabajo.

Otro factor importante que afectó la resistencia de las mezclas fue la cantidad de

Normalmente, un cemento Pórtland solidifica después de 1 a 3 horas, periodo en el cual las finas agujas de cristales de estringita recrystalizan en forma de agujas más largas, en la cual enlazan las partículas de cemento.

agua utilizado en las mezclas, ya que existe una relación inversamente proporcional entre la cantidad de agua y la resistencia del cemento.

Conforme se incrementó la cantidad de lodo, aumentó la demanda de agua en las mezclas, lo cual produjo una mayor captación de aire, generando un aumento de porosidad, lo que se convierte en puntos de falla y reduce la resistencia de las mezclas.²⁰

Al buscar otros usos potenciales del cemento modificado con la alúmina hidratada distinto al constructivo, se formuló la pregunta de cuál sería su comportamiento térmico y aislante. Una de las primeras observaciones es la ligereza de las piezas como cubos y briquetas fabricados y su aparente alta porosidad. Para conocer mejor estas propiedades, se midió la porosidad la conductividad térmica de algunas muestras.

Las mezclas lodo-cemento sin arena presentan mucho mayor absorción de agua

que las mezclas preparadas con arena, lo que significa mayor porosidad del material.

Por otra parte, conforme se aumenta la cantidad de lodo en la mezcla, aumenta la absorción de agua, lo que implica un aumento en la porosidad del material lodo-cemento.

El aumento en la granulometría del lodo también incrementa la capacidad de absorción de agua, ya que genera un material con mayor diámetro de poro. Este efecto es bastante evidente en la mezcla al 75% de lodo grueso, que absorbe un porcentaje de agua equivalente al del peso del material seco, como se muestra en la figura 1.

Según los resultados del cuadro 5, se puede determinar que los cementos modificados, presentan menores conductividades y densidades que el cemento de uso general, lo cual tiene congruente con el resultado de porosidad determinado en pruebas anteriores (figura 1), en donde los cementos modificados presentan mayores porosidades.

Al buscar otros usos potenciales del cemento modificado con la alúmina hidratada distinto al constructivo, se formuló la pregunta de cuál sería su comportamiento térmico y aislante.

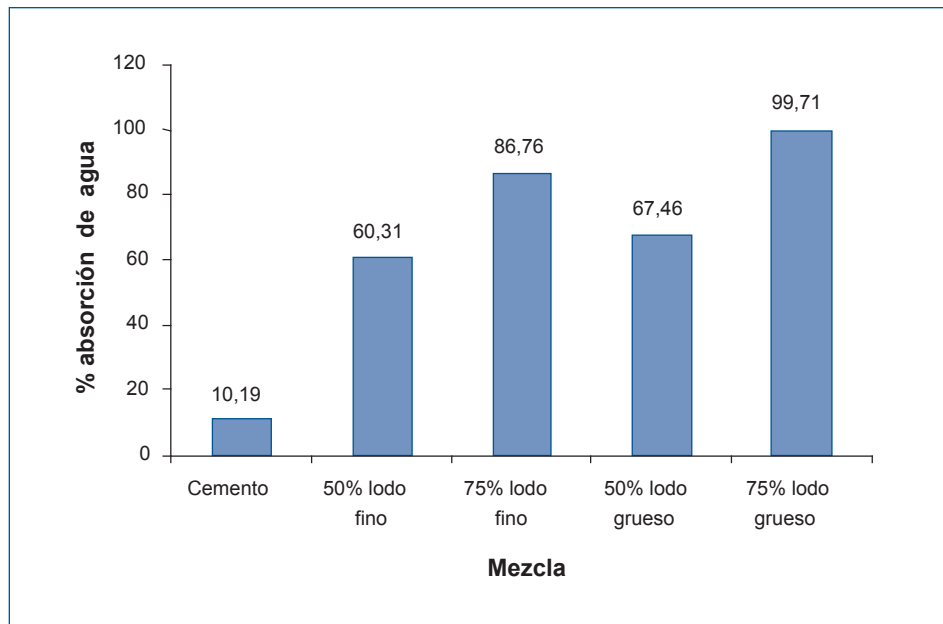


Figura 1. Absorción de agua en mezclas cemento –lodo sin arena

Cuadro 5. Conductividades térmicas del cemento modificado y cemento de uso general

Material	Densidad (g/cm ³)	Conductividad térmica (k)j/sm °C
Asbesto	1,34	26,5
100% Cemento	2,00	41,2
50% Lodo fino-50% cemento	1,26	25,87
50% Lodo grueso-50% cemento	1,19	22,89

Los poros en el material generan pequeños espacios llenos de aire, que actúan como cámaras aislantes, reduciendo la masa del material y capacidad de transferencia de calor de un material. Sobre los resultados experimentales, el cemento modificado presenta conductividades térmicas muy cercanas al asbesto, lo cual lo convierte en un material interesante para el desarrollo de aislantes para fines constructivos.

Conclusiones

- Se prepararon mezclas lodo-cemento con porcentajes de alúmina superiores a los encontrados en el cemento convencional, empleando entonces el lodo como material de reemplazo del cemento.
- Conforme se incrementa la proporción de lodo en las mezclas, se incrementa notablemente el consumo de agua al trabajar a un flujo constante (110±5%). Este comportamiento del lodo afecta negativamente las resistencias desarrolladas por los morteros, ya que los incrementos de agua reducen las resistencias de los materiales.
- Las pruebas realizadas a las diferentes mezclas demuestra que el lodo incorporado al cemento modifica las características iniciales del cemento,

acelerando los tiempos de fragua y reduciendo la resistencia del material.

- El lodo tiene un efecto acelerante del tiempo de fragua en las mezclas 2 y 3; para el caso de la mezcla 4 no se observa el efecto contrario.
- Las resistencias de los morteros caen significativamente, lo cual tiene relación con la proporción de agua en las mezclas y los tiempos de fragua. Sin embargo; en las pruebas tanto de compresión y tensión se observa un comportamiento no lineal, en donde el mejor resultado se logra con la mezcla 3.
- Las bajas resistencias desarrolladas por las diferentes mezclas indican que el material no puede utilizarse para fines estructurales.
- La porosidad aumenta significativamente en el cemento modificado.
- Las piezas con cemento modificado son mucho más ligeras que el cemento de uso normal.
- El cemento modificado presenta una menor conductividad térmica, en comparación con el cemento de uso general, lo que lo convierte en un mejor aislante.

Bibliografía

1. Araya, W. *Reporte Nacional de Manejo de Materiales*. PROARCA USAID CNP+ Costa Rica. 2002.
2. Acuerdo bilateral de Desarrollo Sostenible Costa Rica-Holanda. *Manejo de Desechos Sólidos y Peligrosos*, Costa Rica. 1994.
3. Bravo, M. *Minimización de Residuos*. Seminario Internacional CYTED, Costa Rica, 1999.
4. Carranza, C. *Alternativas para la Reducción y Aprovechamiento de los Lodos Residuales de Extralum S.A*, Tesis, Universidad de Costa Rica, 2002.
5. Ecocim. *Co-procesamiento de residuos industriales*. Costa Rica, 2005.

6. Carranza, C. Montero, M. Tecnología en Marcha, ITCR, 2002, Vol 15, N.º 3, p. 53.
7. Información suministrada por el Sr. Carlos Carranza.
8. Eart, G.; Davis, H.; Kelly, J. Composition and Properties of Concrete. 2nd ed. McGraw-Hill: New York, 1968.
9. Bhatti, J. "Role of Minor Elements in Cement Manufacture and Use", Research and Development Bulletin RD 109T, Portland Cement Association, Skokie: Illinois, U.S.A, 1995.
10. Escalante, J. Avance y Perspectiva, 2002, Vol 21, pp. 79-87.
11. Información suministrada por el Instituto Costarricense del Cemento y del Concreto. San José. Costa Rica, 2005.
12. Rossi, F. Ing. Cienc. Quím. 2004. Vol 21, N.º 1-2, 56-58.
13. "Reglamento Técnico RTCR383:2004 Cementos Hidráulicos. Especificaciones". Diario Oficial La Gaceta: Costa Rica. N.º 49. Jueves 10 de marzo del 2005.
14. ASTM. "Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency". C 305-99
15. ASTM. "Standard Specification for Standard Sand". C778-00
16. ASTM. "Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (using 2 in. 50mm cube specimens)". C109-99.
17. Incropera, Frank; De Witt, D. *Fundamentos de Transferencia de Calor*. 4.ª ed. Prentice Hall: México, 1999.
18. Vásquez, Álvaro. *Diseño de un Laboratorio para la medición de la Conductividad Térmica y la Capacidad Calorífica*. Tesis, Universidad de Costa Rica. 1989.
19. Büchnor, W.; Schliebs, R.; Winter, G.; Büchel, KH. *Industrial Inorganic Chemistry*. Editorial VCH: Alemania, 1989.
20. Neville, A. *Tecnología del Concreto*. Tomo II. Editorial Limusa.S.A.: México, 1989.