

Ceniza volante de palma de aceite: una alternativa en la construcción sostenible*

Palm Oil Fly Ash: An Alternative in Sustainable Construction

CITACIÓN: Sánchez-M., B. E., Solano-S. & Rincón-A., O. (2021). Ceniza volante de palma de aceite: una alternativa en la construcción sostenible. *Palmas*, 42(1), 13-28.

PALABRAS CLAVE: Mortero, Activador alcalino, Temperatura de curado, Microscopía, Abrasión.

KEYWORDS: Mortar, Alkaline activator, Curing temperature, Microscopy, Abrasion.

* Artículo de investigación e innovación científica y tecnológica.

RECIBIDO: septiembre de 2020.

APROBADO: marzo de 2021.

SÁNCHEZ M. BERALDO E.

Ingeniero Civil, Universidad de la Salle
bsanchez38@unisalle.edu.co

SOLANO S. JORGE E.

Ingeniero Civil, Universidad de la Salle
jsolano77@unisalle.edu.co

RINCÓN A. ORLANDO

IC-MIC-PhD, Profesor Asociado,
Universidad de la Salle
orincon@unisalle.edu.co

Resumen

En Colombia se generan aproximadamente 320.000 toneladas anuales de ceniza volante de palma de aceite (CVPA), producto de la combustión de biomasa seca en las calderas, que por su inutilización son depositadas a cielo abierto. Como el principal productor de aceite de palma de América Latina y cuarto a nivel mundial, tiene el potencial de aprovechar estos residuos en la construcción sostenible, la elaboración de morteros de recubrimiento, material de conformación de vías, prefabricados, etc. En esta investigación se diseñó una mezcla patrón con cemento Portland (CP) y se elaboraron diferentes morteros sustituyendo el CP por CVPA en un incremento de (25, 50, 75 y 100 %). Se evaluaron las propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad

de los morteros endurecidos, la influencia de 2 diferentes temperaturas de curado 28 y 65 °C y el efecto de activadores alcalinos (silicato de sodio e hidróxido de sodio) sobre morteros de CVPA exclusivamente. Se encontró que en un remplazo del 25 % de CP por CVPA mejoran las propiedades de resistencia a la compresión hasta en 15 % con respecto a la mezcla patrón, en un 50 % cumple con todos los parámetros de resistencia y durabilidad (17,5 megapascales -MPa-) y en un remplazo del 100 % alcanzó una resistencia de 7,5 MPa. No se encontraron resultados positivos en las propiedades mecánicas con el incremento en la temperatura de curado. Sin embargo, una temperatura inferior a 22 °C podría afectar considerablemente estas propiedades.

Abstract

In Colombia, 320,000 tons of palm oil fly ash (CVPA by its acronym in Spanish) are generated each year, a product of the combustion of dry biomass in the boilers, which is deposited in the open due to its uselessness. As the main producer of palm oil in Latin America and fourth in the world, it has the potential to take advantage of waste in sustainable construction, preparation of coating mortars, road shaping material, precast, etc. In this research, a standard mixture with Portland cement (CP by its acronym in Spanish) was designed and different mortars were made, substituting CP in an increment of (25, 50, 75, and 100%) by CVPA. The physical, mechanical and durability properties of the hardened mortars, the influence of 2 different curing temperatures 28 °C and 65 °C and the effect of alkaline activators (sodium silicate and sodium hydroxide) on CVPA mortars exclusively were evaluated. It was found that a 25% replacement of CP by CVPA improves the properties of resistance to compression up to 15% with respect to the standard mixture, in 50% it complies with all the parameters of resistance and durability (17.5 MPa) and in a 100% replacement it reached a strength of 7.5 MPa. No positive results were found in mechanical properties with increasing curing temperature. However, a temperature below 22 °C could considerably affect these properties.

Introducción

La producción de CP es un importante emisor de los gases de efecto invernadero. Esta, de manera masiva, incrementa las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) en el medio ambiente, pues cada tonelada de CP produce aproximadamente 850 kg de CO₂ (Hendrik *et al.*, 2003). Por lo tanto, es necesario buscar materiales alternativos para reducir dichas emisiones y, a la vez, resolver problemas de desechos generados en la industria. La reutilización de esos residuos originados en los procesos de producción es una prioridad para mitigar los impactos por su disposición. El uso de la palma en la producción de aceites vegetales y biocombustibles ha incrementado la generación de residuos que podrían ser aprovechados de forma sostenible en diferentes aplicaciones, entre ellas, la industria de la construcción. La combustión

de la biomasa seca (cuesco y fibra del fruto de palma de aceite) como fuente de energía en las calderas, genera cenizas que pueden ser incluidas en morteros como material cementante de sustitución parcial o total del CP (Vakili *et al.*, 2015).

Tay en la década de 1990 comenzó el estudio de las propiedades de la ceniza de palma de aceite como agregado del concreto. Este se realizó reemplazando entre el 10 % y 15 % de CP por CVPA. Se observó que, la resistencia a la compresión de las muestras disminuyó cuando se sustituyó más del 10 %. Desde entonces se han realizado muchas investigaciones para mejorar las propiedades del hormigón.

Blessen en el año 2017, estableció diferentes porcentajes de sustitución del CP por la CVPA en su estado original, tal como se genera en las calderas, donde se utiliza como fuente de energía en la producción de calor y electricidad.

Blessen *et al.* (2017) concluyeron que la adición de CVPA reduce la trabajabilidad y tiempo de fraguado, debido al tamaño grueso de las partículas y a una mayor absorción de agua que retrasa el proceso de hidratación. Estos factores se deben a la baja superficie específica del material y a una concentración alta de carbón no quemado. Las investigaciones concluyen que adiciones de CVPA menores a 30 % mejoran las características del hormigón de control.

Salami (2018) analizó la composición química de las cenizas de palma de aceite y su efecto en las propiedades mecánicas del mortero: “La composición química de la CVPA, como se menciona en varios trabajos, contiene altas cantidades de SiO_2 (...). Una propiedad común es la baja cantidad de Al_2O_3 y CaO , que afecta en gran medida las propiedades ingenieriles de la CVPA” (Salami *et al.*, 2018). El requerimiento del óxido Al_2O_3 es muy importante para la reticulación entre las especies de SiO_2 , consolidando la formación de aluminosilicatos que contribuyen al desarrollo de la resistencia requerida. De acuerdo con Salami *et al.* (2018), “el bajo contenido Al_2O_3 o su ausencia podría afectar en gran medida las propiedades microestructurales del aglutinante, que por extensión afecta las propiedades de resistencia mecánica y el rendimiento de la durabilidad de dicho aglutinante activado alcalinamente”. Sin embargo, la CVPA es una fuente de aluminosilicatos que se puede desarrollar mediante la activación alcalina. Para producir cementos activados alcalinamente se han utilizado materiales inorgánicos como metacaolín, escorias y cenizas volantes, estos materiales de aluminosilicatos se clasifican según su contenido de CaO . Los materiales bajos en calcio requieren concentraciones elevadas del activador y su proceso de curado será térmico, acelerando las reacciones y asegurando una adecuada microestructura del ligante. Cuando el contenido de calcio es alto, las concentraciones alcalinas serán bajas y el curado a temperatura normal para un adecuado proceso de endurecimiento (Salami *et al.*, 2018).

Manuelita Aceites & Energía procesa 341.000 toneladas de fruto, generando 11.700 toneladas de ceniza al año, que por su inutilización son acopiadas en zonas a cielo abierto. Se han realizado estudios para ser usada como fertilizante en la plantación, pero estos reflejan un problema de insolubilidad en la ceniza, que afecta la incorporación de sus nutrientes al suelo (Castillo,

2018). Su aplicación como material cementante de reemplazo generará una posible disminución en el uso de CP, consecuentemente reduciendo las emisiones de CO_2 , el consumo de energía y la explotación de recursos naturales no renovables en la industria del concreto. El desarrollo del mortero de recubrimiento permitirá a la compañía Manuelita Aceites & Energía reducir los costos de su producción, haciéndolo viable como material de revestimiento. El mortero será aplicado inicialmente como recubrimiento en las diferentes estructuras del distrito de riego, con el fin de disminuir las pérdidas en el sistema y la captación de agua para regadío, su utilización permitirá el aprovechamiento de las grandes cantidades de ceniza de palma generadas, mitigando así su impacto ambiental.

Materiales

La selección y caracterización de los agregados del mortero de recubrimiento se realizó según sus características y disponibilidad en la zona de influencia del proyecto, incluyendo ceniza de palma de aceite, arena de río, activadores alcalinos y agua.

Metodología

A continuación, se describe la metodología utilizada para caracterizar los insumos (cemento y ceniza), diseño de mezcla patrón y determinación de las propiedades mecánicas y la durabilidad de los morteros endurecidos.

Caracterización de los insumos

Con el objeto de tener una caracterización completa de los materiales usados, se realizaron procesos de descripción física de los materiales. Adicionalmente, se hicieron observaciones de microscopía electrónica con el objeto de observar la morfología de partículas a microescala, así como la composición. Para el cemento, cenizas bajo diferentes condiciones y arenas, las observaciones se realizaron en el Centro de Microscopía de la Universidad de los Andes, utilizando el microscopio de transmisión de electrones TESCAN LYRA3. Las muestras recolectadas se protegieron contra la humedad en recipientes herméticos, además

se garantizó que no se contaminaran con otras sustancias y se facilitó su transporte y almacenamiento. Las sólidas se recubrieron en aluminio y se almacenaron en bolsas herméticas para luego ser analizadas.

Cemento Portland (CP)

El cemento utilizado es de uso general tipo (UG), con densidad de 3,05 g/cm³ (NTC 121) y finura Blaine de 355 m²/kg (NTC 33), valores que se encuentran dentro de los rangos establecidos por la normatividad para este tipo de cemento. La composición química obtenida en microscopía se presenta en la Tabla 1. De acuerdo con Sánchez (2001), el CP debe tener un contenido alto de calcio en un rango de (60-67 %), sílice entre (17-25 %) y aluminio entre (3-8 %). El calcio y el sílice se encuentran por debajo del rango establecido (27,7 y 1,9 %), es fundamental mencionar la importancia de estos elementos en el cemento, ya que son los encargados de proporcionar las propiedades aglomerantes de la mezcla de mortero, por otra parte, el aluminio se encuentra dentro del rango con un valor de 7,7 %. Mediante las imágenes de microscopía electrónica de

barrido se realizó un análisis de la microestructura geomorfológica del cemento (Figura 1). Las partículas de CP tienen una estructura angular e irregular, lo que puede facilitar la adherencia con los agregados, no se distingue porosidad en la superficie, su tamaño promedio es de 9 µm a 15 µm.

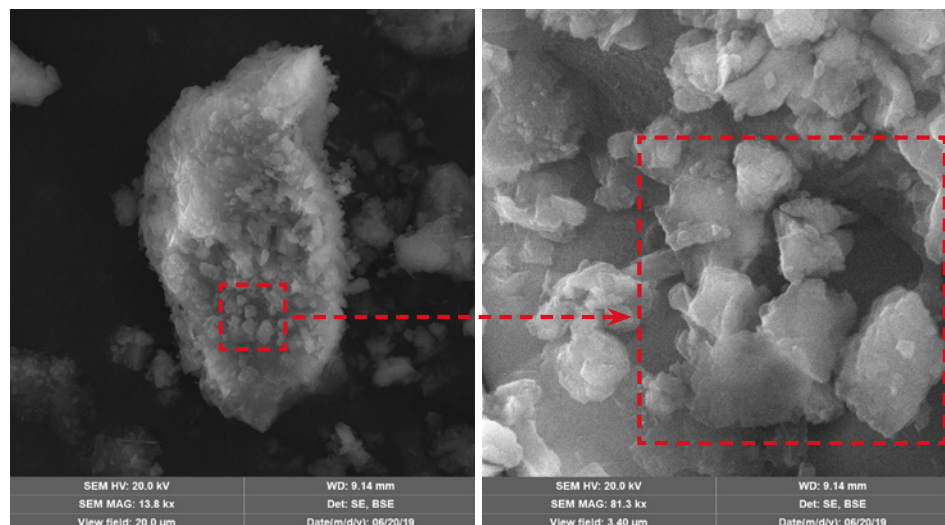
Ceniza volante de palma de aceite

En su estado natural la CVPA presenta una coloración muy oscura y su textura es inadecuada para ser utilizada (Figura 2), por lo anterior se sometió a un proceso de trituración con el fin de disminuir su tamaño y aumentar la superficie específica, posteriormente se incineró a 800 °C para eliminar el alto contenido de carbono, ya que este afecta significativamente las propiedades mecánicas en los morteros endurecidos. En este proceso cambió su color de negro a café. El tono varía a medida que la temperatura aumenta, lo que evidencia la calcinación de componentes orgánicos presentes en el material en estado natural. La composición química de la ceniza en estado original y sometida a incineración se presentan en la Tabla 2.

Tabla 1. Composición química del cemento Portland tipo (UG)

Elemento	Al	C	Ca	Cl	Fe	K	Mg	O	Si
Contenido (%)	7,7	17,6	27,7	0	5,8	0,4	0,5	38,4	1,9

Figura 1. Microscopía electrónica de barrido del cemento Portland



Debido a la incineración se observa un aumento en el aluminio y el calcio, lo que se puede asociar en una mejora de las propiedades cementantes en la mezcla de mortero, por otra parte, el silicio y el oxígeno disminuyen significativamente lo que podría afectar las propiedades mecánicas, ya que el silicio en reacción con el óxido forma dióxido de silicio (SiO_2) y el oxígeno con el calcio forma óxido de calcio (CaO), estos 2 óxidos reaccionan para formar silicato tricálcico (C_3S) encargado de la resistencia a temprana edad y silicato dicálcico (C_2S) responsable de las resistencia a edades mayores a 7 días. La exposición a temperatura de 800 °C reduce la porosidad, lo que podría

disminuir la absorción de agua en la hidratación del mortero, mejorando el desempeño respecto a la resistencia y a la compresión. A partir de las imágenes obtenidas de la microscopía electrónica de la CVPA (Figura 3 y 4), se realizó un análisis de su microestructura, en contraste con el CP que presentó partículas de mayor tamaño en un rango comprendido entre 10 y 15 μm con forma angulosa de textura rugosa, lo que podría ayudar a la adherencia con el agregado fino de la mezcla de mortero. Por otra parte, las partículas con este tipo de morfología, al acomodarse, generan mayor contenido de vacíos lo que afecta la resistencia y durabilidad en los morteros.

Tabla 2. Composición química de ceniza volante de palma de aceite (CVPA)

Estado de incineración CVPA	Elemento (%)											
	Al	C	Ca	Cl	Fe	K	Mg	Na	O	P	S	Si
Estado natural	0,3	26,8	0,3	0,6	0,2	2	0,3	0	44,9	0,2	0,2	24,2
800 °C	3,9	16,5	2,1	10,1	0,8	16,9	2,3	0,4	37,5	2,6	0,8	6,1

Figura 2. Fases de incineración: A. Estado natural; B. 550 °C; C. 800 °C

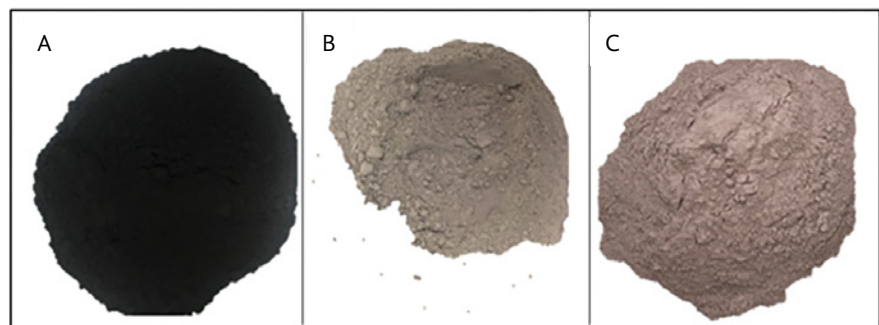
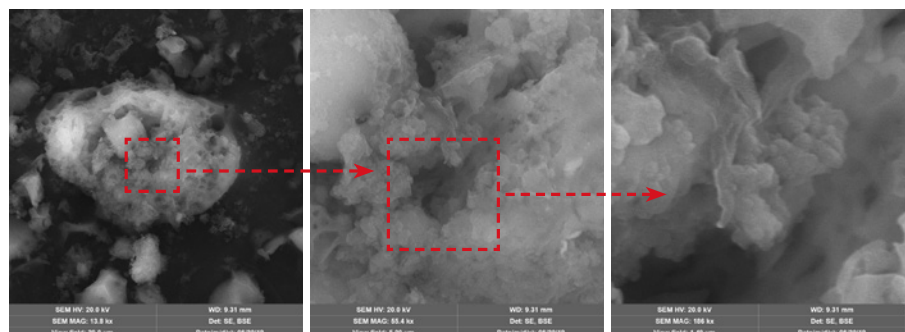


Figura 3. Microscopía electrónica de barrido de las cenizas volante de palma de aceite en estado natural



Para la caracterización se realizaron ensayos de densidad, gravedad específica y absorción de agregado fino, análisis granulométrico y contenido de impurezas mediante las normas INV E-222-13, INV E-123 y NTC 127 (Tabla 3). De acuerdo con el análisis granulométrico (Tabla 4 y Figura 5), la arena de río presentó un tamaño máximo nominal de 2,36 mm y un módulo de finura de 2,34. Se utilizó arena de río pasa tamiz # 8 verificando los límites descritos en la Norma Técnica Colombiana y especificaciones INVÍAS que cubren los principales tipos de morteros: NTC 2240 (mampostería de morteros), NTC 4020 (especificaciones del agregado fino para el mortero de inyección grout) y INV E-812 (recubrimiento de taludes con mallas y morteros). La absorción fue de 2,67 %, clasificando como un material ligeramente fino. Se realizó un estimado del contenido de impurezas orgánicas presentes en la arena de río, según la clasificación de la carta de Gardner el valor es de 5, siendo favorable, ya que no presenta ningún contenido de impurezas que pueda afectar el fraguado o endurecimiento del mortero.

Activadores alcalinos

Los empleados en las mezclas fueron hidróxido de sodio y silicato de sodio en una proporción de 50 % del material cementante. El NaOH se utilizó en una molaridad 8M luego de haber evaluado su comportamiento en las propiedades mecánicas frente a una molaridad de 10 y 12M.

Diseño y definición de mezclas

El mortero patrón se diseñó de forma experimental, siguiendo los parámetros de resistencia a la compresión y consistencia que permitieran su aplicación en revestimiento de canales. Para ello, se realizó una curva de porcentaje de fluidez vs. relación agua/cemento, donde se varía la proporción del aglutinante y agregado fino, para determinar el agua requerida que garantice una misma consistencia (seca del 80 %). Al obtener esta consistencia se elaboran diferentes morteros variando la relación cemento-arena (1:1, 1:1,5, 1:2, 1:2,5, 1:2,75 y 1:3), para determinar una

Figura 4. Microscopía electrónica de barrido de las cenizas volante de palma de aceite incinerada a 800 °C

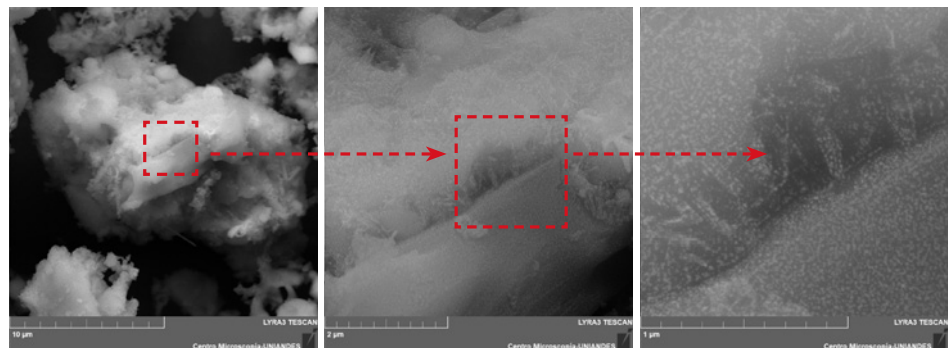


Tabla 3. Caracterización física del agregado fino

Caracterización de la arena de río	
Densidad (g/cm ³)	2,58
Absorción (%)	2,67
Módulo de finura	2,34
Forma de las partículas	Redondeada
Tamaño máximo nominal (mm)	2,36
Contenido de impurezas	<5

resistencia de diseño igual o mayor a 17,5 MPa. El curado se hizo a temperatura ambiente de acuerdo con la zona de estudio y se realizaron pruebas de resistencia a la compresión a los 28 días de edad.

La relación 1:3 cumplió con la resistencia mínima requerida para morteros de recubrimiento (Figura 6), esta se adoptó para los diferentes tipos de mortero que

contienen cemento con CVPA, de igual forma se determinó el agua requerida para una consistencia del 80 %. Con las proporciones del cementante y agregado fino en proporción (1:3) y la fluidez del 80 % para una consistencia seca, se definió la mezcla patrón (M0). Estas proporciones fueron constantes en el diseño, que solo tendrían un reemplazo progresivo del CP por CVPA.

Figura 5. Distribución granulométrica de la arena de río

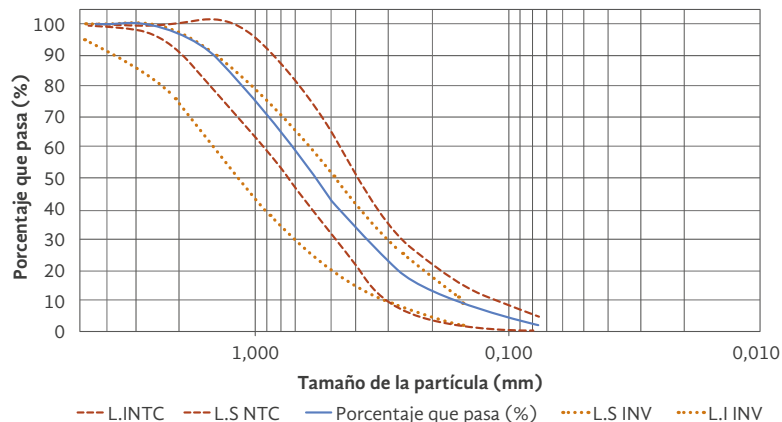
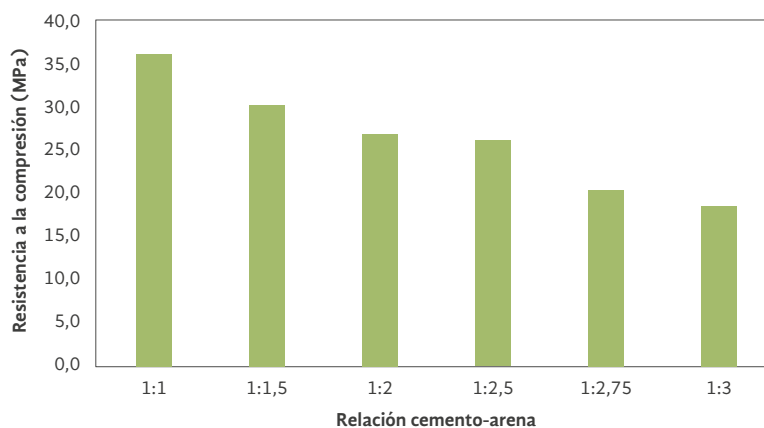


Tabla 4. Granulometría del agregado fino

Tamiz	Porcentaje retenido (%)	Porcentaje que pasa (%)
N° 8	-	100
N° 16	8	83
N° 30	42	51
N° 50	33	23
N° 100	11	9
N° 200	4	2

Figura 6. Resistencia a la compresión de los morteros de prueba



Los activadores alcalinos son adicionados a las mezclas como una fracción porcentual en masa respecto al cementante, 0,5 partes de activador alcalino por una parte de cementante (0,5-1,0). De igual forma, la proporción entre los activadores alcalinos se define en una parte de hidróxido de sodio por 2,5 partes de silicato de sodio (1-2,5).

La Tabla 5 muestra los tipos de mortero y la dosificación de los diferentes materiales utilizada en cada uno de ellos.

Propiedades mecánicas

Resistencia a la compresión y flexión (NTC 220 y INV E-324)

Siguiendo los lineamientos dados por la norma técnica colombiana se evaluaron las propiedades mecánicas en los morteros (resistencia a la compresión y resistencia a la flexión), para 4 edades: 7, 14, 21 y 28 días, en 2 diferentes temperaturas de curado 28 °C y 65 °C hasta las pruebas de rotura.

Durabilidad

Los morteros de recubrimiento al estar expuestos a condiciones ambientales y físicas agresivas son susceptibles al deterioro, principalmente por exposición a sulfatos y abrasión, por esta razón es impor-

tante analizar su afectación para garantizar un buen desempeño con el tiempo.

Resistencia a los sulfatos (ASTM-C1012)

Las probetas se secaron al horno durante 24 horas a temperatura 105+/-5 °C y se registró su peso seco. Una solución de ácido sulfúrico en concentración (50ml/L) cubrió totalmente los cubos de mortero durante 24 horas, esta concentración equivale a 10.000 ppm, definida como una exposición severa. Luego se evaluó la pérdida de peso de los cubos lavados y secos al horno. Por último, se determinó su resistencia a la compresión.

Resistencia a la abrasión por el método cántabro (INV E-760-13)

Para adaptar su aplicación para morteros de recubrimiento, se fabricaron probetas esféricas de 5,08 cm (2") de diámetro, reemplazando las de tipo Marshall del ensayo original, y se sometieron a vibrado para obtener una mayor compactación.

El curado se realizó a la temperatura de 28 °C. Estos especímenes se fabricaron utilizando un encofrado plástico esférico, que se retiró cumplidas las 24 horas iniciales de maduración. Las esferas, posterior a cumplir su maduración de 28 días, se introdujeron en la máquina de los Ángeles sin carga abrasiva durante 600 revoluciones a una velocidad de 33 rpm,

Tabla 5. Dosificación de los morteros

Mezcla	Cementante (%)		Agregado fino	A/C CP-CVPA		Activadores
	CP	CVPA	A-C			NaOH/Na ₂ SiO ₃
M0	100	-	1:3	0,67	-	-
M1	75	25	1:3	0,67	0,82	-
M2	50	50	1:3	0,67	0,82	-
M3	25	75	1:3	0,67	0,82	-
M4	-	100	1:3		0,82	1:2,5

Nota: los porcentajes de CP y CVPA se definen únicamente al aglutinante

A-C= relación cemento-arena

A/C= relación agua/cemento y se aplica de acuerdo con el porcentaje de cada material

El activador alcalino está definido en 0,5 partes del cementante

en la que se registraron lecturas en intervalos de 10 revoluciones y se determinó la pérdida de masa.

Resistencia a la abrasión por el método subacuático (ASTM-C1138)

Se evaluó la pérdida de masa en probetas de 30 cm de diámetro y 10 cm de alto expuestas a desgaste por abrasión en la superficie, con esferas de acero de distintos tamaños sometidas a rotación por la turbulencia que genera un aspa en el agua, a velocidad aproximada de 1.260 +/-50 rpm. El ensayo se evaluó en diferentes tiempos de exposición.

Resultados y discusión

Propiedades mecánicas

Resistencia a la compresión

Los resultados obtenidos en las pruebas de resistencia a la compresión de 7, 14, 21 y 28 días, curados a temperatura de 28 °C y 65 °C, se muestran en la Figura 7 y Figura 8. Se encontró que los morteros con un reemplazo hasta del 25 % de CP por CVPA mejora la resistencia en edades iniciales y finales, en contraste con el mortero patrón.

La sustitución en un 50 % de CP por CVPA superó la resistencia de diseño (17,5 MPa) siendo esta de (M2=18,74 MPa). La mezcla de CVPA exclusivamente activada alcalinamente (M4) obtuvo una resistencia a la compresión de (7 MPa), esto podría atribuirse a la deficiencia de calcio presente en la CVPA. Los morteros

curados a temperatura ambiente 28 °C mostraron mayor resistencia en comparación con los curados a temperaturas elevadas 65 °C.

Resistencia a la flexión

Los resultados obtenidos de la prueba de flexión se muestran en la Figura 9. El ensayo se realizó para 2 temperaturas de curado evaluadas en edades de 7, 14, 21 y 28 días. La mezcla M1 mostró una mayor resistencia a la flexión en edades tempranas y finales (7,3 MPa), superando en un 32,8 % a la mezcla de control (4,9 MPa). La mezcla M4 presentó un buen comportamiento a la flexión (6,69 MPa) por encima de la mezcla de control, este comportamiento se puede asociar a la morfología de la CVPA, los materiales de forma irregular y textura rugosa tienden a tener un mejor comportamiento frente a la resistencia a la flexión en contraste con aquellos que son irregulares, pero de textura lisa. La Figura 10 muestra los resultados de las pruebas de resistencia a la flexión para 2 diferentes temperaturas de curado 28 °C y 65°C. Los morteros elaborados con CVPA mostraron un mayor rendimiento cuando se curaron a temperatura elevada (65 °C).

Durabilidad

Los morteros de recubrimiento se encuentran expuestos a acciones físicas o químicas que causan deterioro lo que reduce su vida útil, la estimación de esta depende de la determinación de las propiedades mecánicas para resistir este ataque y de las características del ambiente a las cuales se encuentran expuestos.

Figura 7. Resistencia a la compresión a los 7, 14, 21 y 28 días

Rd = Resistencia de diseño

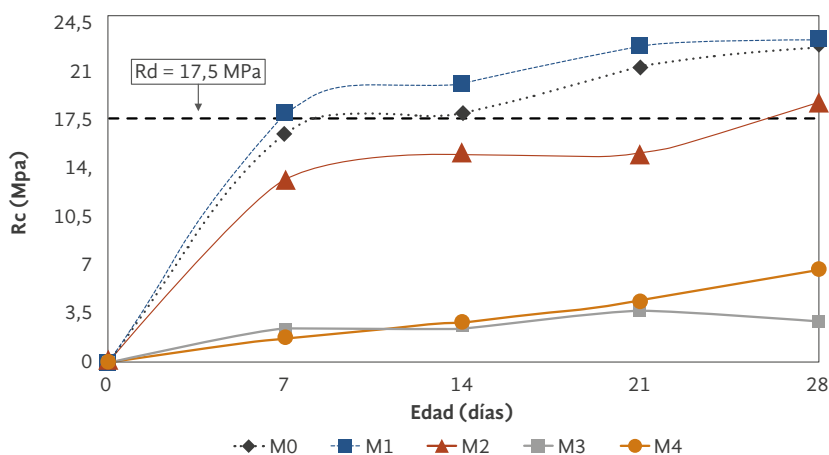


Figura 8. Resistencia a la compresión, curados a 28 °C y 65 °C

Rd = Resistencia de diseño

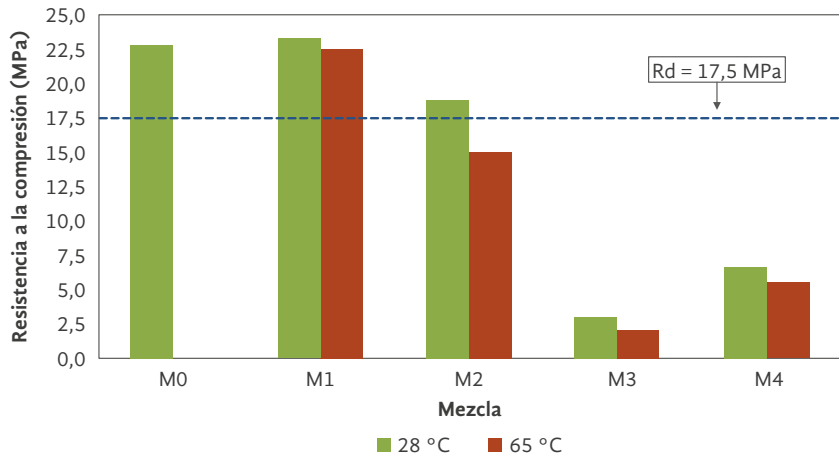


Figura 9. Resistencia a la flexión, curado a 28 °C

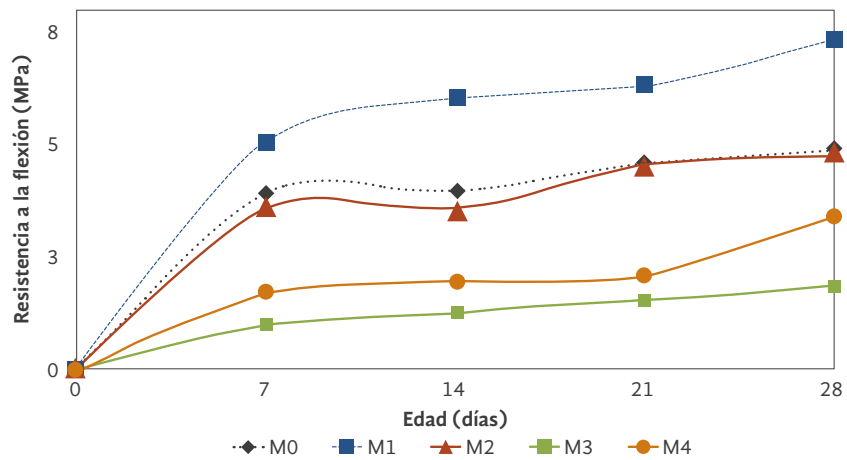
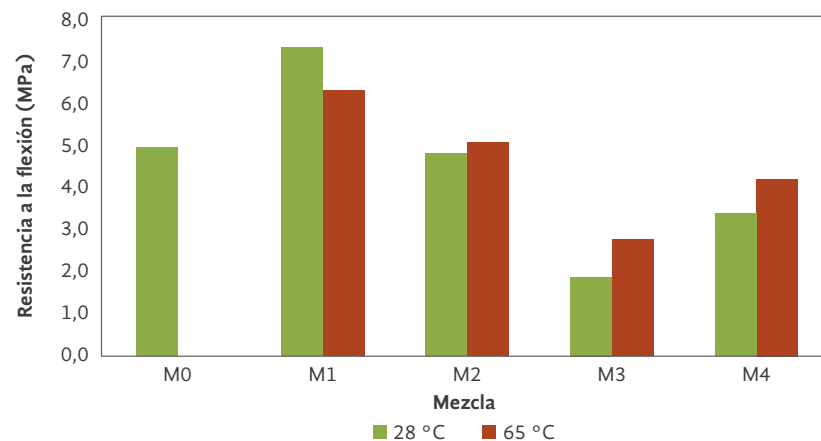


Figura 10. Resistencia a la flexión, curado a 28 °C y 65 °C



Resistencia a los sulfatos

La Tabla 6 y la Figura 11 muestran los resultados de pérdida de la resistencia a la compresión sobre espe-

címenes expuestos a una solución de ácido sulfúrico. Se encontró que los morteros con mayor porcentaje de CVPA presentaron mayores pérdidas hasta en 23,2 % en una sustitución de 75 % de CP. De la Figura 12 se

analizó la pérdida de resistencia a la compresión con respecto al contenido de ligante CVPA presente en la mezcla. Se encontró que los morteros presentaron un comportamiento ascendente de la pérdida de resis-

cia con el aumento progresivo de CVPA, dicho comportamiento podría asociarse con la porosidad, esta permite el paso de la solución de H_2SO_4 hacia el núcleo del cubo afectando la resistencia a la compresión.

Tabla 6. Resistencia a los sulfatos, pérdida de resistencia a la compresión

Mezcla	Pérdida de Rc (%)	
	28 °C	65 °C
M0	6,53	-
M1	9,13	6,34
M2	10,75	11,40
M3	23,20	23,77
M4	23,18	18,36

Figura 11. Resistencia a los sulfatos, pérdida de resistencia a la compresión

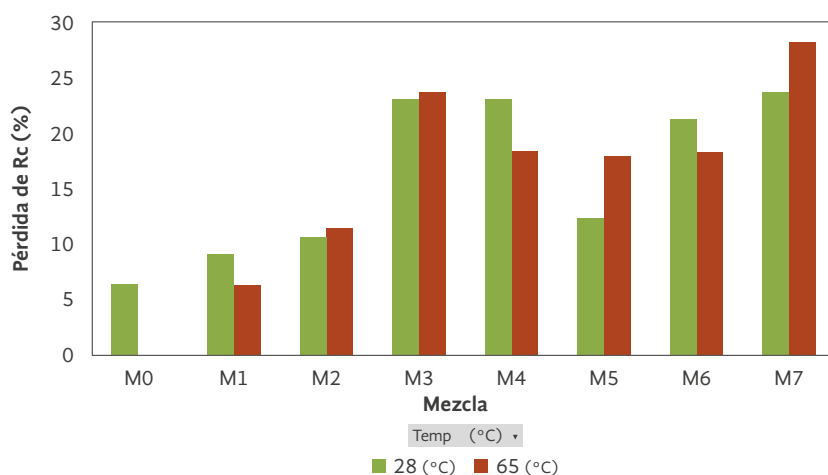
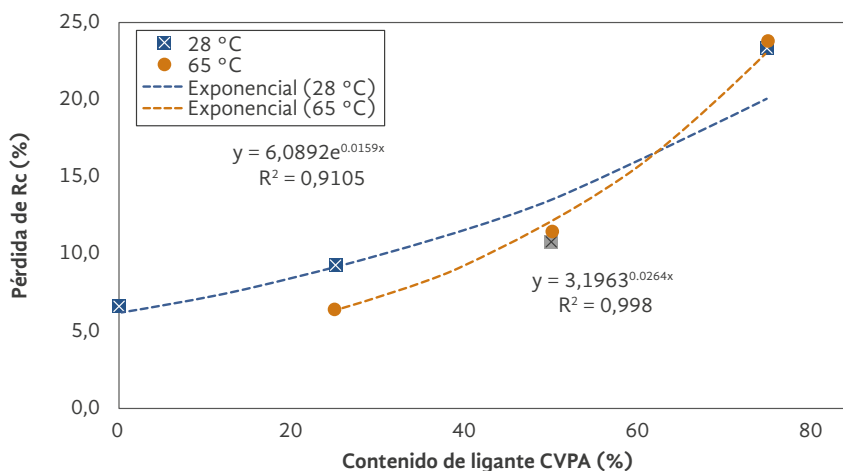


Figura 12. Resistencia a los sulfatos contenido de CVPA



La temperatura de curado tiene un efecto en la resistencia a los sulfatos. Los morteros curados a 65 °C presentaron menor pérdida de resistencia para contenido de ligante hasta el orden de 60 %, que varía en un 15,1 % para morteros de CP y CVPA con respecto a los morteros curados a temperatura ambiente.

La Tabla 7 y la Figura 13 muestran los resultados de pérdida de masa. Se observó un incremento en esta pérdida a medida que se reemplazó el cemento por CVPA, la mezcla M4 mostró una mayor pérdida de masa (1,5 %), la mezcla M0 y M1 presentaron las menores pérdidas con valores del 0,3 %. Los morteros curados a 65 °C presentaron menor pérdida de masa, que varió en un 15,1 % con respecto a los morteros curados a temperatura ambiente.

Abrasión por el método cántabro (INV E-760-13)

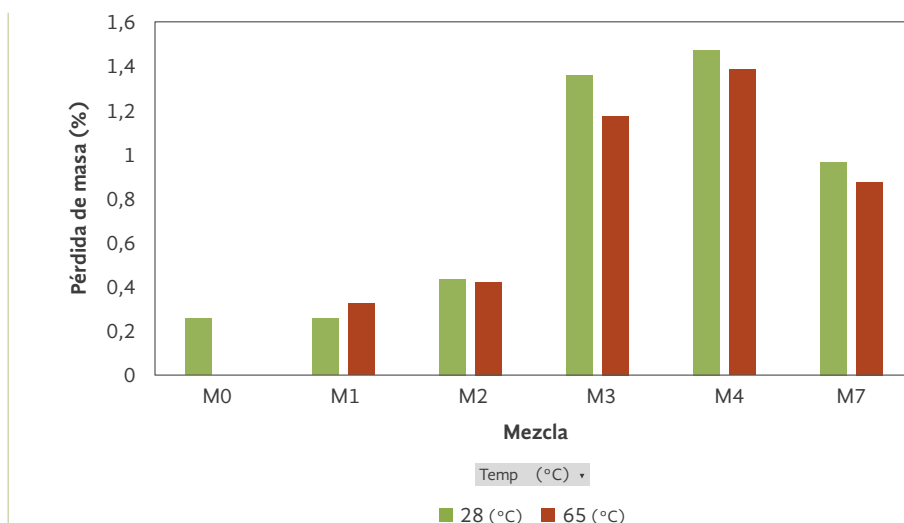
Las mezclas activadas alcalinamente presentaron mayor desgaste por abrasión superando el 80 % en las primeras 50 revoluciones, en este punto se contrastaron todos los resultados, los especímenes se sometieron a abrasión hasta considerarse una pérdida de masa mayor al 60 % y algunos casos mayores a 85 %, como se muestra en la Figura 14.

La mezcla M2 mostró un mayor desempeño en la pérdida de masa superando el mortero de referencia, que en 50 revoluciones había perdido el 34,6 %, mientras que M2 solo perdió 3 %. La relación Ca/Si facilita la evaluación de los morteros. Desde la com-

Tabla 7. Resistencia a los sulfatos, pérdida de masa

Mezcla	Pérdida de masa (%)	
	28 °C	65 °C
M0	0,3	-
M1	0,3	0,3
M2	0,4	0,4
M3	1,4	1,2
M4	1,5	1,4

Figura 13. Pérdida de masa, curado a 28 y 65 °C



posición química se puede establecer qué adición de CVPA tiene el mayor desempeño frente al parámetro evaluado, por medio de un índice de abrasión. Este índice se establece por el método cántabro, contrastando qué relación Ca/Si logra el menor desgaste posible. Para un porcentaje de abrasión máximo definido se obtiene la relación Ca/Si, que permite establecer la cantidad CVPA que sustituye al CP en el diseño del mortero.

De acuerdo con la Figura 15, el mortero con el menor índice de desgaste equivalente al 0,94 % es el que tiene la relación Ca/Si=0,60, todo mortero diseñado con una relación química menor a la indicada anteriormente tendrá una abrasión mayor al 50 %. Se determinó el porcentaje de CVPA incluido en el mortero, por medio de la relación (Ca/Si). De

la Figura 16 se observa que el 50 % de CVPA como cementante presentó el mejor desempeño respecto al índice de abrasión.

Abrasión por el método subacuático

Para evaluar el deterioro por abrasión en canales, es de mayor practicidad medir dicho parámetro mediante la profundidad del desgaste causado, entonces las mezclas de mortero se contrastaron de esta forma en las primeras 8 horas del ensayo (Figura 17). El de referencia obtuvo un mayor desempeño a la abrasión en contraste con los otros morteros evaluados, luego de 16 horas de exposición la pérdida de masa del espécimen fue de 6,3 %, mientras que en M2 se duplicó el desgaste al obtener 13,1 %

Figura 14. Curva de desgaste por abrasión en el método cántabro

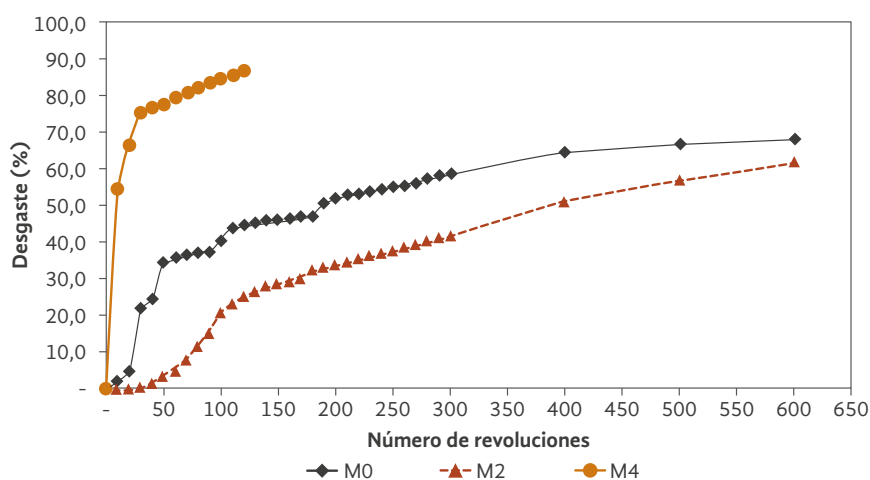


Figura 15. Índice de abrasión en morteros por el ensayo cántabro

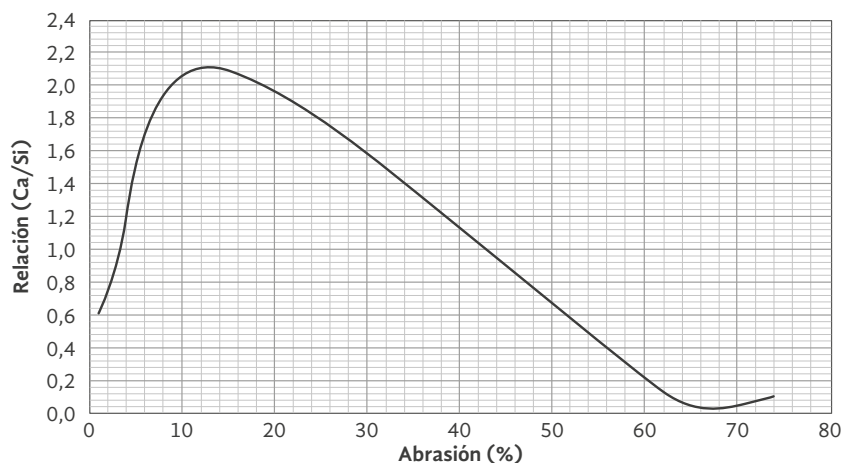


Figura 16. Contenido óptimo de CVPA en las mezclas de mortero

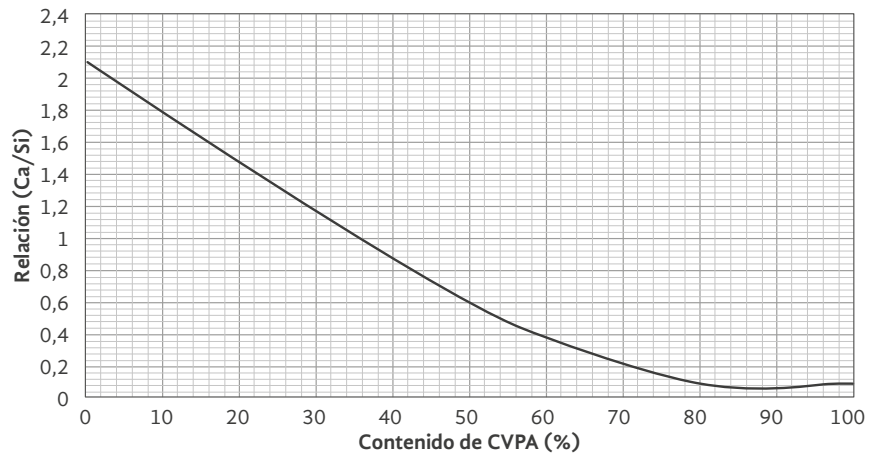
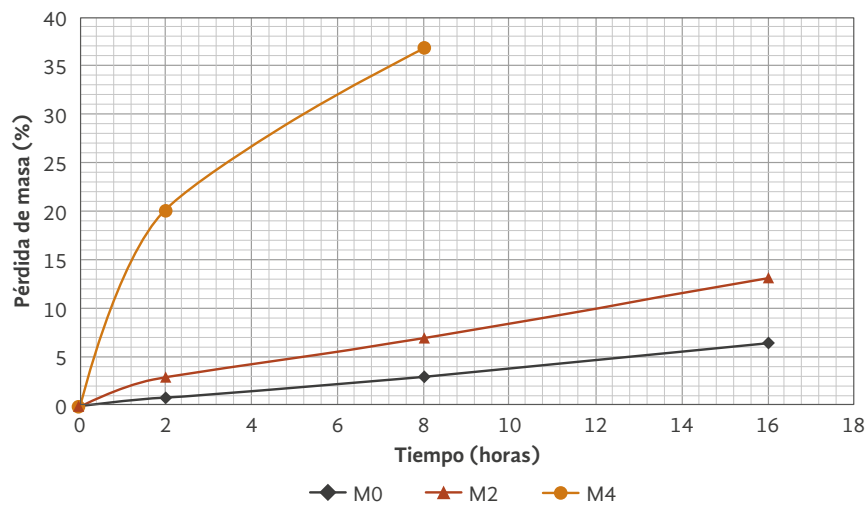


Figura 17. Pérdida de masa en morteros (ASTM-C1138-12)



Conclusiones

De acuerdo con los resultados, se pudo determinar que la CVPA, después de ser sometida a un tratamiento térmico por encima de 500 °C, puede ser aprovechada como un sustituto del CP en la construcción de morteros de recubrimiento. Actualmente, la ceniza es aprovechada como fertilizante en algunas plantaciones. Sin embargo, aunque es rica en algunos elementos que podrían aportar al desarrollo de las plantas presentan un problema de insolubilidad, que no la hace atractiva para ser usada como fertilizante. Por otra parte, grandes cantidades de ceniza son depositadas a campo abierto, trayendo consigo afectación al medio ambiente. Esta propuesta le ofrece a la agroindustria

del sector palmero la posibilidad de aprovechar este subproducto derivado del proceso de la extracción de aceite de palma en la construcción sostenible, para mitigar así el impacto ambiental y, a la vez, contribuir a la reducción de las emisiones de CO₂ generadas en la fabricación del CP. De acuerdo con el desempeño observado y la durabilidad del material, se considera que este ayudaría al mejoramiento de la infraestructura del sistema de riego y drenaje, y de vías internas de la plantación.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad de la Salle y a su personal técnico por permitir el uso de sus

instalaciones y conocimiento, al Ingeniero Eduardo Castillo, Gerente de Investigación y Desarrollo en Manuelita S. A. y al Ingeniero Axel Humberto Mar-

tínez, Gerente de Campo y Proveedores en Manuelita S. A., por suministrar la materia prima y hacer acompañamiento en este proceso.

Bibliografía

- ASTM C1012 / C1012M-18b. (2018). Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution. *ASTM International, West Conshohocken, PA*. Recuperado de <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?C1012C1012M-18b>
- ASTM C1138 -19. (2019). Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete (Underwater Method). *ASTM International, West Conshohocken, PA*. Recuperado de <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?C1138M-19>
- Blessen-Skariah, T., Sanjeev, K. & Hasan, S. A. (2017). Sustainable Concrete Containing Palm Oil Fuel Ash as a Supplementary Cementitious Material—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 550-561. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.128>.
- Castillo, E. (2018). Manejo de cenizas en el Grupo Manuelita. Recuperado de Mensaje de una lista de correo electrónico, (15) (08) (2018). Recuperado de <https://outlook.office365.com/mail/search/id/ADgyYjAzNjU3LTQ1ODctNGM5Yi1hNTQ5LTU0MmJmYxOTU5N-QAQAC1O7RciSUdlrps%2B%2BFohabA%3D>
- G. Hendrik, V., Oss, A. & Padovani, C. (2003). Cement Manufacture and the Environment Part II: Environmental Challenges and Opportunities. *J Ind Ecol*, 7, 93-126. Recuperado de <https://doi.org/10.1162/108819803766729212>
- Hu, S., Wang, H., Zhang, G. & Ding Q. (2008). Bonding and Abrasion Resistance of Geopolymeric Repair Material Made with Steel Slag. *Cement Concr. Compos.*, 30(3), 239-244. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.04.004>
- INV-E-222-13. (2013). *Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino*. Inviás, Instituto Nacional de Vías. Recuperado de <https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/139-documento-tecnicos/1988-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-y-normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras>
- INV-E-324-13. *Resistencia a la flexión*. (2013). Inviás, Instituto Nacional de Vías. Recuperado de <https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/139-documento-tecnicos/1988-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-y-normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras>
- INV-E-760- 1. (2013). *Abrasión en mezclas asfálticas*. Inviás, Instituto Nacional de Vías. Recuperado de <https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/139-documento-tecnicos/1988-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-y-normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras>

- INV-E-123. (2013). *Determinación de los tamaños de partículas de los suelos*. Invías, Instituto Nacional de Vías. Recuperado de <https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/139-documento-tecnicos/1988-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-y-normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras>
- INV-E -812. (2013). *Recubrimiento de taludes con mallas y morteros*. Invías, Instituto Nacional de Vías. Recuperado de ftp://ftp.ani.gov.co/Licitaci%C3%B3n%20VJVGCLP%20001-2016M1/Especificaciones%20Generales%20de%20Construccion%20de%20carreteras/CAP%C3%8DTULO%208_2.pdf
- NTC 121. (2014). Especificación de desempeño para cemento hidráulico. *Icontec, Instituto Colombiano de Normas Técnicas, 18(06)*. Recuperado de <https://ecollection-icontec-org.hemeroteca.lasalle.edu.co/normavw.aspx?ID=520>
- NTC 127. (2000). Concretos, método de ensayo para determinar las impurezas orgánicas en agregado fino para concreto. *Icontec, Instituto colombiano de normas técnicas, 21(06)* Recuperado de <https://ecollection-icontec-org.hemeroteca.lasalle.edu.co/normavw.aspx?ID=586>
- NTC 220. (2017). Cementos. Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico a la compresión, usando cubos de 50 mm o 2 pulgadas de lado. *Icontec, Instituto colombiano de normas técnicas, 18(08)*. Recuperado de <https://ecollection-icontec-org.hemeroteca.lasalle.edu.co/normavw.aspx?ID=1442>
- NTC 2240. (2020). Agregado para mortero de mampostería. *Icontec, Instituto colombiano de normas técnicas, 20(05)*. Recuperado de <https://ecollection-icontec-org.hemeroteca.lasalle.edu.co/normavw.aspx?ID=78719>
- NTC 33. Cements. (2019). Test Method to Determine the Fineness of Hydraulic Cement by the Blaine Air-permeability Apparatus. *Icontec, Instituto colombiano de normas técnicas, 11(12)* Recuperado de <https://ecollection-icontec-org.hemeroteca.lasalle.edu.co/normavw.aspx?ID=76871>
- NTC 4020. (2010). Agregados para mortero de inyección utilizado en mampostería (Grout para mampostería). *Icontec, Instituto colombiano de normas técnicas, 14 (10)*. Recuperado de <https://ecollection-icontec-org.hemeroteca.lasalle.edu.co/normavw.aspx?ID=79383>
- Salami, B. A., Megat Johari, M. A., Ahmad, Z. A., Maslehuddin, M. & Adewumi, A. A. (2018). Impact of Al(OH)₃ Addition to POFA on the Compressive Strength of POFA Alkali-activated Mortar. *Construction and Building Materials, 190*, 65-82. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.076>
- Sánchez-G., D. (2001). *Tecnología del concreto y del mortero*. Bhandar Editores Ltda. 5.
- Tay, H. J. (1990). Ash from oil-palm waste as concrete material. *J. Mater. Civ. Eng., 2*, 94-105. Recuperado de [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1990\)2:2\(94\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1990)2:2(94))
- Vakili, M., Rafatullah, M., Ibrahim, M. H., Salamatinia, B., Gholami, Z. & Zwain, H. M. (2015). A Review on Composting of Oil Palm Biomass. *Environ Dev Sustain, 17 (4)*, 691-709. Recuperado de <https://link.springer.com/article/10.1007/s10668-014-9581-2>