

# Design of Mixtures with Palm Oil Fuel Ash and its Influence on the Physical-Mechanical Properties of Concrete

Carlos Magno Chavarry Vallejos, Doctor<sup>1</sup>; Enriqueta Pereyra Salardi, Doctor(c)<sup>2</sup>; Jackeline Carol Escobar Serrano, Magister<sup>3</sup>; Julio Cesar Coral Jamanca, Magister<sup>4</sup>; Gustavo Gregorio De La Cruz Dueñas, Magister<sup>5</sup>; Brighith Melina Ccente Pumapillo, Bachiller<sup>6</sup>; Estephany Yahaira Guevara Obando, Bachiller<sup>7</sup>

<sup>1,2,3,6,7</sup> Universidad Ricardo Palma, Perú, carlos.chavarry@urp.edu.pe; enriqueta.pereyra@urp.edu.pe; jackeline.escobar@urp.edu.pe; brighith.ccente@urp.edu.pe; estephany.guevara@urp.edu.pe

<sup>4,5</sup> Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Perú, jcoralj@unasam.edu.pe; gdelacruz@unasam.edu.p

*Abstract. - The objective of this article was to determine the optimal percentage of Palm Oil Fuel Ash (POFA) as a partial replacement for cement in order to improve the physical and mechanical properties of concrete. The research used the deductive scientific method, applied orientation, quantitative approach, retrospective data collection instrument, descriptive, explanatory and correlational type, with experimental, longitudinal, prospective and cohort study design (cause-effect). The aim was to improve the workability, axial compressive strength, tensile strength, density and water absorption of concrete. The workability of concrete with different POFA replacements proposes the use of superplasticizers at percentages greater than 1.14% of the weight of the specific weight of cement for mixtures with a water-cement ratio (w/c) of 0.35, maintaining a workable consistency with replacements in intervals of 8% and 12%. The optimal replacement percentage of 20% of POFA, the compressive strength increased by 8.32% and the maximum tensile strength with a replacement of 10%, increased by 16.02%, with respect to the master concrete. The density of the hardened concrete decreased by 3.18% with the incorporation of 30% of POFA, the water absorption with the incorporation of 30% increased by 17.82% and the slump decreased up to 52.63% with respect to the pattern concrete, going from a fluid consistency to plastic or dry.*

*Keywords: Palm oil fuel ash, mechanical properties, physical properties, water absorption, workability.*

# Diseño de mezclas con ceniza de aceite de palma y su influencia en las propiedades físico-mecánicas del hormigón

Carlos Magno Chavarry Vallejos, Doctor<sup>1</sup>; Enriqueta Pereyra Salardi, Doctor(c)<sup>2</sup>; Jackeline Carol Escobar Serrano, Magister<sup>3</sup>; Julio Cesar Coral Jamanca, Magister<sup>4</sup>; Gustavo Gregorio De La Cruz Dueñas, Magister<sup>5</sup>; Brighth Melina Ccente Pumapillo, Bachiller<sup>6</sup>; Estephany Yahaira Guevara Obando, Bachiller<sup>7</sup>

<sup>1,2,3,6,7</sup> Universidad Ricardo Palma, Perú, carlos.chavarry@urp.edu.pe; enriqueta.pereyra@urp.edu.pe; jackeline.escobar@urp.edu.pe; brighth.ccente@urp.edu.pe; estephany.guevara@urp.edu.pe

<sup>4,5</sup> Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Perú, jcoralj@unasam.edu.pe; gdelacruz@unasam.edu.p

**Resumen** - El presente artículo tuvo como objetivo determinar el porcentaje óptimo de Cenizas Combustibles de Aceite de Palma (POFA) como reemplazo parcial del cemento con la finalidad de mejorar las propiedades físicas y mecánicas del hormigón. La investigación empleó el método científico deductivo, orientación aplicada, enfoque cuantitativo, instrumento de recolección de datos retrolectivo, tipo descriptivo, explicativo y correlacional, con diseño experimental, longitudinal, prospectivo y de estudio de cohorte (causa- efecto). Se buscó mejorar la trabajabilidad, la resistencia a la compresión axial, la resistencia a la tracción, la densidad y la absorción de agua del hormigón. La trabajabilidad del hormigón con diferentes reemplazos de POFA, propone el uso de superplastificantes a porcentajes mayores al 1.14% del peso específico del cemento para mezclas con relación agua-cemento ( $a/c$ ) de 0.35, manteniendo una consistencia trabajable con reemplazos en intervalos de 8% y 12%. El porcentaje óptimo de reemplazo del 20% de POFA, la resistencia a la compresión aumentó en 8.32% y la resistencia a la tracción máxima con un reemplazo del 10%, aumentó un 16.02%, con respecto al hormigón patrón. La densidad del hormigón endurecido disminuyó un 3.18% con incorporación del 30% de POFA, la absorción de agua con incorporación de un 30% aumentó un 17.82% y el asentamiento disminuyó hasta un 52.63% con respecto al hormigón patrón pasando de una consistencia fluida a plástica o seca.

**Palabras claves:** Ceniza combustibles de aceite de palma, propiedades mecánicas, propiedades físicas, absorción de agua, trabajabilidad.

## I. INTRODUCCIÓN

El hormigón es uno de los materiales de construcción más utilizados a nivel mundial y es utilizado en la construcción de edificios, puentes, presas, entre otros. La calidad y el rendimiento del hormigón pueden ser afectados por diversos factores internos y externos que influyen en su durabilidad, resistencia, trabajabilidad y formación de grietas. La incorporación de POFA, ha demostrado tener un potencial significativo para modificar las características del hormigón fresco y endurecido, mediante diseños de mezclas con diferentes proporciones de agua y cemento, la adición de aditivos y volúmenes de agregados gruesos y finos. En el proceso de producción del hormigón y el cemento emiten gases tóxicos de efecto invernadero (GEI), como el dióxido de carbono  $CO_2$ . La extracción de materiales como arena y grava pueden provocar la degradación del medio ambiente, así como provocar erosión en los ecosistemas y que los hábitats se destruyan. La producción de cemento, un componente del hormigón emite dióxido de carbono  $CO_2$  y contribuye al cambio climático. Cuando se habla de la gestión de recursos sostenibles y el desarrollo de opciones eco-amigables, es fundamental para educir la contaminación y el cambio climático, adoptando acciones en el consumo, el transporte, la energía y la gestión de residuo [1].

Las características del hormigón con POFA mezclado con humo de sílice y sílice precipitada como material de reemplazo del cemento Portland, da como resultado el aumento de la resistencia a la compresión, resistencia a la tracción y mejora la porosidad del hormigón, siendo el POFA un sustituto del cemento importante en la fabricación de hormigón [2]. La eliminación de cenizas de residuos agrícolas ha aumentado significativamente en todo el mundo

debido a la rápida implementación de centrales eléctricas basadas en biomasa y conduce a una contaminación grave, sin embargo, la reutilización de las cenizas de residuos agrícolas disponibles localmente es muy limitada en el sector de la construcción [3]. POFA es uno de los subproductos agrícolas y se obtiene de la combustión de residuos y su uso como aditivo mejora las propiedades mecánicas y la durabilidad del hormigón. El POFA de tamaño nano (NPOFA) mejora hasta en un 30% las propiedades mecánicas del hormigón [4].

El mortero de geopolímero de ceniza de palma es un material alternativo que se puede utilizar en materiales de construcción, frente a los efectos de las altas temperaturas, porque contiene una mezcla de geopolímeros consistente en arena, ceniza de palma, solución activadora alcalina (NaOH y Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) como pasta adhesiva para reemplazar el cemento [5]. La factibilidad de utilizar puzolana eco-procesada (EPP), un subproducto industrial del aceite de palma, como reemplazo parcial de las cenizas volantes (FA) en el hormigón geopolímero (GPC); además un subproducto industrial del aceite de palma, el clínker de aceite de palma (POC) puede ser usado como agregado grueso liviano en el GPC basado en EPP [6]. El POFA se ha utilizado ampliamente para sustituir el cemento en la producción de hormigón autocompactante (SCC) para disminuir su costo de producción, peligro para la salud, problemas de consumo de energía y contaminación ambiental causada durante la producción de cemento [7]. La producción de hormigón ecológico ha sido posible gracias a la reutilización de residuos agrícolas e industriales, dando unas características del hormigón espumado liviano (FLM) producido a partir de un agente espumante a base de proteínas e incluye escorias granuladas de alto horno (GGBS), cenizas volantes (FA), cenizas de cáscara de arroz (RHA) y POFA en varios niveles de sustitución (0, 10 %, 20 %, 30 %, 40 %, 50 % y 60 %) del cemento [8].

EL POFA de las palmeras es una adición y se emplea como sustitución del cemento en el hormigón, aunque las pruebas de laboratorio aplicadas a muestras de hormigón son costosas y requieren mucho tiempo, los estudios se han enfocado a modelados y las aplicaciones de aprendizaje automático [9]. El POFA se molen hasta obtener dos finuras diferentes, cenizas gruesas y de alta finura de aceite de palma, con tamaños de partícula medianos de 15,6 y 2,1  $\mu\text{m}$ , respectivamente, para reemplazar el cemento Portland ordinario al 0%, 20% y 40% en peso de aglutinante, utilizando una relación a/c = 0,35 para todas las pastas de cemento mezcladas, obteniendo el aumento de las propiedades mecánicas del hormigón cuando más fino es el POFA [10]. Los residuos de la industria del POFA como aglutinante complementario para la producción de hormigón la resistencia aumenta significativamente, cuando el

POFA cambia su finura, con una composición de carbono no quemado y porcentaje de minerales puzolánicos que conducen a la producción de hormigón de alta resistencia [11].

Adicional a las inquietudes ecológicas, el hormigón tradicional presenta dificultades intrínsecas relacionadas con sus características físicas y mecánicas. La resistencia a la compresión, la durabilidad frente a agentes químicos y ambientales, y la capacidad de resistir cargas extremas son aspectos críticos que pueden afectar la vida útil y la integridad estructural de las construcciones. La investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías y materiales adquieren una importancia para enfrentar estos retos. Una de las áreas de interés emergentes es el estudio sobre el uso de adiciones cementicias alternativas, como el POFA y se perfila como una alternativa prometedora para disminuir la utilización de cemento y atenuar su huella ecológica. La Norma Técnica Peruana E.060 [12], permite la incorporación de materiales cementantes suplementarios, como la ceniza de aceite de palma, siempre que cumplan con los requisitos técnicos establecidos y regula aspectos esenciales del concreto, como su resistencia, durabilidad y trabajabilidad, asegurando que cualquier mezcla modificada mantenga la calidad estructural. Así, el uso de ceniza debe ser validado mediante ensayos de laboratorio. La E.060 garantiza la viabilidad técnica y normativa de propuestas sostenibles en el diseño de mezclas de concreto. La incorporación parcial en la fabricación de hormigón podría tanto incrementar la sostenibilidad como optimizar las características físicas y mecánicas del hormigón [13].

Sin embargo, a pesar de su promesa, la aplicación de la POFA en la industria del hormigón aún está en una etapa temprana de investigación y desarrollo. El presente estudio tiene como objetivo determinar el porcentaje óptimo de POFA como reemplazo parcial del cemento para mejorar la trabajabilidad, la densidad, la absorción, incrementar la resistencia a la compresión y la tracción. Mediante ensayos de laboratorio se busca proporcionar el porcentaje de incorporación de POFA en los diseños de mezclas de hormigón, contribuyendo así a la construcción de infraestructuras sostenibles y eficientes. Este estudio se basa en fuentes internacionales y se centra en la Ceniza de Cáscara de Palma Aceitera (CCPA) como un aditivo para mejorar las propiedades físico y mecánicas del hormigón.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se fundamentó en el método científico deductivo. Inicialmente, se identificaron y definieron con precisión las variables de estudio. Posteriormente, se formularon los objetivos de la investigación, se operacionalizaron las variables para

su medición y análisis, y finalmente, se propuso una potencial solución al problema de investigación planteado. Adicionalmente, la investigación tuvo una orientación aplicada, ya que se propusieron específicamente diferentes porcentajes de sustitución de cemento por Ceniza de Cáscara de Palma Aceitera (POFA). El propósito de esta manipulación fue analizar detalladamente el comportamiento de las propiedades físicas y mecánicas del hormigón resultante. El enfoque metodológico fue cuantitativo, dado que los resultados obtenidos se expresaron en medidas numéricas. Esta cuantificación permitió la aplicación de pruebas estadísticas rigurosas para analizar las diferencias significativas entre los tratamientos con distintos porcentajes de POFA y, de esta manera, determinar la eficacia de los ensayos realizados. El instrumento de recolección de datos fue retroactivo, ya que se recurrió a los formatos de registro preexistentes del laboratorio donde se llevaron a cabo las pruebas de las propiedades del hormigón.

En cuanto al tipo de investigación, esta abarcó aspectos descriptivos, al detallar la problemática estudiada y presentar diversas alternativas de solución; explicativos, al buscar comprender las relaciones causales entre las variables; y correlacionales, al analizar la asociación y el grado de relación entre las variables identificadas. El nivel de la investigación fue descriptivo, puesto que el estudio se centró en representar los resultados empíricos obtenidos del hormigón bajo las diversas condiciones experimentales implementadas a través de ensayos estandarizados. Estos resultados se presentaron de manera clara y concisa mediante tablas y figuras ilustrativas. La investigación adoptó un diseño experimental, caracterizado por la manipulación intencional de la variable independiente, que en este caso fue el porcentaje de POFA utilizada como reemplazo parcial del cemento. El objetivo principal de esta manipulación fue observar y cuantificar los efectos resultantes en la variable dependiente: las propiedades físicas y mecánicas del hormigón. Específicamente, se analizó cómo variaban la resistencia a la compresión, las propiedades de tracción, la densidad, la absorción de agua y la trabajabilidad del hormigón en función de los diferentes porcentajes de sustitución de POFA.

El estudio se desarrolló en un entorno de laboratorio controlado, donde se mantuvieron constantes todas las demás variables que podrían potencialmente influir en los resultados, tales como la humedad, la temperatura y el método de curado del hormigón. Este control riguroso aseguró que cualquier variación observada en las propiedades del hormigón pudiera ser atribuida, con un alto grado de confianza, a la variable manipulada: el porcentaje de POFA. Finalmente, el diseño también puede considerarse longitudinal, dado que se evaluaron

diferentes porcentajes de reemplazo de POFA. Además, la obtención de los datos se realizó de forma primaria, lo que confiere a los resultados del estudio un carácter prospectivo y de cohorte (causa-efecto). Al introducir la causa (reemplazo de cemento por POFA en diferentes proporciones), se analizaron los efectos resultantes sobre las propiedades del hormigón. La metodología empleada incluyó la ejecución de pruebas de laboratorio estandarizadas para la recopilación de datos empíricos detallados sobre las propiedades físicas y mecánicas del hormigón.

La población fue el conjunto total de muestras de hormigón que podrían ser elaboradas con diferentes porcentajes de POFA como reemplazo parcial del cemento. Esta población abarca todas las posibles combinaciones de mezclas de hormigón con diversas proporciones de POFA, bajo diversas condiciones de curado y pruebas [12]. La población incluye:

- Todas las muestras de hormigón elaboradas con diferentes proporciones de POFA con 0%, 10%, 20% y 30% de reemplazo de cemento.
- Las diferentes combinaciones de materiales que pueden ser utilizadas en la mezcla (como distintos tipos de cemento, agregados, aditivos, entre otros).
- Las diversas condiciones de curado a las que pueden ser sometidas las muestras de hormigón.
- Las diferentes propiedades físicas y mecánicas del hormigón que pueden ser medidas (resistencia a la compresión, resistencia a la tracción, densidad, absorción de agua y trabajabilidad).

La muestra se presenta en la tabla 1, considerando que se realizarán tres probetas de hormigón para cada porcentaje de contenido de POFA (0%, 10%, 20%, y 30%):

TABLA 1  
CANTIDAD DE PROBETAS CILÍNDRICAS PARA LA INVESTIGACIÓN.

Porcentaje de POFA (%)	Número de probetas
0%	3
10%	3
20%	3
30%	3

### III. RESULTADOS

#### *Porcentaje óptimo de cenizas de aceite de palma (POFA) como reemplazo parcial del cemento y su influencia en la trabajabilidad del hormigón*

Se muestra en la fig. 1, los resultados obtenidos del presente experimento para ensayo de cono de

Abrams para medir el *slump* con porcentaje de reemplazo del 0%, 10%, 20% y 30% de POFA del peso del cemento. Un reemplazo del 0% de POFA da una consistencia fluida, ya que esa mezcla no presentaba ninguna adicional de POFA, porque disminuye hasta en un 52.63% cuando se incorpora 30% de POFA. Por lo tanto, es necesario el uso de superplastificante o fluidificantes en un porcentaje de 1% en peso del cemento para todos los porcentajes. Por el contrario, un reemplazo del 10%, 20% y 30% da una consistencia plástica ya que el uso de la ceniza tiene una mayor absorción de agua.

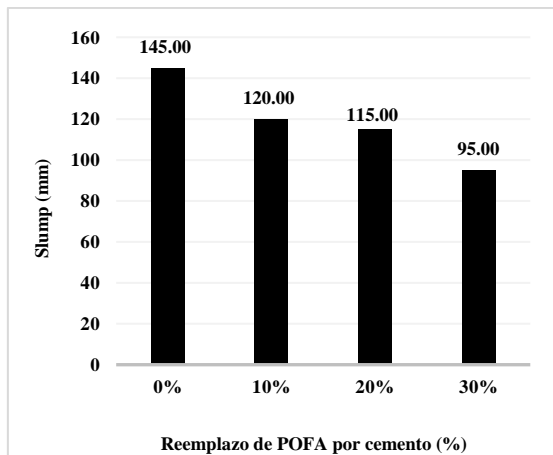


Fig. 1 Resultados del asentamiento para MP, M10%, M20%, M30%.

El reemplazo del 45% de POFA obtuvo un valor de asentamiento máximo de 99,30 mm, lo que representó una mejora del 54,36% en comparación con la mezcla de patrón (que contiene 0 % de POFA). La mezcla patrón mostró un valor de asentamiento más bajo de 64.33 mm. Además, el valor de la caída aumentó en más del 25% con una sustitución del 35% de POFA. Esto se debe al mayor volumen de aglutinante, ya que la gravedad específica del POFA es menor que la del cemento, y el exceso de volumen de aglutinante podría haber proporcionado un mejor recubrimiento, lubricación y llenado de espacios en los agregados, proporcionando así facilidad de movimiento y rodamiento de partículas sin esfuerzo, lo que resulta en una mayor caída dentro de la mezcla del hormigón. Además, la mejora de la trabajabilidad de las mezclas de hormigón con POFA podría estar asociada con una menor inercia de carbono y menores pérdidas por ignición remanentes en POFA, particularmente cuando el porcentaje sustituto de OPC es relativamente alto [14]. El asentamiento aumenta con la adición del porcentaje de Cenizas Combustibles de Aceite de Palma Nano (NPOFA) y que este tiene un papel eficaz en la mejora de la trabajabilidad del hormigón. Este aumento se debe a la gravedad específica del NPOFA es menor que la del cemento, y el exceso de volumen del conglomerante podría haber proporcionado un mejor

recubrimiento, lubricación y llenado de huecos de los agregados [15].

Reemplazar el cemento con POFA generalmente reduce la trabajabilidad del concreto, lo que significa que se vuelve más rígido o menos fluido. Esta reducción en el asentamiento podría indicar que el POFA, debido a sus propiedades físicas y químicas (por ejemplo, mayor área superficial, reacciones puzolánicas), podría estar aumentando la demanda de agua de la mezcla, o simplemente que las partículas son menos lubricantes que el cemento. Si se requiere un determinado asentamiento para una aplicación particular, los diseños de mezcla que incorporan POFA pueden necesitar ajustes, como aumentar la relación agua-aglutinante (que puede afectar la resistencia) o usar superplastificantes para mantener la trabajabilidad deseada. En aplicaciones que requieren alta trabajabilidad (p. ej., hormigón autocompactante), un mayor porcentaje de sustitución de POFA podría resultar difícil sin otras modificaciones. En aplicaciones donde una mezcla más rígida es aceptable o incluso deseable, la sustitución de POFA podría ser viable.

#### *Porcentaje óptimo de cenizas de aceite de palma (POFA) como reemplazo parcial del cemento y su influencia en la resistencia a la compresión del hormigón*

Se muestra en la fig. 2, los resultados obtenidos de la resistencia a la compresión con porcentaje de reemplazo del 0%, 10%, 20% y 30% de POFA, del peso específico del cemento.

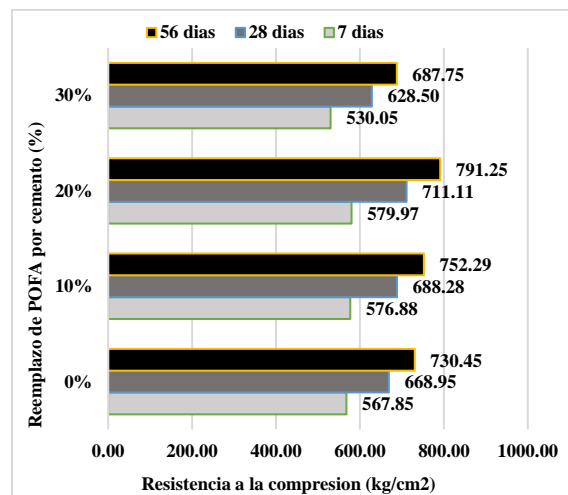


Fig. 2 Resultados resistencia compresión MP, M10%, M20%, M30% a los 28 días.

Los resultados mostrados en la fig. 2, indican que un reemplazo óptimo de POFA es 20% para conseguir el aumento de la resistencia a la compresión del 8.32% con respecto al hormigón patrón del reemplazo del 0% de POFA, así también se induce de la fig. 2, un reemplazo del 10%, aumenta

la resistencia a la compresión, pero en un menor porcentaje con respecto al hormigón patrón. Por el contrario, el reemplazo de POFA a un 30% disminuye la resistencia debido a que, al poseer menor cantidad de cemento con respecto a los otros porcentajes de reemplazo, se da una disminución en la reacción puzolánica en la formación de geles de silicato de calcio que contribuye en la resistencia del hormigón. Un mayor porcentaje de reemplazo NPOFA, conduce a un aumento en la resistencia a la compresión a mayor tiempo de curado, teniendo en cuenta la proporción de los materiales como la relación  $a/c = 0.35$ , el tamaño máximo nominal del agregado grueso de 3/8" y el uso de superplastificante en un porcentaje de 1% del peso específico de cemento, se considera un tratamiento adicional al POFA, para eliminar partículas de carbono obteniendo un material más fino y de esta manera producir un mayor porcentaje de sílice para que brinde una mejor actividad puzolánica en la formación de geles que aporten a la resistencia al hormigón [16].

El reemplazo del 10% y 20% del peso específico del cemento, influye en la resistencia a la compresión debido a que el POFA al ser un material más fino tiene la capacidad de rellenar los micro huecos, así como la reacción puzolánica del POFA ayuda a aumentar la resistencia a edades posteriores a los 28 y 56 días. Por el contrario, un reemplazo del 30% disminuye la resistencia a la compresión al poseer menor cantidad de cemento y la formación de geles de hidrato de silicato de calcio es menor afectando la resistencia a la compresión. Así también influye en la proporción de los materiales como la relación  $a/c = 0.35$ , el tamaño máximo nominal del agregado grueso de 3/4" y el uso de policarboxilato en un porcentaje de 1.20% a 1.58% para los diferentes porcentajes de POFA [16].

Un reemplazo del 30%, 50% y 70% de Ceniza de Combustible de Aceite de Palma Tratada Modificada (MT-POFA), mostraron una reducción en la resistencia a la compresión a una edad temprana. La sustitución de una gran cantidad de cemento por MT-POFA, que es un material puzolánico de velocidad lenta conduce a la reducción de los productos de hidratación. La lenta reacción a un alto nivel de reemplazo se atribuyó a la disminución del pH del hormigón debido a la reducción de hidróxido de calcio, reduciendo así la solubilidad de los silicatos amorfos y ralentizando así la velocidad de reacción. La sílice y el aluminio de MT-POFA reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio (CH), que resulta de la hidratación primaria del cemento para formar CASH. Este proceso mejora la microestructura del hormigón y aumenta su resistencia a la compresión. Así también influye la proporción de los materiales como la relación  $a/c = 0.35$ , el Tamaño Máximo Nominal (TMN) del

agregado grueso de 1/2" y el uso de superplastificante de 1.30% en todos los porcentajes de MT-POFA [17].

El estudio sugiere que la ceniza de aceite de palma (POFA) puede utilizarse eficazmente como sustituto parcial del cemento para mejorar la resistencia a la compresión del hormigón, especialmente en etapas posteriores. Se identificó un nivel óptimo de sustitución del 20%, que produce las resistencias más altas en todos los períodos de curado. Sin embargo, superar este nivel óptimo (p. ej., un 30% de sustitución) puede provocar una disminución de la resistencia a la compresión, lo que indica una limitación a su incorporación beneficiosa. Estos hallazgos son valiosos para la producción sostenible de hormigón, ya que la POFA es un material de desecho que puede contribuir a mejorar las propiedades del material y, al mismo tiempo, reducir el consumo de cemento.

### Porcentaje óptimo de cenizas de aceite de palma (POFA) como reemplazo parcial del cemento y su influencia en la resistencia a la tracción del hormigón

Se muestran en la fig. 3, los resultados obtenidos del presente experimento para ensayo de la resistencia a la tracción con porcentaje de reemplazo del 0%, 10%, 20% y 30% de POFA del peso específico del cemento.

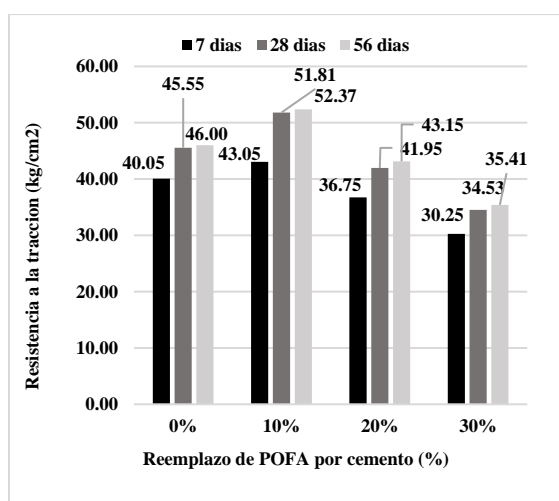


Fig. 3 Resultados de resistencia tracción MP, M10%, M20%, M30% a los 28 días.

De los resultados mostrados en la fig. 3, se observa que un reemplazo del 10% de POFA es el porcentaje óptimo para conseguir el aumento de la resistencia a la tracción hasta en un 16.02% con respecto al hormigón patrón del reemplazo del 0% de POFA. Por el contrario, el reemplazo de un 20% y 30% de POFA disminuye la resistencia a la tracción del hormigón. Un reemplazo del 10% de POFA aumenta la resistencia a la tracción con respecto a la muestra patrón del 0% de POFA, esto está asociado

con la unión de los agregados y compuestos hidratados además del método de curado aplicado. Por el contrario, una sustitución del 20% y 30% de POFA disminuye la resistencia a la tracción por el bajo contenido cementante, el cual resulta en la incapacidad del agregado para unirse con la pasta, así como la proporción de los materiales que se consideran, relación  $a/c = 0.45$ , el agregado grueso está conformado por clinker de aceite de palma y el uso de superplastificante en 1% para todos porcentajes de POFA [18]. Un reemplazo del 15% de POFA aumenta la resistencia a la tracción con respecto a la muestra patrón del 0% de POFA. Por el contrario, una sustitución del 25%, 35% y 45% de POFA disminuye la resistencia a la tracción por la menor cantidad de cemento, así como la proporción de los materiales que se consideran, relación  $a/c = 0.25$ , tamaño máximo nominal del agregado grueso de 1/2" y el uso de superplastificante en 3.7 % para todos porcentajes de POFA [14].

La fig. 4 destaca que el porcentaje óptimo de reemplazo de POFA para la resistencia a la tracción difiere del de la resistencia a la compresión. Un reemplazo del 10% de cemento con POFA produce la mayor resistencia a la tracción en este estudio, superando significativamente a la mezcla de control y a los mayores porcentajes de reemplazo. Por el contrario, un reemplazo del 20% y el 30% de POFA impacta negativamente la resistencia a la tracción, resultando en valores más bajos que los del hormigón simple. Esto enfatiza la importancia de optimizar el nivel de reemplazo de POFA en función de la propiedad mecánica específica (resistencia a la compresión vs. resistencia a la tracción) que se busca en las aplicaciones de hormigón.

**Porcentaje óptimo de cenizas de aceite de palma como reemplazo parcial del cemento y su influencia en la densidad del hormigón.**

De los resultados obtenidos para el ensayo de la densidad, se muestran en la fig. 4 las variaciones obtenidas a los 28 días. Con una relación  $a/c = 0.35$ , TMN de agregado grueso 3/4" y con el aditivo superplastificante de tercera generación que es un fuerte reductor de agua que aumenta la cohesión incorporando un 1.135% a la muestra patrón presentando una densidad más alta dando como resultado 2596  $kg/m^3$ .

La proyección de datos al reemplazar parcialmente un 0%, 15% y 30% de Cenizas Combustibles Ultrafinas de Aceite de Palma (UPOFA), indica que la densidad secada al horno a los 28 días disminuye respecto al hormigón patrón con una relación  $a/c = 0.42$  con el 0% de reemplazo parcial de UPOFA y la densidad obtenida es 2360  $kg/m^3$ ; al incrementar a un 10% de reemplazo parcial de UPOFA la densidad obtenida es 2353  $kg/m^3$  disminuyendo 1.00%; siguiendo con el incremento al

20% de reemplazo parcial de UPOFA la densidad obtenida es 2342  $kg/m^3$  disminuyendo 0.99%, finalmente la densidad más baja es obtenida con un reemplazo parcial del 30% de UPOFA siendo 2327  $kg/m^3$  disminuyendo un 0.99% [19].

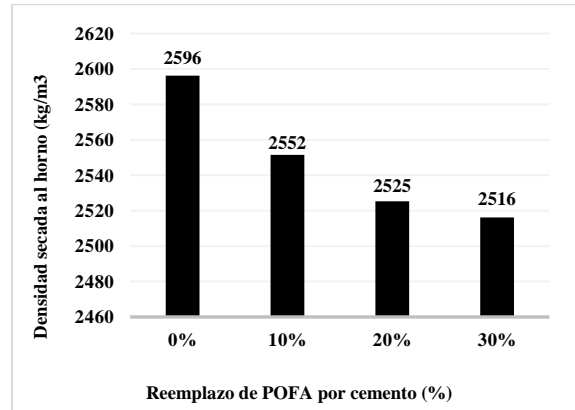


Fig. 4 Resultados de densidad MP, M10%, M20%, M30% a los 28 días.

La densidad secada al horno a los 28 días disminuye respecto a la muestra patrón con una relación  $a/c = 0.35$ , TMN de agregado grueso 3/8" y se utilizó un aditivo superplastificante al 1% con el 0% de reemplazo parcial de NPOFA, la densidad obtenida es 2368  $kg/m^3$ ; al incrementar a un 10% de reemplazo parcial de NPOFA la obtenida es 2348  $kg/m^3$  disminuyendo 0.99%; siguiendo con el incremento al 20% de reemplazo parcial de NPOFA la densidad obtenida es 2335  $kg/m^3$  disminuyendo 0.99%; finalmente la densidad más baja es obtenida con un reemplazo parcial del 30% de NPOFA siendo 2321  $kg/m^3$  disminuyendo un 0.98%. La densidad de la mezcla de hormigón depende principalmente de la densidad de los materiales que la constituyen, especialmente del árido. La menor densidad del hormigón POC se debe a la menor densidad aparente del POC en comparación con los agregados gruesos normales [19].

En resumen, la fig. 4 indica claramente que la incorporación de POFA como sustituto del cemento reduce la densidad del hormigón en horno. Esto probablemente se deba a la menor gravedad específica del POFA. Esta propiedad podría ser beneficiosa para reducir las cargas muertas estructurales, pero sus implicaciones para otras propiedades del hormigón (como la resistencia y la durabilidad) deben considerarse junto con otros datos experimentales.

**Porcentaje óptimo de cenizas de aceite de palma (POFA) como reemplazo parcial del cemento influye en la absorción del agua del hormigón**

De los resultados obtenidos para la prueba de absorción de agua, se muestran en la fig. 5, las variaciones obtenidas a los 7 días, 28 días y 56 días

con una relación a/c = 0.35, TMN de agregado grueso 3/4" y con el aditivo superplastificante con un 1.135%. En la fig. 5, se observa que la absorción de agua a los 7 días aumenta al incrementar el 10%, 30% y disminuye al incrementar el 20% de POFA, a los 28 días aumenta al incrementar el porcentaje POFA, finalmente a los 56 días aumenta al incrementar el 10%, 30% y disminuye al incrementar el 20% de POFA. Siendo un hormigón normal la absorción de agua no puede ser mayor a 5%; ya que, valores superiores pueden indicar una mayor porosidad, lo que podría afectar la durabilidad. Del análisis anterior se observa, cuando se incorpora un 30% de POFA la absorción aumenta un 17.82% con respecto al hormigón patrón.

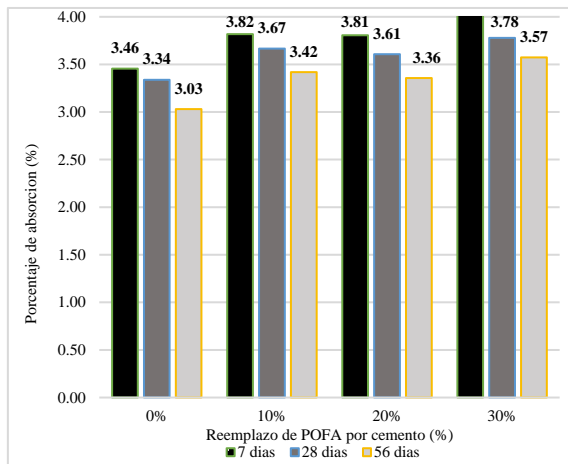


Fig. 5 Resultados de absorción MP, M10%, M20%, M30% a los 28 días.

La absorción de agua es importante para determinar la capacidad del hormigón para resistir las condiciones ambientales, mientras tanto, la mezcla que contiene 30% de ceniza de combustible de aceite de palma ultrafina (UPOFA) y 100% de *palm oil clinker* (POC), registra la mayor absorción de agua durante todos los días en que se realiza el curado [19]. La absorción de agua a los 7 días, 28 días y 56 días respecto al hormigón patrón con una relación a/c = 0.35, TMN de agregado grueso 3/8" y utilizando un aditivo superplastificante al 1.0%, en los primeros días ilustran que NPOFA tiene un papel eficaz para reducir la absorción de agua. Sin embargo, todas las muestras de hormigón en este estudio tienen una absorción de agua menor al 5% [16]. La proyección de datos en el reemplazo parcial de un 0%, 10%, 20% y 30%, indica la absorción de agua a los 28 días y 56 días respecto a la muestra patrón con una relación a/c = 0.35. El bajo rango de absorción de agua se obtuvo en el presente estudio debido a la reducida porosidad permeable y la limitada conectividad de los poros en los hormigones. La absorción de agua de hormigón autocompactante de alta resistencia (SCHSC) aumentó con una mayor relación a/c. El nivel más bajo de absorción de agua se produjo con un contenido de POFA del 20%. Esta reducción en la

absorción de agua se atribuye principalmente a la reducción de la porosidad permeable del hormigón con un contenido de POFA del 20%. Sin embargo, la absorción de agua con 30% de POFA aumentó ligeramente en comparación con el hormigón patrón [16].

La fig. 5 indica que la incorporación de POFA como sustituto parcial del cemento generalmente aumenta la absorción de agua del hormigón en todas las edades y porcentajes de reemplazo evaluados. La absorción tiende a aumentar con un mayor contenido de POFA. Esto sugiere que el POFA afecta negativamente la densificación de la estructura porosa del hormigón en relación con el transporte de agua, lo que podría comprometer su durabilidad a largo plazo en entornos donde la penetración de agua es un problema. Si bien el POFA ofrece ventajas en términos de resistencia y sostenibilidad, esta compensación con la absorción de agua es un factor crítico para evaluar en el diseño de mezclas de hormigón.

**Discusión.** - De los resultados obtenidos en los ensayos de asentamiento de las mezclas de hormigón, sostiene una mejora de la trabajabilidad con el reemplazo parcial en porcentajes de POFA por cemento. Según lo presentado fig. 1, se demuestra que a mayor porcentaje de reemplazo de POFA, disminuye la trabajabilidad con respecto a la muestra patrón a pesar de considerar el uso de 1.135% de superplastificante para todas las muestras. [14] obtienen asentamientos que se incrementan a mayor sustitución de porcentajes de POFA los cuales se convierten de consistencia seca a plástica, debido a su relación a/c = 0.25 y el uso del tamaño máximo nominal de 1/2" y del uso de 3.7% de superplastificante en todas sus muestras. Así también [19] indican que a mayor porcentaje de NPOFA, conduce a un aumento del asentamiento, también convirtiéndose de consistencia seca a plástica con un máximo de 3.5", esto es debido a su relación a/c = 0.35 y el uso del tamaño máximo nominal de 3/8" y un menor porcentaje de uso de superplastificante de 1% del peso específico del cemento.

Los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a la compresión indican una mejora de la resistencia a compresión del hormigón a mayor sustitución de porcentaje de POFA. La fig. 2, muestra el aumento de la resistencia a la compresión con respecto al hormigón patrón en la sustitución máxima del 20% de reemplazo de POFA, así también se aprecia que, a mayor tiempo de curado, aumenta la resistencia a la compresión. Para la obtención de estos resultados se consideró una relación a/c = 0.35, el uso del TMN de 3/4" del agregado grueso y superplastificante de 1.14% en peso del cemento. Demuestran que a mayor porcentaje de reemplazo con NPOFA se da un incremento de la resistencia a la compresión en todo el tiempo de curado, utilizando

una relación  $a/c = 0.35$ , tamaño máximo nominal del agregado grueso de 3/8" y superplastificante en 1% del peso específico del cemento para todos los porcentajes. Además, de considerar un tratamiento adicional de POFA para eliminar partículas de carbono y obtener un material más fino, con el fin de aumentar el contenido de sílice y mejorar la actividad puzolánica, lo que contribuye a una mayor resistencia mediante la formación de geles [19].

Un reemplazo del 10% y 20% del peso del peso específico del cemento con POFA mejora la resistencia a la compresión, ya que el POFA, al ser un material más fino, puede llenar los micro huecos y su reacción puzolánica contribuye a la resistencia con el tiempo, igualmente, la proporción de los materiales, como una relación  $a/c = 0.35$ , el TMN del agregado grueso de 3/4" y el uso de policarboxilato en un rango de 1.20% a 1.58% según el porcentaje de POFA, también influyen en el resultado. En cambio, un reemplazo del 30% reduce la resistencia a la compresión debido a la menor cantidad de cemento y a una menor formación de geles de hidrato de silicato de calcio, lo que afecta negativamente a la resistencia [17]. Demuestran que un reemplazo del 10% y 20% de MT-POFA, aumenta la resistencia a la compresión, en donde influye la proporción de materiales, como una relación  $a/c = 0.35$ , un tamaño máximo nominal del agregado grueso de 1/2" y uso de superplastificante del 1.30% del peso específico del cemento [16].

Los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a la tracción indican un incremento de la resistencia a un 10% de sustitución de porcentaje de POFA. En la fig. 3 se muestra los valores de los ensayos, donde se visualiza un aumento del 13.83% adicional al hormigón patrón. Un reemplazo del 10% de POFA aumenta la resistencia a la tracción con respecto al hormigón patrón del 0% de POFA, esto se debe a la mejor adhesión entre los agregados y los compuestos hidratados, así como al método de curado empleado. Sin embargo, cuando se reemplaza el 20% y 30% de POFA, la resistencia a la tracción disminuye debido al bajo contenido de material cementante, que impide que el agregado se una adecuadamente con la pasta. Además, la proporción de los materiales, con una relación  $a/c = 0.45$ , el agregado grueso compuesto por *clinker* de aceite de palma y el uso de superplastificante en 1% en todas las mezclas con POFA, también influyen en esta disminución [18]. Un reemplazo del 15% de POFA mejora la resistencia a la tracción con respecto a la muestra patrón del 0% de POFA. En cambio, cuando se sustituyen el 25%, el 35% o el 45% de POFA, la resistencia a la tracción disminuye debido a la reducción en la cantidad de cemento. Esta reducción se ve afectada también por la proporción de materiales, como la relación  $a/c = 0.25$ , el TMN del agregado grueso de 1/2", y el uso de un

superplastificante al 3.7% en todas las mezclas con POFA [14].

En la fig.4, muestra los resultados con la incorporación de POFA como reemplazo del cemento en un 10%, 20% y 30%, indican que a mayor incremento de los porcentajes de POFA la densidad disminuye. Estos resultados están en concordancia con los estudios de [19], que fueron obtenidos a los 28 días, y utilizaron una relación  $a/c = 0.42$ , además de utilizar un aditivo superplastificante al 1% para ayudar a la trabajabilidad del hormigón, estos resultados muestran que mientras aumenta el porcentaje de POFA la densidad disminuye. Además, [19], realizaron el reemplazo del 10%, 20% y 30% de NPOFA con una relación  $a/c = 0.35$  y un aditivo superplastificante al 1%, sus resultados reafirman que a mayor incremento de NPOFA la densidad disminuye. En la fig. 5, muestra los resultados con la aplicación de POFA como reemplazo del cemento en un 10%, 20% y 30%, aumentando la absorción de agua. Estos resultados están en concordancia con los estudios de [19], que fueron obtenidos a los 7 días, 28 días y 56 días, con una relación  $a/c = 0.42$ , además de utilizar un aditivo superplastificante al 1%. Mientras que, [15] obtienen resultados que muestran que a mayor incremento de NPOFA la absorción de agua disminuye. Según [16] concuerda con los resultados, ya que en un 20% la absorción de agua disminuye.

La resistencia a la tracción por división obtenida para el control fue de 0.90 N/mm<sup>2</sup> y 1.09 N/mm<sup>2</sup> y la dosis de fibra al 0.25% fue de 1.23 N/mm<sup>2</sup> y 1.65 N/mm<sup>2</sup> después de un período de curación de 7 y 28 días respectivamente. El uso del POFA en el hormigón ha mostrado algunos resultados alentadores cuando se utiliza como material aditivo en el hormigón. A partir de este estudio, se ha descubierto que la relación fibra/cemento del 0,25% produjo el mayor valor de resistencia [20] El POFA como sustituto del cemento también demuestra una mayor resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, resistencia a la tracción con la incorporación de un 20% y 30% de POFA [8].

El mezclado con humo de sílice y sílice precipitada como material de reemplazo del cemento Portland Composite, es una alternativa en conjunto con el humo de sílice comercial para mejorar las propiedades del hormigón con POFA [21]. Los efectos de las temperaturas elevadas que oscilan entre 200 y 800 °C, demuestran que el reemplazo completo de la arena con el clinker de aceite de palma mejora la resistencia a la compresión en más del 50%, obteniendo mayores resistencias a la flexión y a la tracción [2]. La temperatura óptima de calcinación para las cenizas de aceite de palma y las cenizas de cáscara de arroz es de 600-700 °C, con un mayor contenido de sílice en la ceniza de cáscara de arroz en comparación con el POFA y causa una mayor reactividad con un reemplazo óptimo del 10% y 20%

tanto para las cenizas de cáscara de arroz como para los hormigones incorporados con POFA. Se observa un rendimiento superior contra la penetración de iones de cloruro, el ataque de ácidos y sulfatos para los hormigones mezclados con cenizas de aceite de palma y cenizas de cáscara de arroz en comparación con el hormigón convencional [3].

El aumento de la temperatura obtuvo valores de resistencia a la compresión a 400 °C, mientras que fluctuó bruscamente en el rango de 400-600 °C, 600-800 °C y 800-1000 °C para las microestructuras con hidrato de silicato de calcio (C-S-H) en fases distintivas, resultando hormigones que puedan ser aplicadas en estructuras de alta resistencia [7]. Los resultados sobre la variación de temperatura del valor máximo de resistencia a la compresión ocurrieron a 200 °C con una variación del cemento del 20% y los resultados de la resistencia mínima a la compresión ocurrieron a 100 °C para una variación del cemento del 10% y con la composición de los componentes del geopolímero de ceniza de palma que afectaría las altas temperaturas, lo que produce cambios en las características físicas del mortero de geopolímero de ceniza de palma [5].

Las contribuciones positivas del POFA hacia la trabajabilidad, resistencia y permeabilidad (gas y agua, penetración de cloruro y migraciones). A la edad de 180 días, con un contenido del 20%, 40% y 60% de UPOFA mejoraron los resultados en las propiedades mecánicas, obteniendo una resistencia a la compresión de 108.6, 114.4 y 112.4 MPa, respectivamente, frente a los máximos de 106.5 MPa y 105.1 MPa en el hormigón de alta resistencia [11]. Las cáscaras de aceite de palma (POS), escoria de alto horno granulada molida (GGBS) y POFA se reemplazan con agregados gruesos y cemento hasta en un 50% y todas las mezclas de hormigón se estudian con la acción del fuego para ver su influencia en sus propiedades físicas y mecánicas [2].

## CONCLUSIONES

La utilización de ceniza de aceite de palma (POFA) en el diseño de mezclas de hormigón representa una estrategia para el desarrollo de hormigones sostenibles, al emplear este residuo agroindustrial como material cementante suplementario. La incorporación de POFA influye positivamente en las propiedades físico-mecánicas del hormigón, mejorando la resistencia a largo plazo y la durabilidad, a la vez que contribuye a la reducción de la huella de carbono. Adicionalmente, optimiza el comportamiento del concreto frente a agentes agresivos, promoviendo construcciones más resilientes y económicas. En cuanto a la trabajabilidad del hormigón con diferentes niveles de reemplazo de POFA, se sugiere el uso de un superplastificante en una proporción superior al 1.14% del peso del cemento para mezclas con una

relación agua/cemento de 0.35. Esto permite mantener una consistencia trabajable en reemplazos que se encuentren entre el 8% y el 12%. Es necesario el control de calidad de la POFA, siendo importante que su finura sea semejante a la del cemento para optimizar las propiedades físicas y mecánicas del hormigón resultante. Los resultados obtenidos indican que un porcentaje de reemplazo del 20% de POFA incrementa la resistencia a la compresión en un 2.13%, 6.30% y 8.32% con respecto al hormigón patrón, a las edades de 7, 28 y 56 días, respectivamente. La resistencia a la tracción máxima, lograda con un reemplazo del 10% de POFA, fue un 7.49%, 13.83% y 13.80% superior al hormigón patrón a los 7, 28 y 56 días, respectivamente. La densidad del hormigón endurecido disminuyó al reemplazar un 10%, 20% y 30% de POFA en comparación con el hormigón patrón. Por otro lado, se observó un aumento en la absorción de agua en las muestras con POFA a los 7, 28 y 56 días en relación con el hormigón patrón, aunque esta absorción tiende a disminuir con un mayor tiempo de curado. Finalmente, el asentamiento del hormigón disminuye al aumentar el porcentaje de reemplazo de POFA, transitando de una consistencia fluida a una más seca.

## AGRADECIMIENTO

A las Universidades Ricardo Palma (URP) y Santiago Antúñez de Mayolo (UNASAM) por los asesores especialistas y metodólogos que participaron en la elaboración del presente artículo.

## REFERENCIAS

- [1] Abu Aisheh, Y. I. (2023). Palm oil fuel ash as a sustainable supplementary cementitious material for concrete: A state-of-the-art review. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01770. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2022.E01770>.
- [2] Monita Olivia, M Aldi Maulidi, Fadhlurrahman, Gunawan Wibisono (2024). Characteristics of palm oil fuel ash concrete admixed with precipitated silica and silica fume. *Cleaner Engineering and Technology*, Volume 19, 2024, 100738, ISSN 2666-7908, <https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.100738>. <https://doi.org/10.1016/J.CLET.2024.100738>
- [3] Santhosh, K. G., Subhani, S. M., & Bahurudeen, A. (2022). Recycling of palm oil fuel ash and rice husk ash in the cleaner production of concrete. *Journal of Cleaner Production*, 354, 131736. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.131736>
- [4] Wi, K., Wang, K., Han, J., Lee, H. S., & Lim, S. (2022). Effects of nano palm oil fuel ash on hydration of cement under the accelerated carbonation curing. *Materials Letters*, 327, 132935. <https://doi.org/10.1016/J.MATLET.2022.132935>
- [5] Syarif, H. A., Antonius, Setiawan, P., Edison, B., Hidayat, A., & Rismalinda. (2024). Compressive Strength of Palm Ash Geopolymer Mortar against High Temperatures. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1321(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1321/1/012033>

- [6] Mahamat Ahmat, A., Johnson Alengaram, U., Fazaulnizam Shamsudin, M., Mahmoud Alnahhal, A., Shazril Idris Ibrahim, M., Ibrahim, S., & Rashid, R. S. M. (2023). Assessment of sustainable eco-processed pozzolan (EPP) from palm oil industry as a fly ash replacement in geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 387, 131424. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.131>
- [7] Mujedu, K. A., Ab-Kadir, M. A., Sarbini, N. N., & Ismail, M. (2021). Microstructure and compressive strength of self-compacting concrete incorporating palm oil fuel ash exposed to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 274, 122025. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.122025>
- [8] Mydin, M. A. O., Hamah Sor, N., Althoey, F., Özkılıç, Y. O., Abdullah, M. M. A. B., Isleem, H. F., Deifalla, A. F., & Tawfik, T. A. (2023). Performance of lightweight foamed concrete partially replacing cement with industrial and agricultural wastes: Microstructure characteristics, thermal conductivity, and hardened properties. *Ain Shams Engineering Journal*, 14(11), 102546. <https://doi.org/10.1016/J.ASEJ.2023.102546>
- [9] Kellouche, Y., Tayeh, B. A., Chetbani, Y., Zeyad, A. M., & Mostafa, S. A. (2024). Comparative study of different machine learning approaches for predicting the compressive strength of palm fuel ash concrete. *Journal of Building Engineering*, 88, 109187. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2024.109187>
- [10] Kroehong, W., Sinsiri, T., Jaturapitakkul, C., & Chindaprasirt, P. (2011). Effect of palm oil fuel ash fineness on the microstructure of blended cement paste. *Construction and Building Materials*, 25(11), 4095–4104. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2011.04.062>
- [11] Zeyad, A. M., Megat Johari, M. A., Tayeh, B. A., & Yusuf, M. O. (2016). Efficiency of treated and untreated palm oil fuel ash as a supplementary binder on engineering and fluidtransport properties of high-strength concrete. *Construction and Building Materials*, 125, 1066–1079. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.08.065>
- [12] Norma Técnica de Edificación E.060 (2019). *Concreto armado. Reglamento Nacional de Edificaciones*. <https://www.gob.pe/institucion/vivienda/informes-publicaciones/2309793-reglamento-nacional-de-edificaciones-rne>
- [13] Hosen, M. A., Shammam, M. I., Shill, S. K., Jumaat, M. Z., Alengaram, U. J., Ahmmad, R., Althoey, F., Islam, A. B. M. S., & Lin, Y. (2021). Investigation of structural characteristics of palm oil clinker based high-strength lightweight concrete comprising steel fibers. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 6736–6746. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2021.11.105>
- [14] Hasan, N. M. S., Sobuz, M. H. R., Shaurdho, N. M. N., Meraz, M. M., Datta, S. D., Aditto, F. S., Kabbo, M. K. I., & Miah, M. J. (2023). Eco-friendly concrete incorporating palm oil fuel ash: Fresh and mechanical properties with machine learning prediction, and sustainability assessment. *Heliyon*, 9(11), e22296. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2023.E22296>
- [15] Hamada, H. M., Yahaya, F. M., Muthusamy, K., Jokhio, G. A., & Humada, A. M. (2019). Fresh and hardened properties of palm oil clinker lightweight aggregate concrete incorporating Nano-palm oil fuel ash. *Construction and Building Materials*, 214, 344–354. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.04.101>
- [16] Salam, M. A., Safiuddin, M., & Zamin Jumaat, M. (2018). Durability Indicators for Sustainable Self-Consolidating High-Strength Concrete Incorporating Palm Oil Fuel Ash. <https://doi.org/10.3390/su10072345>
- [17] Alsubari, B., Shafiqh, P., Ibrahim, Z., Alnahhal, M. F., & Jumaat, M. Z. (2018). Properties of eco-friendly self-compacting concrete containing modified treated palm oil fuel ash. *Construction and Building Materials*, 158, 742–754. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.09.174>
- [18] Muthusamy, K., Mirza, J., Zamri, N. A., Hussin, M. W., Abdul Majeed, A. P. P., Kusbiantoro, A., & Albshir Budiea, A. M. (2019). Properties of high strength palm oil clinker lightweight concrete containing palm oil fuel ash in tropical climate. *Construction and Building Materials*, 199, 163–177. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.11.211>
- [19] Hamada, H. M., Al-Attar, A. A., Tayeh, B., Bin Mat Yahaya, F., & Abu Aisheh, Y. I. (2023). Optimising concrete containing palm oil clinker and palm oil fuel ash using response surface method. *Ain Shams Engineering Journal*, 14(10). <https://doi.org/10.1016/J.ASEJ.2023.102150>
- [20] Amartey, B. H. S., Kumator, T. J., Amartey, Y. D., & Ali, A. (2023). The Use of Oil Palm Fibre as an Additive in Concrete. *Materials Today: Proceedings*, 86(C), 111–115. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2023.03.820>
- [21] Olivia, M., Maulidi, M. A., Fadhlurrahman, & Wibisono, G. (2024). Characteristics of palm oil fuel ash concrete admixed with precipitated silica and silica fume. *Cleaner Engineering and Technology*, 19. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.100738>
- [22] Jagarapu, D. C. K., & Eluru, A. (2019). Experimental analysis of light weight fiber reinforced concrete by incorporating palm oil shells. *Materials Today: Proceedings*, 19, 850–858. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2019.08.161>