

Reutilización sostenible de residuos agroindustriales en ladrillos de cemento ecológico*

A Sustainable Reuse of Agro-Industrial Wastes into Green Cement Bricks

CITACIÓN: Chin, W. Q., Lee, Y. H., Amran, M., Fediuk, R., Vatin, N., Kueh, A. B. H. & Lee, Y. Y. (2023). Reutilización sostenible de residuos agroindustriales en ladrillos de cemento ecológico (Traductor Arenas, C.). *Palmas*, 44(2), 80-103.

NOTA DEL EDITOR: MDPI se mantiene neutral con respecto a las reclamaciones jurisdiccionales en los mapas publicados y las afiliaciones.

PALABRAS CLAVE: Residuos agroindustriales, POFA, Cuesco de palma de aceite, Polvo de cantera, Carbonato de calcio, Ladrillo.

KEYWORDS: Agro-industrial waste, POFA, Oil palm shell, Quarry dust, Calcium carbonate, Brick.

* Traducido del original A Sustainable Reuse of Agro-Industrial Wastes into Green Cement Bricks. *Materials* 2022, 15, 1713. <https://doi.org/10.3390/ma15051713>

Editores académicos: F. Pacheco Torgal y P. J. Sánchez-Soto.

Derechos de autor: © 2002 por los autores. Licenciatario MDPI, Basilea, Suiza. Este artículo es de acceso abierto y se distribuye de acuerdo con los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Attribution (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Resumen

La fabricación de ladrillos suele consumir una cantidad relativamente alta de recursos naturales. Para reducir la huella de carbono en la industria que se encarga de su producción, la re-

CHIN, WEI QUAN

Departamento de Ingeniería Civil y de la Construcción, facultad de Ingeniería y Ciencia, Curtin University Malaysia, CDT 250, Miri 98009, Sarawak, Malasia.

LEE, YEONG HUEI

Departamento de Ingeniería Civil y de la Construcción, facultad de Ingeniería y Ciencia, Curtin University Malaysia, CDT 250, Miri 98009, Sarawak, Malasia.

AMRAN, MUGAHED*

Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Prince Sattam Bin Abdulaziz, Alkharj 16273, Arabia Saudí. Departamento de Ingeniería Civil, facultad de Ingeniería e Informática, Universidad de Amran, Amran 9677, Yemen.

*Autor para correspondencia: m.amran@psau.edu.sa

FEDIUK, ROMAN

Instituto Politécnico, Universidad Federal del Lejano Oriente, 690922 Vladivostok, Rusia; fedyuk.rs@dvvf.ru. Universidad Politécnica de San Petersburgo Pedro el Grande, 195251 San Petersburgo, Rusia.

VATIN, NIKOLAI

Universidad Politécnica de San Petersburgo Pedro el Grande, 195251 San Petersburgo, Rusia; vatin@mail.ru

KUEH, AHMAD BENG HONG

Departamento de Ingeniería Civil, facultad de Ingeniería e Informática, Universidad de Amran, Amran 9677, Kota Samarahan 94300, Sarawak, Malasia; kbhahmad@unimas.my (A. B. H. K.)

LEE, YEE YONG

Departamento de Ingeniería Civil, facultad de Ingeniería e Informática, Universidad de Amran, Amran 9677, Kota Samarahan 94300, Sarawak, Malasia; yylee@unimas.my (Y. Y. L.)

utilización de residuos industriales en la fabricación de ladrillos sostenibles es una tendencia reciente en la aplicación y la investigación. Los residuos locales como el cuesco de palma de aceite (OPS por sus siglas en inglés - *oil palm shell*), la ceniza de caldera de aceite de palma (POFA por sus siglas en inglés - *palm oil fuel ash*) y el polvo de cantera (QD por sus siglas en inglés - *quarry dust*) se producen anualmente de forma masiva en los países exportadores de aceite de palma. Además, el QD de las industrias mineras es peligroso tanto para la calidad del agua como del aire. Para mejorar la gestión de los residuos y avanzar hacia la sostenibilidad, habría que darles una segunda vida como materiales de construcción . Por lo tanto, este artículo investiga la posibilidad de incorporar residuos agroindustriales a la mezcla de ladrillos, examinando sus propiedades mediante varias pruebas normalizadas. Para el diseño de la mezcla se consideran experimentalmente un reemplazo del 100 % del agregado grueso con OPS, un reemplazo del 20 % del cemento con POFA, 20 % del peso de cemento de piedra caliza como aditivo y un reemplazo del 0 al 50 % del agregado fino con QD. La mezcla óptima de estos residuos se determina preliminarmente centrándose en la alta resistencia a la compresión como indicador. Otros análisis incluyen la resistencia a la rotura, la tracción y la flexión, la absorción de agua y las pruebas de eflorescencia. Aunque el ladrillo de cemento que incorpora residuos agroindustriales tiene una relación de resistencia a peso 18 % más baja en comparación con el ladrillo convencional, se observa que tiene un mejor desarrollo tardío de la resistencia debido a las propiedades puzolánicas de la POFA. Además, se comprueba que el ladrillo de cemento ecológico propuesto cumple con varias normas para su uso viable en la industria de la construcción. En términos financieros, el costo del ladrillo con el nuevo diseño de mezcla es casi equivalente al del convencional. Por lo tanto, es razonable emplearlo en el sector de la construcción para promover la sostenibilidad de los materiales y mejorar la gestión de los residuos.

Abstract

The fabrication of bricks commonly consumes relatively high natural resources. To reduce the carbon footprint in the brick production industry, repurposing industrial wastes in the making of sustainable bricks is a recent trend in research and application. Local wastes, such as oil palm shell (OPS), palm oil fuel ash (POFA), and quarry dust (QD), are massively produced annually in the palm oil-exporting countries. Moreover, QD from mining industries is hazardous to both water and air quality. For better waste management in marching towards sustainability, these wastes should be given their second life as construction materials. Therefore, this paper investigates the possibility of incorporating agro-industrial wastes into the brick mixture by examining their properties by means of several standardized tests. For the mix design, a 100% replacement of coarse aggregate with OPS, 20% replacement of cement with POFA, 20% cement weight of limestone as admixture, and 0 to 50% replacements of fine aggregate with QD are experimentally considered. The optimum mix of these wastes is preliminarily determined by focusing on high compressive strength as an indicator. Other examinations include splitting tensile, flexural strength, water absorption, and efflorescence tests. Although the agro-industrial waste cement brick is 18% lower in the strength to weight ratio compared to that of conventional, it is observed that it has better late strength development due to its POFA pozzolanic properties. Moreover, the proposed green cement brick is further checked for compliance with several standards for feasible use in the construction industry. Financially, the cost for the brick with the new mix design is almost equivalent to that of conventional. Hence, this green cement brick is reasonable to be employed in the construction industry to promote material sustainability for better waste management.

1. Introducción

Los ladrillos son materiales de construcción de uso común que se emplean activamente en la gran ma-

yoría de las obras de este tipo. Debido a sus notables características, como su gran resistencia, bajos costos de producción y durabilidad, han desempeñado un papel significativo en la construcción durante miles

de años [1-3]. El ladrillo fue un importante material de construcción en Egipto, Roma y Mesopotamia [4]. A medida que se introdujo el cemento como aglutinante del hormigón, el ladrillo de arcilla también se desarrolló de forma innovadora para convertirse en ladrillo de cemento y reducir así el consumo de energía calorífica que se utilizaba en la producción de ladrillos de arcilla. Tanto los ladrillos de arcilla como los de cemento son utilizados en la industria de la construcción hoy en día. Una de las tareas más difíciles a las que se enfrenta el sector de la construcción es mejorar la sostenibilidad, y se están estudiando materiales de construcción alternativos para compensar el impacto ambiental y cumplir las normas de desarrollo, fabricación y consumo sostenibles [5,6]. La sostenibilidad apoya la colaboración polifacética e interdisciplinaria en el sector de la construcción para satisfacer las necesidades humanas, incluyendo las de vivienda, y para organizar entornos de calidad para la sociedad [7]. La producción de ladrillos es un proceso que consume mucha energía y cantidades considerables de recursos naturales como piedra caliza, arcilla, grava, arena de río, entre otros [8]. Para remediarlo, desde hace unos años se están introduciendo materiales sostenibles como alternativa a los materiales de ladrillos convencionales para reducir la huella de carbono. Los residuos agrícolas, como las cenizas de cáscara de arroz [9,10], los lodos de aguas residuales [11], lodos de curtiduría [12] y los residuos de polvo [13], entre otros, son algunos de los materiales que hoy en día se consideran para este propósito. Malasia, uno de los principales productores de aceite de palma, genera grandes cantidades de residuos en términos de masa seca resultantes de la actividad de producción [14], por lo que se hace necesario tomar fuertes medidas correctivas. En particular, los residuos identificados de la industria del aceite de palma son el cuesco de palma de aceite (OPS por sus siglas en inglés) y las cenizas de caldera de aceite de palma (POFA por sus siglas en inglés), que pueden reutilizarse como sustitutos del agregado y del cemento, respectivamente, para producir ladrillos sostenibles en consonancia con los esfuerzos mundiales por mejorar la gestión de residuos.

La industria de la construcción y la demolición representa el 40 % del consumo mundial de energía y un tercio de las emisiones de gases de efecto invernadero [15,16]. Según los reportes, a medida que aumentó la necesidad de materiales de construcción, también

aumentó el uso de materias primas y energía, particularmente durante las fases de extracción, procesamiento y transporte de materiales [17]. Actualmente se producen 2.010 millones de toneladas de residuos sólidos en el mundo y se prevé que para 2050 este volumen llegue a las 3.400 millones de toneladas por año [18]. Su uso como reemplazo de los estabilizadores en las actividades de construcción ha demostrado ser una estrategia viable para disminuir los efectos ambientales y, al mismo tiempo, proporcionar beneficios sociales y económicos [19,20]. El crecimiento urbano mundial es una de las principales causas del aumento de la producción de residuos sólidos. Los países emergentes eligen la eliminación irregular de residuos en rellenos sanitarios y vertederos abiertos [21,22]. Como resultado, se dice, por ejemplo, que reciclarlos incorporándolos a los materiales de construcción ofrece una solución a estas problemáticas relacionadas con la eliminación de residuos y la reducción del impacto ecológico [23]. Un artículo de investigación muestra que el uso de colillas de cigarrillos al 1 % en ladrillos de arcilla sinterizada puede ahorrar aproximadamente 10,2 % de la energía de combustión utilizada en el proceso de producción [23].

Debido a sus características mecánicas y físicas, así como por la creatividad de combinar diversos residuos en su fabricación, el bloque de mampostería es uno de los materiales de construcción más completos [23]. A pesar de su excelente manejabilidad y disponibilidad, es bien sabido que la fabricación de bloques de mampostería sinterizados es una operación muy intensiva en términos de recursos y energía, además de las importantes cantidades de carbono consumidas. [2,24-26]. Según los informes, una de las prioridades de la construcción civil es reducir el consumo de energía [27]. La mayor demanda de productos que sean sostenibles y respetuosos con el medio ambiente ha llevado a investigar métodos y materiales alternativos para producir ladrillos de construcción [6,28]. También se descubrió que las materias primas consumidas por este sector representan aproximadamente 24 % de la oferta mundial [29]. Por lo tanto, su elección es crítica para cumplir con el objetivo de desarrollo sostenible. Los bloques de tierra-cemento ofrecen una solución a estos problemas, ya que se crean utilizando un procedimiento que elimina la necesidad de quemarlos, reduce la cantidad de cemento utilizada y aun permite el uso de residuos en su composición. Además, su uso disminuye los gastos hasta en un 40 % en comparación con la mampostería tra-

dicional, particularmente en viviendas de bajo costo [7]. Como resultado, los bloques de cemento podrían considerarse más respetuosos con el medio ambiente que los tradicionales bloques de mampostería [6,30].

La escasez de recursos naturales y la formación de residuos sólidos sin una eliminación efectiva son preocupaciones globales [25,31-34], que permiten la viabilidad ecológica de los sistemas de construcción que fomentan la sostenibilidad de los ecosistemas y la optimización de los procesos [35,36]. Las preocupaciones globales actuales se derivan de amplias preocupaciones ecológicas, así como en el acelerado ritmo de innovación tecnológica de la industria, especialmente en la construcción; en consecuencia, ha aumentado la atención que se presta al concepto de materiales de construcción alternativos, en particular a los producidos a partir de la tierra [37]. Debido a su mala conductividad térmica, los bloques de tierra estabilizados ayudan a aumentar la eficiencia energética de la construcción. Como resultado, pueden usarse para mejorar el aislamiento acústico y térmico en edificios [38]. Sin embargo, función de las propiedades de ingeniería, el valor de abrasión para la OPS es del 4,8 %, que es la cantidad de las muestras originales de almendras de palma de aceite molidas a un diámetro menor de 1,7 mm y, por lo tanto, es menos probable que se deteriore cuando se use como relleno base [39]. Los cuercos de palma de aceite también tienen pequeños poros entre sus fibras que proporcionan un peso ligero sin afectar la resistencia [40-44]. Hasta la fecha, se han realizado varias investigaciones sobre hormigones estructurales a partir de OPS [45-50], donde la inclusión de residuos de la industria del aceite de palma ha demostrado una excelente durabilidad del hormigón y buenas propiedades generales, al tiempo que incorpora ventajas adicionales respecto a las características de carga a pesar de tener una masa baja. Adicionalmente, se ha identificado que el polvo de cantera (QD) de la industria minera es un material útil para la matriz de hormigón, a lo que contribuyen algunas investigaciones sobre su potencial como sustituto de los agregados [51-57]. Por lo tanto, es posible reutilizar el QD en el hormigón como material de construcción para reducir el desecho de residuos de subproductos en el medio ambiente cercano, ya que este puede generar graves problemas de salud [58].

Hoy en día, el sector de la construcción tiene una gran demanda de ladrillos de cemento y las indus-

trias de Malasia producen toneladas de desechos. Con el fin de incorporar todos estos residuos locales en la matriz del hormigón y lograr una mejor gestión de los mismos, este documento investiga una mezcla de diseño factible para ser aplicada en esta propuesta de ladrillos de cemento ecológicos y así lograr el objetivo de fabricar materiales de construcción sostenibles. El enfoque principal es utilizar todos los desechos locales para reemplazar completamente el agregado grueso en ladrillos de cemento, que rara vez se encuentra en las tendencias de investigación actuales. Para obtener las propiedades mecánicas de las mezclas propuestas, el programa experimental para este estudio incluye pruebas de compresión, tracción de división, resistencia a la flexión, absorción de agua y eflorescencia. Además, se identifica su viabilidad como material de construcción sostenible al evaluar el cumplimiento con los códigos locales actuales. También se ha considerado un análisis de costos comparable al convencional para buscar el impacto financiero de su producción. Los resultados deben beneficiar y promover la sostenibilidad en la industria de la construcción.

2. Investigación experimental

El programa experimental actual para estudiar la viabilidad de los residuos locales para la producción de ladrillos se realizó en tres fases. En la Fase 1, se diseñó e identificó la mezcla; en la Fase 2, se caracterizaron las propiedades, mientras que la Fase 3, se dedicó al cumplimiento del código y al análisis de costos.

2.1 Materiales

Los desechos identificados fueron POFA, OPS y QD, que funcionaron, respectivamente, como reemplazos de cemento, agregado grueso y agregado fino para producir una mezcla de concreto liviano para la producción de ladrillos.

Los detalles adicionales para los materiales investigados son: Cemento-Cemento Portland Ordinario (C-CPo), CMC Engineering Sdn Bhd, Selangor, Malasia; un producto local que cumplía con las normas MS EN 197-1 y ASTM C150. Se utilizó POFA (Curtin University Lab, Sarawak, Malasia) como el material cementoso suplementario con tamaños de partícula que pasan a través de un tamiz de 45 μ m, tratado térmicamente.

camente a 500 °C; OPS (industria del aceite de palma de Malasia, Sarawak, Malasia) que cumplía con ASTM C33 para el dimensionamiento; QD (polvo de cantera, Sarawak Malasia) con una densidad de 1.350 kg/m³ y tamizado para mantener su rango de módulo de finura de 2,3 a 3,1 (las propiedades anteriores también se incluyeron en la Tabla 1 como referencia); Arena de río (valle de Sarawak, Malasia) con una densidad de

1.420 kg/m³ que pasa por un tamiz de 4,75 mm; superplastificante de tipo BASF-Master Glenium ACE 8589; (MasterGlenium-Master Builders Solutions, Sarawak, Malasia) y polvo de carbonato de calcio (Supra-coat WCE-22, Shandpa Al Powder Technology, Ltd., Shandong, China) como la mezcla para promover la resistencia general del hormigón. La Figura 1 muestra los materiales de la mezcla de diseño.

Tabla 1. Propiedades físicas y químicas de QD en investigaciones previas.

Propiedades		[59]	[60,61]
Físicas	Gravedad específica	1,74	2,54-2,60
	Contenido físico de agua natural	6,59 %	-
	Absorción de agua	2,34 %	1,2-1,5 %
	Densidad aparente	1,55 kg/m ³	1.720-1.810 kg/m ³
Químicas	SiO ₂	-	62,48 %
	Al ₂ O ₃	-	18,72
	Fe ₂ O ₃	-	6,54
	CaO	-	4,83
	MgO	-	2,65
	Na ₂ O	-	-
	K ₂ O	-	3,18
	TiO ₂	-	1,21
Pérdida por ignición *		-	0,48

* La pérdida por ignición es la pérdida de peso de una muestra después de ser tratada térmicamente (calentamiento/cocción) a alta temperatura, normalmente 1.000 °C, y 1 h de tiempo de remojo.

Figura 1. Materiales utilizados en la mezcla de diseño: a. C-CPo, b. POFA, c. OPS y d. grava



Distribución del tamaño de partícula

El propósito principal del análisis granulométrico fue determinar la distribución del tamaño de partícula para cada material utilizado para moldear el hormigón, cumpliendo con las normas ASTM C330M [62] y C33M [63]. Se propusieron varias mezclas de agregados finos y se tabularon en la Tabla 2, donde solo la mezcla con 50 % de QD y 50 % de arena de río cumplió con los requisitos de ASTM C33M. La clasificación de agregados gruesos se muestra en la Figura 2 para gra-

va y OPS. Ambos agregados pueden pasar a través del tamiz diametral nominal de 4,75 mm.

2.2 Diseño de la mezcla

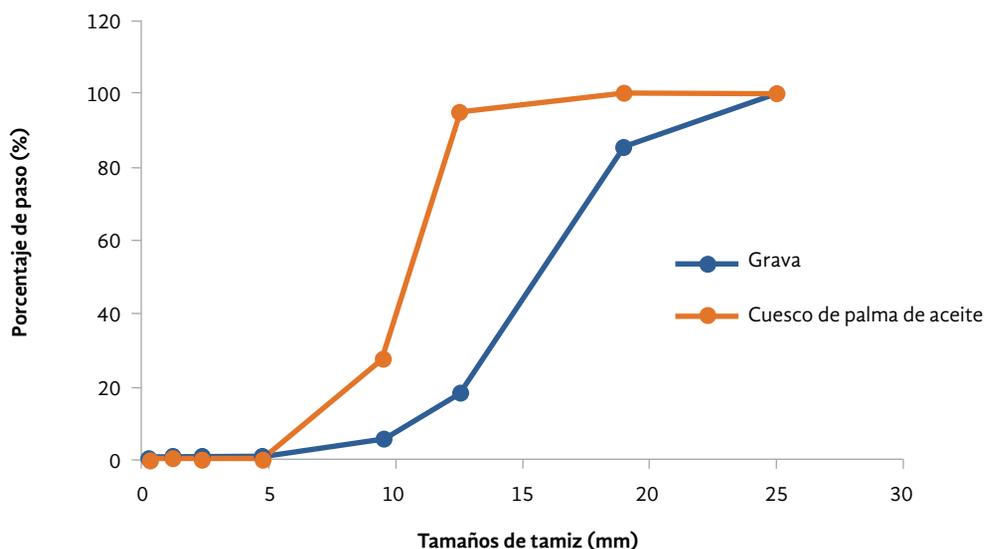
El diseño de la mezcla se fijó en 1:1:1 para cemento, agregados finos y gruesos de acuerdo con [39]. En la Fase 1, se consideró una mezcla idéntica de aglutinante (80 % de C-CPo + 20 % de POFA), agregado grueso (100 % de OPS) y agregado fino (50 % de QD + 50 % de RS) con la relación agua-cemento y el con-

Tabla 2. Módulo de finura y clasificación del agregado fino.

Proporción de mezcla	Módulo de fineza	Clasificación	Cumplimiento con el Sistema de Clasificación ASTM C33M
100 % RS	0,993	Arena fina	No Cumplido
100 % QD	3,741	Arena gruesa	No Cumplido
10 % QD + 90 % RS	1,312	Arena fina	No Cumplido
30 % QD + 70 % RS	1,612	Arena fina	No Cumplido
50 % QD + 50 % RS	2,562	Arena bien graduada	Cumplido

RS = arena de río por sus siglas en inglés (river sand), QD = polvo de cantera.

Figura 2. Comparación de la clasificación de agregados gruesos de grava y OPS



tenido de superplastificante como variables. A partir del estudio preliminar, ambas relaciones de agua-cemento de 0,45 y 0,5 fueron aceptables, mientras que se determinó que un 1 % de peso de cemento del superplastificante cumplía el objetivo del programa en esta etapa. Las mezclas pudieron fluir con asentamiento total y la resistencia a la compresión superó los 17 MPa de uso estructural. Se añadió el peso equivalente de polvo de piedra caliza con POFA a la mezcla para activar la reacción de la POFA. En la Fase 2, se analizaron 10 %, 30 % y 50 % de QD junto con la consideración de un caso de control de espécimen de hormigón convencional para la comparación. La Tabla 3 muestra la mezcla de diseño preliminar en la Fase 1. La Tabla 4 muestra el diseño de la mezcla de la Fase 2.

2.3 Métodos de prueba

A continuación, se describen los ensayos realizados para la caracterización de los especímenes de hormigón. Todos se probaron de acuerdo con los procedimientos mencionados en los códigos de práctica. Solo se ensayó un espécimen para las pruebas de asentamiento, densidad, eflorescencia y absorción de agua. Sin embargo, los valores promedio de tres especímenes se obtuvieron de las pruebas de resistencia.

2.3.1 Ensayo de hundimiento y densidad

Los ensayos de hundimiento se llevaron a cabo de acuerdo con ASTM C143 [64]. Se vertieron tres capas de la mezcla para llenar el cono junto con la aplica-

Tabla 3. Resumen del diseño de la mezcla (1 cemento: 1 agregado grueso: 1 agregado fino) y distribución de proporciones para la Fase 1.

Especimen	Aglutinante		Agregado grueso		Agregado fino		Aditivo de mezcla		Relación agua-cemento
	Cemento (%)	POFA (%)	Grava (%)	OPS (%)	Arena (%)	QD (%)	SP (%)	Piedra caliza (% de cemento)	
1	80	20	0	100	50	50	0,5	20	0,45
2	80	20	0	100	50	50	0,5	20	0,5
3	80	20	0	100	50	50	1,0	20	0,45
4	80	20	0	100	50	50	1,0	20	0,5

Tabla 4. Resumen del diseño de la mezcla y la distribución de la proporción para la Fase 2.

Especimen	Aglutinante		Agregado grueso		Agregado fino		Aditivo de mezcla	
	Cemento (%)	POFA (%)	Grava (%)	OPS (%)	Arena (%)	QD (%)	SP (%)	Piedra caliza (% de cemento)
Control	100	0	100	0	100	0	0	0
100 % RS	80	20	0	100	100	0	1	20
10 % QD + 90 % RS	80	20	0	100	90	10	1	20
30 % QD + 70 % RS	80	20	0	100	70	30	1	20
50 % QD + 50 % RS	80	20	0	100	50	50	1	20

ción de una compactación de 25 veces con los topes de varilla para cada capa. A continuación, se quitó el cono sin movimientos laterales ni torsionales, de tal manera que la altura de hundimiento se midió inmediatamente después de retirarlo. Además, la densidad fresca se midió pesando el espécimen en un cubo después de 15 minutos de compactación en 3 capas de mezcla, de acuerdo con ASTM C172 [65]. La densidad en seco se determinó pesando la muestra a la edad de ensayo del hormigón de 28 días.

2.3.2 Prueba de resistencia

La resistencia a la compresión se determinó de acuerdo con ASTM C140 [66], a una edad de hormigón de 7, 14, 21 y 28 días, para especímenes preparados con un cubo de 100 mm, como se muestra en la Figura 3. Se prepararon 3 especímenes para cada una de las edades de hormigón con una tasa de carga de 0,4 MPa/min. Para la resistencia a la tracción del hormigón, se realizó la prueba de tracción de división de acuerdo con las especificaciones del código de ASTM C496 [67]. Con este fin, se ensayaron 3 especímenes cilíndricos para cada una de las edades del hormigón, con dimensiones de 200 mm de altura y 100 mm de diámetro, bajo una tasa de carga de 1,0 MPa/min. Además, se realizó una prueba de resistencia a la flexión para todas las mezclas de acuerdo con lo indi-

cado en ASTM C78 [68], a una edad del hormigón de 28 días utilizando 3 especímenes preparados.

2.3.3 Ensayos de eflorescencia y absorción de agua

Las pruebas de eflorescencia y absorción de agua se realizaron a una edad de curado del hormigón de 28 días de acuerdo con las especificaciones de ASTM [66,69]. Solo se preparó un espécimen para las edades de curado del hormigón de 7 y 28 días. Los ladrillos (con un tamaño de 215 x 100 x 65 mm) se colocaron con sus caras de cabecera hacia el suelo en agua destilada durante 7 días tras finalizar la sesión de curado de 28 días, como se muestra en la Figura 4. Posteriormente, después de 7 días de inmersión, los ladrillos se calentaron a 110 °C durante 24 horas. Luego, se colocaron a 3 m del observador para buscar signos de eflorescencia en cualquier cara del ladrillo. También se buscó cualquier residuo blanco en el tanque de agua destilada, es decir, buscando signos de eflorescencia o precipitación de sal mineral dentro de la matriz de hormigón. Para la prueba de absorción de agua, los especímenes se secaron en un horno a 110 °C durante 24 horas y luego se sumergieron en agua. Se midieron los pesos en seco y en húmedo para cuantificar la absorción de agua.

Figura 3. Disposición de las pruebas de: a. compresión, b. división de la tracción y c. flexión

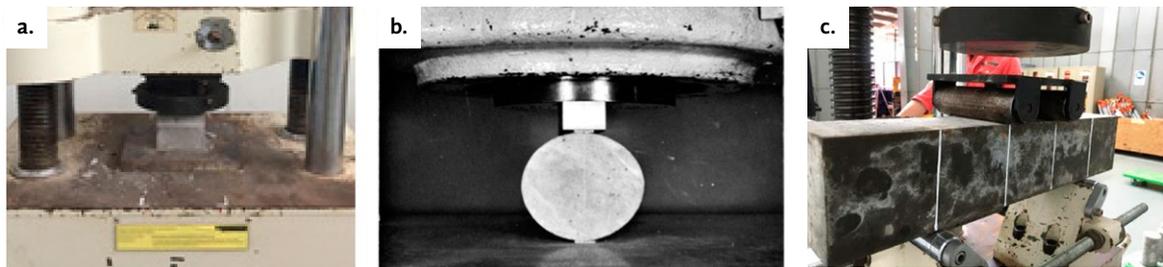


Figura 4. Inmersión para prueba de eflorescencia



3. Resultados y discusión

A partir de la Fase 1 se determinó el superplastificante óptimo al 1 % del peso del cemento con una relación agua-cemento de 0,45. Esto se aplicó luego en la investigación de la Fase 2 para varios reemplazos de agregados finos con diferentes proporciones de QD. Las propiedades de las mezclas de diseño en la Fase 2 se discuten en detalle en las siguientes secciones.

3.1 Densidades y propiedades de hundimiento

Como se muestra en la Tabla 5, las densidades de 100 % de RS son un 25,7 % y un 29,6 % más ligeras que las mezclas de hormigón convencionales para las densidades fresca y seca, respectivamente. Las diferencias se deben al reemplazo del contenido de POFA de 20 % del peso del cemento. Las diversas sustituciones con QD no muestran ninguna significación en las densidades frescas o secadas al horno, con solo una ligera disminución de las densidades para contenidos de sustitución más altos. En comparación con el hormigón convencional, la reducción más alta calculada en la carga muerta total proveniente del material de construcción es del 35,0 %. Esto eventualmente ayuda a reducir el costo de transporte del material y también a satisfacer las necesidades de dimensión de los miembros de soporte. En el contexto del desempeño, casi todas las mezclas alcanzan más de 17 MPa a los 28 días de la resistencia característica del hormigón. Se considera que la trabajabilidad de

todos los especímenes tiene un alto valor de asentamiento, ya que el intervalo es de 209 a 231 mm.

3.2 Propiedades mecánicas

3.2.1 Resistencia a la compresión

Con base en los resultados de la Tabla 6, las resistencias a la compresión obtenidas se pueden categorizar como concreto estructural, de acuerdo con la especificación del código ACI de 17 MPa para especímenes de tamaño de cubo y ladrillo. Todos los especímenes muestran una tendencia creciente habitual en la resistencia después del aumento en el tiempo de curado. Adicionalmente, el modo de fallo típico correspondiente se muestra en la Figura 5. La Tabla 5 también muestra que el incremento de reemplazo de polvo de cantera no causa ningún efecto sobre la ganancia de resistencia a lo largo de las edades de curado.

A partir de la observación del ensayo, debido a la baja gravedad específica del OPS, las mezclas de diseño mostraron tendencia a segregarse, afectando potencialmente su resistencia a la compresión [70]. En comparación con las mezclas similares anteriores [71], el hallazgo actual mostró una mejor resistencia con la inclusión de polvo de piedra caliza. Los efectos de relleno del polvo de piedra caliza provocaron que la reacción de hidratación tuviera lugar a una exposición óptima del cemento con agua añadida, promoviendo así el desarrollo de la resistencia [72]. Además, se formó ettringita al aplicar piedra caliza en la matriz de hormigón, lo que hace que sea más duradero [73].

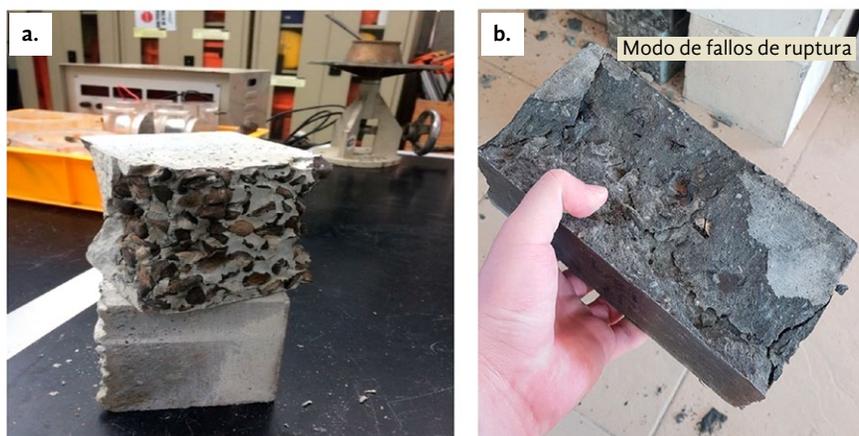
Tabla 5. Resultados de asentamiento y mediciones de densidad para la mezcla de diseño.

Especimen de hormigón	Densidad en fresco kg/m ³	Hundimiento (mm)	Característica del hundimiento	Densidad con secado al horno kg/m ³	Índice de desempeño, MPa en una Unidad de densidad
100 % RS	1.864	231	Hundimiento total	1.653	20,99
10 % QD + 90 % RS	1.840	228	Hundimiento total	1.622	21,58
30 % QD + 70 % RS	1.837	217	Hundimiento total	1.617	22,11
50 % QD + 50 % RS	1.821	209	Hundimiento total	1.587	17,33
Control	2.343	107	Hundimiento real	2.143	25,28

Tabla 6. Resistencia a diferentes edades del hormigón.

Especímen	Resistencia a la compresión (MPa)							
	Cubo				Ladrillo			
	7 días	14 días	21 días	28 días	7 días	14 días	21 días	28 días
100 % RS	22,25	29,13	33,83	34,70	21,80	31,10	34,15	34,76
10 % QD + 90 % RS	22,25	26,42	33,00	35,00	26,22	38,41	39,63	43,60
30 % QD + 70 % RS	25,20	29,33	33,33	35,75	25,13	26,83	29,88	47,56
50 % QD + 50 % RS	21,54	22,71	25,17	27,50	28,66	33,54	38,72	45,73
Control	39,24	40,45	44,55	54,17	56,71	57,32	76,83	77,44

Figura 5. Modos de falla típicos de las mezclas de diseño para: a. muestras de cubo y b. de ladrillo



La Tabla 6 muestra que el crecimiento de la resistencia a la compresión hasta una edad del hormigón de 28 días para 30 % QD + 70 % RS es del 29,8 % y de solo 27,5 % para el espécimen de control. La incorporación de POFA promueve el desarrollo de resistencia a una edad de hormigón posterior con reacción puzolánica, adicional porque la actividad puzolánica puede consumir el hidróxido de calcio en la zona de transición interfacial (ITZ) para mejorar la unión del hormigón con los agregados. El hidróxido de calcio suele residir en la zona de unión entre el hormigón y los agregados [74]. Además, los compuestos de hidróxido suelen necesitar más tiempo para formar geles C-S-H y C-A-H, lo que promueve la resistencia posterior. Estas reacciones coinciden con la adición de POFA en la matriz de hormigón debido a su composición mineral y propiedades puzolánicas [40,75]. El SiO₂ en la POFA puede reaccionar con el Ca(OH)₂

de la hidratación del cemento para producir enlaces C-S-H adicionales [76].

3.2.2 Resistencia a la tracción de división

La Tabla 7 resume que solo 30 % de QD + 70 % de RS logra el requisito estructural de la especificación de 2 MPa a partir de los resultados de laboratorio. La resistencia a la tracción por división muestra la misma tendencia de mejora que la representada por la resistencia a la compresión, donde el aumento en la resistencia a la compresión ofrece un efecto positivo en la resistencia a la tracción. Hubo varias ecuaciones publicadas utilizadas para la correlación de la tracción de división basada en la resistencia a la compresión del hormigón a una edad específica. Estas incluyen la Ecuación 1 [39] para la OPC como reemplazo para agregado grueso, la Ecuación 2 para mezclas de hormigón convencionales [77], la Ecuación 3 para hormigón ligero con densida-

des entre 1.600 y 1.860 kg/m³ [78] y la Ecuación 4 para cenizas volantes como reemplazo de cemento [79]. Haciendo una comparación con la Tabla 6, se observa que la Ecuación 3 muestra el resultado más idéntico con el del real, tal como se recogió de la prueba de laboratorio. La Tabla 7, muestra que es posible utilizar las Ecuaciones 3 y 4 para predecir la resistencia a la tracción empírica de OPS y hormigón de arcilla expandida.

$$f_t = 0,4887\sqrt{f_{cu}} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$f_t = 0,2f_{cy}^{0,7} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$f_t = 0,297\sqrt{f_{cy}} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$f_t = 0,58\sqrt{f_{cy}} \quad \text{Ecuación 4}$$

donde f_t es la resistencia a la tracción de división, f_{cu} es la resistencia a la compresión característica, f_{cy} es la resistencia a la compresión (no se especifica la edad del hormigón).

3.2.3 Resistencia a la flexión

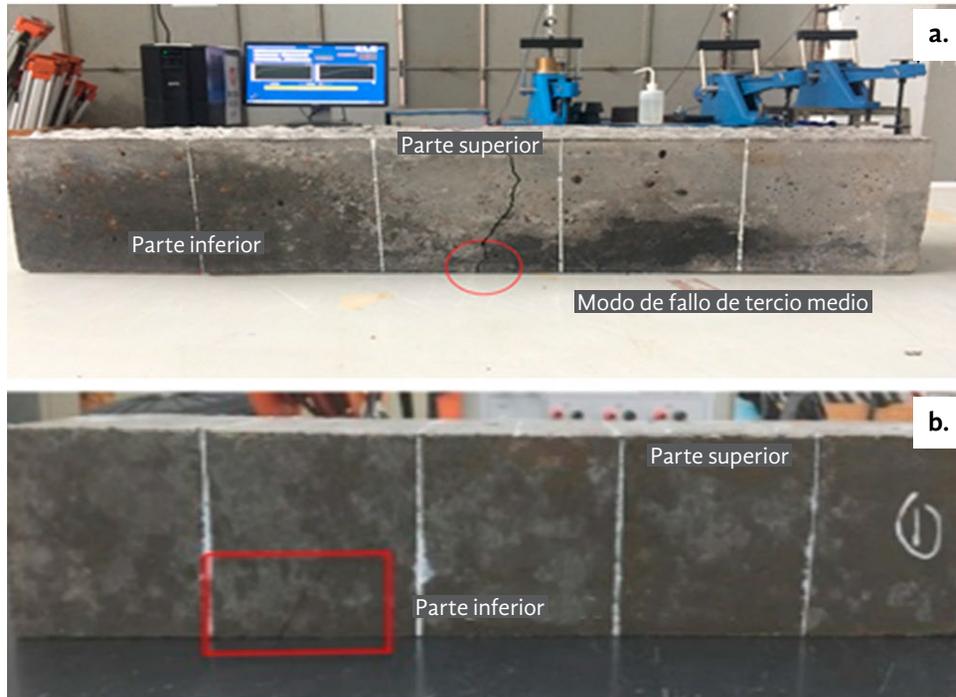
Como se observa en la Tabla 7, los resultados de la prueba de flexión de 3 puntos también muestran una tendencia de mejora similar a la de las resistencias a la compresión y a la tracción. La Tabla 6 muestra el fallo típico, que se inicia por agrietamiento. La resistencia a la flexión aumentó cuando la sustitución de arena con la proporción de polvo de cantera aumentó hasta un 30 %. Cuando el polvo de la cantera alcanzó 50 %, la resistencia a la flexión tendió a comportarse de manera adversa en comparación con aquellos con menor reemplazo. Esta observación coincide con la de una investigación anterior, que mostró que 40 % del reemplazo de arena por QD era la mezcla de diseño óptima [80].

Existen varias ecuaciones para estimar la resistencia a la flexión, incluida la Ecuación 5 para hormigones OPS y las Ecuaciones 6-8 para hormigones ligeros:

Tabla 7. Resistencia a la tracción de división y resistencia a la flexión para especímenes de hormigón con diferentes periodos de curado.

Especímen	Resistencia a la tracción de división (MPa)					Resistencia a la flexión (Mpa)				
	Actual	Ecuación (1)	Ecuación (2)	Ecuación (3)	Ecuación (4)	Actual	Ecuación (5)	Ecuación (6)	Ecuación (7)	Ecuación (8)
100 % RS	1,814	2,881	2,397	1,751	1,419	3,236	3,195	3,080	4,899	3,419
10 % QD + 90 % RS	1,979	3,227	2,810	1,961	2,830	3,512	3,716	3,450	5,698	3,830
30 % QD + 70 % RS	2,067	3,370	2,986	2,048	3,000	4,322	3,938	3,603	6,038	4,000
50 % QD + 50 % RS	1,895	3,305	2,905	2,008	2,922	2,761	3,836	3,533	5,883	3,922
Control	3,423	4,301	4,201	2,613	4,104	5,501	5,450	4,598	8,357	5,104
Valor p de dos colas Prueba t pareada con un nivel de confianza del 95 %	-	0,0002	0,0003	0,3895	0,0757	-	0,5510	0,5077	0,0014	0,5373
t	-	12,5696	11,4369	0,9643	2,3833	-	0,6502	0,7266	7,8173	0,6740
df	-	4	4	4	4	-	4	4	4	4
Error estándar de diferencia	-	0,094	0,072	0,165	0,260	-	0,247	0,294	0,295	0,280
Diferencia	-	Estadísticamente significativa	Estadísticamente significativa	No estadísticamente significativa	No estadísticamente significativa	-	No estadísticamente significativa	No estadísticamente significativa	Estadísticamente significativa	No estadísticamente significativa

Figura 6. Fallo típico de la prueba de flexión: a. dentro de la región central y b. fuera de la región central.



$$f_r = 0,3^3 \sqrt{f_{cu}^2} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$f_r = 0,5255 \sqrt{f_{cu}} \quad \text{Ecuación 6}$$

$$f_r = 0,46^3 \sqrt{f_{cu}^2} \quad \text{Ecuación 7}$$

$$f_r = 0,58 \sqrt{f_{cu}} \quad \text{Ecuación 8}$$

donde f_r es la resistencia a la flexión, f_{cu} es la resistencia a la compresión característica.

La Tabla 7 muestra que es posible utilizar las Ecuaciones 5 y 8 para predecir la resistencia a la tracción empírica de OPS y el hormigón de arcilla expandida. Sin embargo, la Ecuación 5 demuestra los valores de predicción más idénticos en los casos de reemplazo completo de arena con especímenes de QD y de control. No hay solamente una ecuación que prediga bien la resistencia a la flexión de todas las mezclas de diseño propuestas. Por lo tanto, se debe establecer una correlación adicional para una predicción de fuerza más precisa en ausencia de resultados de laboratorio.

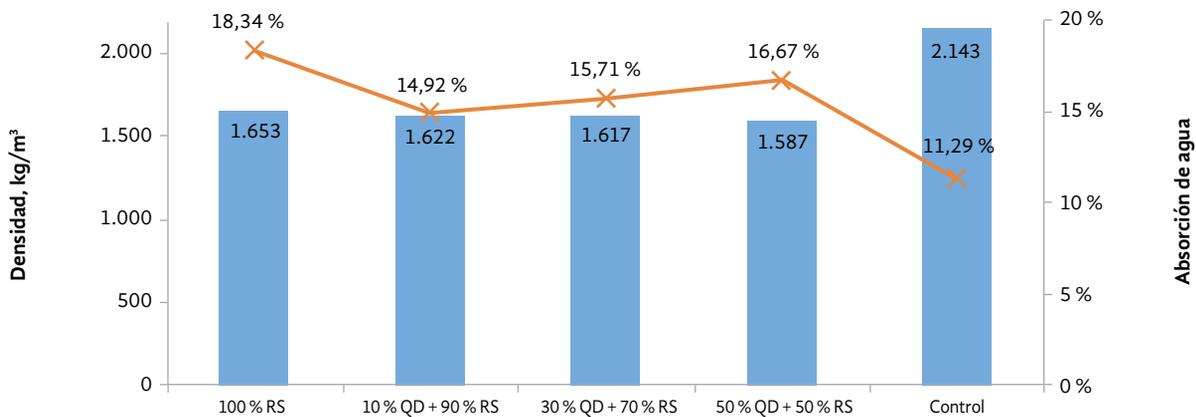
3.2.4 Absorción de agua

La Figura 7 muestra que la adición de OPS y más contenido de QD mejora la capacidad de absorción de agua de la mezcla. De acuerdo con una investigación previa [81], el OPS puede absorber un 36 % más de agua que el hormigón de grava convencional [81]. Se encontró una menor absorción de agua en la investigación actual ya que los OPS se empaparon previamente antes de mezclarse con el hormigón, lo que dio como resultado una menor tendencia a la absorción de agua.

3.2.5 Prueba de eflorescencia

Todos los especímenes presentaban eflorescencias en las que se apreciaba una capa de precipitación de sales minerales en sus superficies sumergidas, como se muestra en la Figura 8. El tipo principal de sal formada en las muestras fue carbonato de calcio, que proviene del Ca(OH)_2 sin reaccionar de la hidratación. El

Figura 7. Absorción de agua de la mezcla de diseño



$\text{Ca}(\text{OH})_2$ se transportó a la capa de agua destilada de 25 mm a medida que el contenido de sal era menor en el agua destilada. Después del proceso de inmersión, las muestras se sacaron y se secaron, y allí se produjo la precipitación al entrar en contacto con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para formar CaCO_3 .

Figura 8. Capa de deposición de carbonato de calcio sobre el espécimen



Los especímenes con polvo de piedra caliza pueden causar precipitación adicional debido a la reacción de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en la matriz de hormigón con las puzolanas (POFA) para formar geles de C-S-H y, por lo tanto, aumentar la densidad del hormigón mientras se empuja el exceso de CaCO_3 insoluble a través de los capilares del mismo. Como los especímenes con polvo de piedra caliza experimentaron dos fases

de precipitación, se justifica que la visibilidad de la eflorescencia fue más obvia en comparación con el espécimen de control.

3.3 Efectos de la contracción por secado

La contracción por secado es uno de los problemas más comunes en la industria del hormigón, atribuidos a sus efectos degradantes sobre la resistencia del hormigón. Esta puede ser causada por el tipo de agregado utilizado, la rigidez del hormigón, la relación agua-cemento, el método de curado, el entorno, entre otros. De acuerdo con [82], el hormigón de peso normal tiene una contracción por secado más baja que el hormigón de peso ligero. Esto se debe principalmente a las propiedades y cantidades de agregado [83]. La OPS tiende a tener una mayor tasa de absorción de agua que la grava convencional en la matriz de hormigón [84]. La superficie lisa de OPS, con un área de superficie específica más baja en comparación con la grava, contribuye a la mayor contracción por secado [85]. Una relación agua-cemento más baja puede minimizar la contracción por secado, ya que tiene una baja posibilidad de evaporación excesiva del agua [86]. A su vez, la minimización de la contracción por secado puede promover la resistencia del hormigón.

Una mayor sustitución del polvo de cantera requiere una mayor cantidad de agua para que la mezcla de hormigón sea viable, ya que este tiene una alta

afinidad por el agua, creando un mayor escenario de succión de humedad dentro de la matriz de hormigón y, por lo tanto, la aparición de contracción por secado. Esto se puede resolver humedeciendo previamente el polvo de la cantera antes de usarlo para fines de fundición [53]. Además, la arena puede ayudar a reducir la contracción por secado debido a sus propiedades de relleno en la prevención de la formación de burbujas de agua dentro de la matriz de hormigón [87]. Las ilustraciones ampliadas de POFA fresco y conectado a tierra se muestran en la Figura 9. La POFA molida es capaz de deslizarse en los huecos entre los agregados gruesos y sufrir reacciones puzolánicas [87]. Además, estas reacciones son capaces de reducir las burbujas de agua en las matrices de hormigón y, por lo tanto, reducir la contracción por secado, lo que resulta en un producto de hormigón más denso y sólido.

3.4 Efectos del agregado secado con superficie saturada

Los agregados prehumedecidos o agregados saturados secados en la superficie son los métodos utilizados para saturar los poros internos de los agregados antes del fraguado. El proceso se ejecuta remojando los agregados durante 24 horas antes de secarlos al sol o de cualquier manera apropiada para lograr una superficie seca, como lo sugiere [47]. Esta actividad se propone para evitar la alternancia del contenido de agua diseñado de las mezclas. La hidratación

completa puede no ocurrir si el agua es consumida y atraída por los agregados. Entre los agregados secados al sol, los secados al aire y los saturados secados en la superficie, la inserción de agregados saturados secados en la superficie puede producir hormigón con las mejores propiedades mecánicas [88].

3.5 Especificaciones del código

De acuerdo con los estándares de Malasia, ninguna de las mezclas consideradas en el estudio actual cumple con las especificaciones de los bloques de ingeniería. Sin embargo, están dentro del límite de las clases de ladrillo de carga 1 a 4. Para los estándares de Singapur, estas mezclas cumplen con las especificaciones para ladrillos comunes de grado 2 y 3. Generalmente, las mezclas de diseño propuestas solo se recomiendan para condiciones climáticas moderadas, pero no severas. Esto se debe al problema de la absorción de agua. La absorción de agua del entorno circundante es otro indicador de rendimiento importante, ya que esta propiedad también puede reflejar la absorción de productos químicos del exterior del edificio al interior, poniendo así en peligro a sus ocupantes. Con el fin de abordar esta preocupación, se sugiere aplicar una capa impermeable de recubrimiento para evitar que el hormigón absorba agua del entorno circundante. Para una comparación general, la Tabla 8 enumera los cumplimientos de las mezclas de diseño propuestas con varios códigos de práctica existentes.

Figura 9. Microscopía Electrónica de Barrido de POFA: a. fresco y b. molido [87]

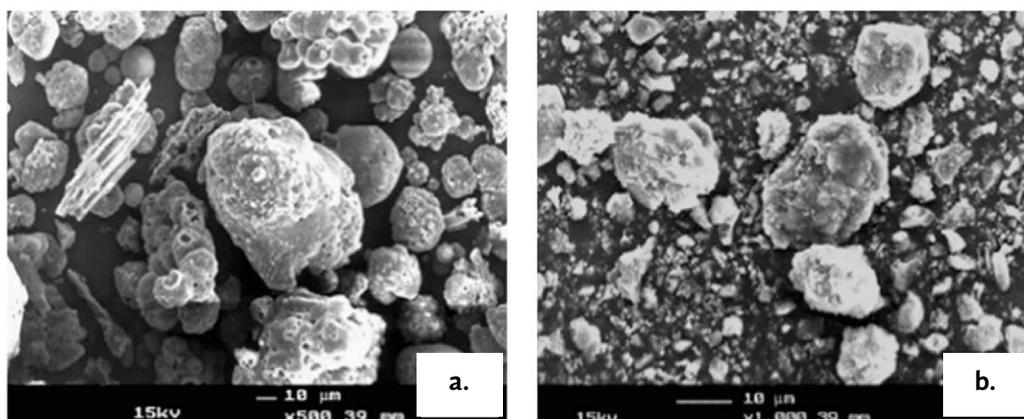


Tabla 8. Cumplimiento con códigos para la mezcla de diseño.

Espec.	Código	Clase	Resistencia a la compresión (Mpa)	Absorción de agua (%)	Cumplimiento					
					100 % RS	10 % QD + 90 % RS	30 % QD + 70 % RS	50 % QD + 50 % RS		
Bloque de ingeniería	Normas malasias 7.6:1972	A	69,0	4,5	x	x	x	x		
		B	48,5	7,0	x	x	x	x		
		15	103,50	-	x	x	x	x		
		10	69,0	-	x	x	x	x		
		7	48,5	-	x	x	x	x		
Bloque de carga	Normas malasias 7.6:1972	5	34,5	-	✓	✓	✓	x		
		4	27,5	-	✓	✓	✓	✓		
		3	20,5	-	✓	✓	✓	✓		
		2	14,0	-	✓	✓	✓	✓		
		1	7,0	-	✓	✓	✓	✓		
		Ladrillo a prueba de humedad	Normas malasias 7.6:1972	DPC	7,0	4,5	x	x	x	x
		Ladrillo de fachada/ordinario	Normas de Singapur 103:1974	1 ^{er} grado	35,0	25,0	x	✓	✓	x
2 ^{do} grado	20,0			25,0	✓	✓	✓	✓		
3 ^{er} grado	5,2			25,0	✓	✓	✓	✓		
Ladrillo de construcción	ASTM C62M	SW	20,7	17,0	x	✓	✓	✓		
		MW	17,2	22,0	✓	✓	✓	✓		
Ladrillo de fachada	ASTM C216M	SW	20,7	17,0	✓	✓	✓	✓		
		MW	17,2	22,0	✓	✓	✓	✓		
Ladrillo peatonal para pavimento de tráfico	ASTM C902M	SW	55,2	8,0	x	x	x	x		
		MW	20,7	14,0	x	x	x	x		
Mampostería de carga	ASTM C90M	SW	20,7	17,0	x	✓	✓	✓		
		MW	13,1	17,0	x	✓	✓	✓		

SW – Clima severo, MW – Clima moderado, x – no, ✓ - sí

3.6 Análisis de costo

El costo preliminar de fabricar un ladrillo se calculó y comparó con el ladrillo C-CPo ordinario. La Tabla 9 muestra el costo de fabricación de ladrillos con la mezcla propuesta de 30 % de QD + 70 % de RS. El cálculo se basa en un solo ladrillo con las siguientes dimensiones: altura de $65 \pm 1,875$ mm, ancho de $102,5 \pm 1,875$ mm y longitud de 215 ± 3 mm. En general, el costo de fabricar un solo ladrillo reutilizado es menor que el de un ladrillo de cemento convencional. Además, las propiedades beneficiosas para cada tipo de ladrillo se incluyen como referencia.

Dependiendo de las especificaciones del código, las mezclas de diseño investigadas sirven para una amplia gama de aplicaciones para ladrillos de cemento, como se muestra en la Tabla 8, desde los que no soportan carga hasta ladrillos de carga. Mediante el uso de residuos industriales locales incorporados en la matriz de ladrillo, se promueve un contexto sostenible en la industria de la construcción. Aunque este ladrillo de cemento ecológico tiene menor resistencia, es capaz de lograr un uso estructural de acuerdo con las especificaciones de los códigos. Sus altas propiedades de absorción de agua se pueden resolver incluyendo una cubierta impermeable en la superficie

Tabla 9. Cálculo de costos de un solo ladrillo propuesto.

	Materiales	Precio (USD)	Beneficio
Ladrillo C-CPo	Cemento	0,21	<ul style="list-style-type: none"> • Más fuerte que los ladrillos con residuos agroindustriales incorporados • Menos tiempo de preparación • Materiales altamente disponibles
	Grava	0,01	
	Arena	0,01	
	Agua	0,00	
	Costo de mano de obra	0,05	
	Total	0,28	
Ladrillo de residuos agroindustriales propuesto	Cemento	0,09	<ul style="list-style-type: none"> • Se requiere menos polvo de cemento para la mezcla, ya que se reemplaza parcialmente por POFA • Los materiales utilizados son más sostenibles, pues se incorporan residuos agroindustriales a la mezcla • Menor huella de carbono para producir un ladrillo de hormigón • Menor peso, haciendo que sea más fácil transportarlo
	POFA	Residuo	
	Arena	0,01	
	QD	0,00	
	Superplastificante	0,01	
	Agua	0,00	
	Costo de la mano de obra	0,05	
	OPS	Residuo	
Total	0,16		

del hormigón. Como un ladrillo de cemento de baja densidad, también se reduce el consumo de energía a través de una baja transferencia de calor desde el entorno exterior al interior [30,89], con un costo de fabricación más bajo, y debería tener una buena propiedad de insonorización debido a la baja densidad del hormigón.

4. Conclusiones

Este estudio se dedicó al análisis de las propiedades mecánicas y físicas de la mezcla de hormigón con reemplazo completo de agregado grueso con OPS, 20 % de reemplazo de cemento con POFA y diferentes reemplazos de agregado fino con QD como mezclas de diseño. Del estudio pueden extraerse varias conclusiones:

- Todas las mezclas de diseño en la segunda fase cumplieron con la resistencia a la compresión estructural mínima de 17 MPa, mientras que solo el 30 % de QD + 70 % de RS logró la resistencia a la división por tracción mínima de 2 MPa para un requisito estructural. La resistencia a la compresión se ha mejorado en comparación con las de [29].

- Las absorciones de agua de todos los especímenes estuvieron entre 14,9 % y 18,3 %, con densidades menores a 1.700 kg/m³. Todas las mezclas de diseño eflorescieron donde se encontró una capa de precipitación de sal mineral dentro de las muestras.
- Se encontró que la POFA molida es capaz de deslizarse en los huecos entre los áridos gruesos y sufrir reacciones puzolánicas. Además, estas reacciones son capaces de reducir las burbujas de agua en las matrices de hormigón y, por lo tanto, reducir la contracción por secado, lo que resulta en un producto de hormigón más denso y sólido.
- Todas las mezclas de diseño cumplieron con las especificaciones de Malasia (ladrillo de carga de las clases 1 a 4), Singapur (ladrillo común de los grados 2 y 3) y ASTM (ladrillos de construcción y revestimiento en condiciones climáticas moderadas).
- Se reveló que los especímenes con polvo de piedra caliza han experimentado dos fases de precipitación. Esto justificó que la visibilidad de la eflorescencia fuera más evidente en comparación con el espécimen de control.

- Se encontró que el costo de fabricar un solo ladrillo es casi equivalente al de un ladrillo de cemento convencional.

Por lo tanto, el ladrillo de cemento ecológico propuesto muestra una buena viabilidad para ser empleado en la industria de la construcción para la promoción de la sostenibilidad de los materiales y mejorar la gestión de los residuos. También se recomienda realizar un programa de pruebas más completo para evaluar el uso potencial de los nuevos ladrillos, como el cambio de longitud y las propiedades de aislamiento térmico y sonoro.

Aportes de los autores: conceptualización, W. Q. C. y Y. H. L.; curaduría de datos, W. Q. C., Y. H. L., M. A., R. F., N. V., A. B. H. K. y Y. Y. L.; análisis formal, W. Q. C., Y. H. L., M. A., R. F., N. V., A. B. H. K. y Y. Y. L.; adquisición de fondos, M. A., R. F. y N. V.; investigación, W. Q. C. y Y. H. L.; metodología, W. Q. C., Y. H. L. y A. B. H. K.; recursos, M. A., R. F., N. V. y Y. Y. L.; *software*, A. B. H. K. y Y. Y. L.; supervisión, Y. H. L.; validación, M. A., R. F., N. V., A. B. H. K. y Y. Y. L.; visualización, M. A. y A. B. H. K.; escritura-borrador original, W. Q. C. y Y. H. L.; escritura-revisión y edición, M. A., R. F., N. V., A. B. H. K. y Y. Y. L. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiación: la investigación está parcialmente financiada por el Ministerio de Ciencia y Educación Superior de la Federación Rusa como parte del programa del Centro de Investigación de Clase Mundial: Tecnologías Digitales Avanzadas (contrato N ° 075-15-2020-934 de fecha 17 de noviembre de 2020).

Declaración de la Junta de Revisión Institucional: no aplica.

Declaración de consentimiento informado: no aplica.

Declaración de disponibilidad de datos: el intercambio de datos no se aplica.

Reconocimientos: Los autores agradecen el apoyo financiero brindado por el Departamento de Ingeniería Civil y de la Construcción, facultad de Ingeniería y Ciencia, Universidad de Curtin, Malasia y el Decanato de Investigación Científica en la Universidad Prince Sattam bin Abdulaziz, Alkharj, Arabia Saudita, y la colaboración del Departamento de Ingeniería Civil, facultad de Ingeniería e Informática, Universidad de Amran, Yemen, y el Departamento de Ingeniería Civil y de la Construcción, Universidad de Curtin, Malasia, para esta investigación.

Conflicto de intereses: los autores declaran que no hay conflicto de intereses.

Referencias

1. Herbert, T. Brick: A world history. *Choice Rev. Online* 2004, 41, 3863. [CrossRef]
2. Zhang, L. Production of bricks from waste materials-A review. *Constr. Build. Mater.* 2013, 47, 643-655. [CrossRef]
3. Makul, N.; Fediuk, R.; Amran, H. M. M.; Zeyad, A. M.; de Azevedo, A. R. G.; Klyuev, S.; Vatin, N.; Karelina, M. Capacity to develop recycled aggregate concrete in South East Asia. *Buildings* 2021, 11, 234. [CrossRef]
4. Sebastián, E.; Cultrone, G. Technology of rammed-earth constructions (“Tapial”) in Andalusia (Spain): Their restoration and conservation. En *Materials, Technologies and Practice in Historic Heritage Structures*; Dan, M. B., Pr’ikry, R., Török, Á., Eds.; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2010; pp. 11-28. ISBN 978-90-481-2684-2.

5. Balaguera, A.; Carvajal, G. I.; Albertí, J.; Fullana-i-Palmer, P. Life cycle assessment of road construction alternative materials: A literature review. *Resour. Conserv. Recycl.* 2018, 132, 37-48. [CrossRef]
6. Murmu, A. L.; Patel, A. Towards sustainable bricks production: An overview. *Constr. Build. Mater.* 2018, 165, 112-125. [CrossRef]
7. Mohd Hasan, M. R.; Chew, J. W.; Jamshidi, A.; Yang, X.; Hamzah, M. O. Review of sustainability, pretreatment, and engineering considerations of asphalt modifiers from the industrial solid wastes. *J. Traffic Transp. Eng.* 2019, 6, 209-244. [CrossRef]
8. Jong, L. Y.; Teo, D. C. L. Concrete containing palm oil fuel ash (POFA) and oil palm shell (OPS) subjected to elevated temperatures. *J. Civ. Eng. Sci. Technol.* 2014, 5, 13-17. [CrossRef]
9. Amran, M.; Fediuk, R.; Murali, G.; Vatin, N.; Karelina, M.; Ozbakkaloglu, T.; Krishna, R. S.; Kumar, A. S.; Kumar, D. S.; Mishra, J. Rice husk ash-based concrete composites: A critical review of their properties and applications. *Crystals* 2021, 11, 168. [CrossRef]
10. Avudaiappan, S.; Prakatanoju, S.; Amran, M.; Aepuru, R.; Saavedra Flores, E. I.; Das, R.; Gupta, R.; Fediuk, R.; Vatin, N. Experimental investigation and image processing to predict the properties of concrete with the addition of nano silica and rice husk ash. *Crystals* 2021, 11, 1230. [CrossRef]
11. Chiang, K. Y.; Chou, P. H.; Hua, C. R.; Chien, K. L.; Cheeseman, C. Lightweight bricks manufactured from water treatment sludge and rice husks. *J. Hazard. Mater.* 2009, 171, 76-82. [CrossRef]
12. Juel, M. A. I.; Mizan, A.; Ahmed, T. Sustainable use of tannery sludge in brick manufacturing in Bangladesh. *Waste Manag.* 2017, 60, 259-269. [CrossRef] [PubMed]
13. Kinuthia, J. M.; Nidzam, R. M. Towards zero industrial waste: Utilisation of brick dust waste in sustainable construction. *Waste Manag.* 2011, 31, 1867-1878. [CrossRef] [PubMed]
14. Ng, W. P. Q.; Lam, H. L.; Ng, F. Y.; Kamal, M.; Lim, J. H. E. Waste-to-wealth: Green potential from palm biomass in Malaysia. *J. Clean. Prod.* 2012, 34, 57-65. [CrossRef]
15. Asensio, E.; Medina, C.; Frías, M.; de Rojas, M. I. S. Characterization of ceramic-based construction and demolition waste: Use as pozzolan in cements. *J. Am. Ceram. Soc.* 2016, 99, 4121-4127. [CrossRef]
16. Muñoz, V. P.; Morales, O. M. P.; Letelier, G. V.; Mendivil, G. M. A. Fired clay bricks made by adding wastes: Assessment of the impact on physical, mechanical and thermal properties. *Constr. Build. Mater.* 2016, 125, 241-252. [CrossRef]
17. De Lasso, J.; França, J.; Espírito Santo, K.; Haddad, A. Case study: LCA methodology applied to materials management in a Brazilian residential construction site. *J. Eng.* 2016, 2016, 8513293. [CrossRef]
18. Kaza, S.; Yao, L. C.; Bhada-Tata, P.; Van Woerden, F. *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*; World Bank Publications: Washington, D. C., EE. UU., 2018.

19. Arrigoni, A.; Grillet, A. C.; Pelosato, R.; Dotelli, G.; Beckett, C. T. S.; Woloszyn, M.; Ciancio, D. Reduction of rammed earth's hygroscopic performance under stabilisation: An experimental investigation. *Build. Environ.* 2017, 115, 358-367. [CrossRef]
20. Sekhar, D. C.; Nayak, S. Utilization of granulated blast furnace slag and cement in the manufacture of compressed stabilized earth blocks. *Constr. Build. Mater.* 2018, 166, 531-536. [CrossRef]
21. Da Cardoso, A. C. F.; Galatto, S. L.; Guadagnin, M. R. Estimativa de geração de resíduos da construção civil e estudo de viabilidade de usina de triagem e reciclagem. *Rev. Bras. Ciênc. Ambient.* 2014, 31, 1-10.
22. Rodseth, C.; Notten, P.; von Blottnitz, H. A revised approach for estimating informally disposed domestic waste in rural versus urban South Africa and implications for waste management. *S. Afr. J. Sci.* 2020, 116, 1-6. [CrossRef]
23. Kadir, A. A.; Mohajerani, A. Bricks: An excellent building material for recycling wastes-A review. En Proceedings of the IASTED International Conference on Environmental Management and Engineering (EME 2011), Calgary, AB, Canada, 4-6 July 2011; pp. 108-115.
24. Al-Fakih, A.; Mohammed, B. S.; Wahab, M. M. A.; Liew, M. S.; Mugahed Amran, Y. H.; Alyousef, R.; Alabduljabbar, H. Characteristic compressive strength correlation of rubberized concrete interlocking masonry wall. *Structures* 2020, 26, 169-184. [CrossRef]
25. Lesovik, V.; Volodchenko, A.; Fediuk, R.; Mugahed Amran, Y. H.; Timokhin, R. Enhancing performances of clay masonry materials based on nanosize mine waste. *Constr. Build. Mater.* 2021, 269, 121333. [CrossRef]
26. Al-Fakih, A.; Mohammed, B. S.; Wahab, M. M. A.; Liew, M. S.; Mugahed Amran, Y. H. Flexural behavior of rubberized concrete interlocking masonry walls under out-of-plane load. *Constr. Build. Mater.* 2020, 263, 120661. [CrossRef]
27. Buyle, M.; Braet, J.; Audenaert, A. Life cycle assessment in the construction sector: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2013, 26, 379-388. [CrossRef]
28. Smol, M.; Kulczycka, J.; Henclik, A.; Gorazda, K.; Wzorek, Z. The possible use of sewage sludge ash (SSA) in the construction industry as a way towards a circular economy. *J. Clean. Prod.* 2015, 95, 45-54. [CrossRef]
29. Raut, A. N.; Gomez, C. P. Development of thermally efficient fibre-based eco-friendly brick reusing locally available waste materials. *Constr. Build. Mater.* 2017, 133, 275-284. [CrossRef]
30. Lee, Y. H.; Amran, M.; Yong Lee, Y.; Hong Kueh, A. B.; Fui Kiew, S.; Fediuk, R.; Vatin, N.; Vasilev, Y. Thermal behavior and energy efficiency of modified concretes in the tropical climate: A systematic review. *Sustainability* 2021, 13, 11957. [CrossRef]

31. Tolstoy, A.; Lesovik, V.; Fediuk, R.; Amran, M.; Gunasekaran, M.; Vatin, N.; Vasilev, Y. Production of greener high-strength concrete using russian quartz sandstone mine waste aggregates. *Materials* 2020, 13, 5575. [CrossRef]
32. Da Silva, T. R.; de Azevedo, A. R. G.; Cecchin, D.; Marvila, M. T.; Amran, M.; Fediuk, R.; Vatin, N.; Karelina, M.; Klyuev, S.; Szelag, M. Application of plastic wastes in construction materials: A review using the concept of life-cycle assessment in the context of recent research for future perspectives. *Materials* 2021, 14, 3549. [CrossRef]
33. Lesovik, V.; Volodchenko, A.; Fediuk, R.; Mugahed Amran, Y. H. Improving the hardened properties of nonautoclaved silicate materials using nanodispersed mine waste. *J. Mater. Civ. Eng.* 2021, 33, 04021214. [CrossRef]
34. Petropavlovskii, K.; Novichenkova, T.; Petropavlovskaya, V.; Sulman, M.; Fediuk, R.; Amran, M. Faience waste for the production of wall products. *Materials* 2021, 14, 6677. [CrossRef] [PubMed]
35. De Carvalho Araújo, C. K.; Salvador, R.; Moro Piekarski, C.; Sokulski, C. C.; de Francisco, A. C.; de Carvalho Araújo Camargo, S. K. Circular economy practices on wood panels: A bibliographic analysis. *Sustainability* 2019, 11, 1057. [CrossRef]
36. Krishna, R. S.; Mishra, J.; Meher, S.; Das, S. K.; Mustakim, S. M.; Singh, S. K. Industrial solid waste management through sustainable green technology: Case study insights from steel and mining industry in Keonjhar, India. *Mater. Today Proc.* 2020, 33, 5243-5249. [CrossRef]
37. Ashour, T.; Korjenic, A.; Korjenic, S.; Wu, W. Thermal conductivity of unfired earth bricks reinforced by agricultural wastes with cement and gypsum. *Energy Build.* 2015, 104, 139-146. [CrossRef]
38. Yuan, X.; Tang, Y.; Li, Y.; Wang, Q.; Zuo, J.; Song, Z. Environmental and economic impacts assessment of concrete pavement brick and permeable brick production process-A case study in China. *J. Clean. Prod.* 2018, 171, 198-208. [CrossRef]
39. Shafiqh, P.; Jumaat, M. Z.; Mahmud, H. B.; Hamid, N. A. A. Lightweight concrete made from crushed oil palm shell: Tensile strength and effect of initial curing on compressive strength. *Constr. Build. Mater.* 2012, 27, 252-258. [CrossRef]
40. Amran, M.; Murali, G.; Fediuk, R.; Vatin, N.; Vasilev, Y.; Abdelgader, H. Palm oil fuel ash-based eco-efficient concrete: A critical review of the short-term properties. *Materials* 2021, 14, 332. [CrossRef]
41. Mosaberpanah, M. A.; Amran, Y. H. M.; Akoush, A. Performance investigation of palm kernel shell ash in high strength concrete production. *Comput. Concr.* 2020, 26, 577-585. [CrossRef]
42. Al-Hokabi, A.; Hasan, M.; Amran, M.; Fediuk, R.; Vatin, N. I.; Klyuev, S. Improving the early properties of treated soft kaolin clay with palm oil fuel ash and gypsum. *Sustainability* 2021, 13, 910. [CrossRef]

43. Amran, M.; Lee, Y. H.; Fediuk, R.; Murali, G.; Mosaberpanah, M. A.; Ozbakkaloglu, T.; Lee, Y. Y.; Vatin, N.; Klyuev, S.; Karelia, M. Palm oil fuel ash-based eco-friendly concrete composite: A critical review of the long-term properties. *Materials* 2021, 14, 7074. [CrossRef]
44. Zeyad, A. M.; Johari, M. A. M.; Alharbi, Y. R.; Abadel, A. A.; Amran, Y. H. M.; Tayeh, B. A.; Abutaleb, A. Influence of steam curing regimes on the properties of ultrafine POFA-based high-strength green concrete. *J. Build. Eng.* 2021, 38, 102204. [CrossRef]
45. Teo, D. C. L.; Mannan, M. A.; Kurian, V. J. Structural concrete using oil palm shell (OPS) as lightweight aggregate. *Turk. J. Eng. Environ. Sci.* 2006, 30, 251-257.
46. Mannan, M. A.; Ganapathy, C. Engineering properties of concrete with oil palm shell as coarse aggregate. *Constr. Build. Mater.* 2002, 16, 29-34. [CrossRef]
47. Shafigh, P.; Jumaat, M. Z.; Mahmud, H. Oil palm shell as a lightweight aggregate for production high strength lightweight concrete. *Constr. Build. Mater.* 2011, 25, 1848-1853. [CrossRef]
48. Shafigh, P.; Johnson Alengaram, U.; Mahmud, H. B.; Jumaat, M. Z. Engineering properties of oil palm shell lightweight concrete containing fly ash. *Mater. Des.* 2013, 49, 613-621. [CrossRef]
49. Shafigh, P.; Jumaat, M. Z.; Mahmud, H. Mix design and mechanical properties of oil palm shell lightweight aggregate concrete: A review. *Int. J. Phys. Sci.* 2010, 5, 2127-2134.
50. Aslam, M.; Shafigh, P.; Jumaat, M. Z. Oil-palm by-products as lightweight aggregate in concrete mixture: A review. *J. Clean. Prod.* 2016, 126, 56-73. [CrossRef]
51. Zhao, Y.; Qiu, J.; Xing, J.; Sun, X. Recycling of quarry dust for supplementary cementitious materials in low carbon cement. *Constr. Build. Mater.* 2020, 237, 117608. [CrossRef]
52. Dhoka, M. M. C. Green concrete: Using industrial waste of marble powder, quarry dust and paper pulp. *Int. J. Eng. Sci. Invent.* 2013, 2, 67-70.
53. Lim, J. S.; Cheah, C. B.; Ramli, M. B. The setting behavior, mechanical properties and drying shrinkage of ternary blended concrete containing granite quarry dust and processed steel slag aggregate. *Constr. Build. Mater.* 2019, 215, 447-461. [CrossRef]
54. Irwan, J.M.; Othman, N.; Koh, H.B. Properties of sand cement brick containing quarry dust (SCBQD) and bacteria strain. *Int. J. Sustain. Constr. Eng. Technol.* 2020, 11, 13-22. [CrossRef]
55. Siddika, A.; Amin, M. R.; Rayhan, M. A.; Islam, M. S.; Mamun, M. A. A.; Alyousef, R.; Mugahed Amran, Y. H. Performance of sustainable green concrete incorporated with fly ash, rice husk ash, and stone dust. *Acta Polytech.* 2021, 61, 279-291. [CrossRef]
56. Saheed, S.; Amran, Y. H. M.; El-Zeadani, M.; Aziz, F. N. A.; Fediuk, R.; Alyousef, R.; Alabduljabbar, H. Structural behavior of out-of-plane loaded precast lightweight EPS-foam concrete C-shaped slabs. *J. Build. Eng.* 2021, 33, 101597. [CrossRef]

57. Saheed, S.; Aziz, F. N. A. A.; Amran, M.; Vatin, N.; Fediuk, R.; Ozbakkaloglu, T.; Murali, G.; Mosaberpanah, M. A. Structural performance of shear loaded precast EPS-foam concrete half-shaped slabs. *Sustainability* 2020, 12, 9679. [CrossRef]
58. Lim, S. K.; Tan, C. S.; Li, B.; Ling, T. C.; Hossain, M. U.; Poon, C. S. Utilizing high volumes quarry wastes in the production of lightweight foamed concrete. *Constr. Build. Mater.* 2017, 151, 441-448. [CrossRef]
59. Febin, G. K.; Abhirami, A.; Vineetha, A. K.; Manisha, V.; Ramkrishnan, R.; Sathyan, D.; Mini, K. M. Strength and durability properties of quarry dust powder incorporated concrete blocks. *Constr. Build. Mater.* 2019, 228, 116793. [CrossRef]
60. Ilangovana, R.; Mahendrana, N.; Nagamanib, K. Strength and durability properties of concrete containing quarry rock dust as fine aggregate. *J. Eng. Appl. Sci.* 2008, 3, 20-26.
61. Hamid Mir, A. Improved concrete properties using quarry dust as replacement for natural sand. *Int. J. Eng. Res. Dev.* 2015, 11, 46-52.
62. ASTM C330; Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete. ASTM International: West Conshohocken, PA, EE. UU., 2009. [CrossRef]
63. ASTM C33; Standard Specification for Concrete Aggregates. ASTM International: West Conshohocken, PA, EE. UU., 2010.
64. ASTM C143/C143M; Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. ASTM International: West Conshohocken, PA, EE. UU., 2015.
65. ASTM C172/C172M-10; Standard Practice for Sampling Freshly Mixed Concrete. ASTM International: West Conshohocken, PA, EE. UU., 2010.
66. ASTM C140/C140M; Standard Test Methods for Sampling and Testing Concrete Masonry Units and Related Units 1. ASTM International: West Conshohocken, PA, EE. UU., 2020.
67. ASTM C496/C496M-17; Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens ASTM C-496. ASTM International: West Conshohocken, PA, EE. UU., 2011; ISBN 5919881100.
68. ASTM C78; Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete. ASTM International: West Conshohocken, PA, EE. UU., 2016.
69. Sanders, J. P.; Brosnan, D. A. Test method for determining the efflorescence potential of masonry materials based on soluble salt content. *J. ASTM Int.* 2010, 7, 102725. [CrossRef]
70. Singh, M.; Siddique, R. Effect of coal bottom ash as partial replacement of sand on properties of concrete. *Resour. Conserv. Recycl.* 2013, 72, 20-32. [CrossRef]
71. Amran, M.; Fediuk, R.; Abdelgader, H. S.; Murali, G.; Ozbakkaloglu, T.; Lee, Y. H.; Lee, Y. Y. Fiber-reinforced alkali-activated concrete: A review. *J. Build. Eng.* 2022, 45, 103638. [CrossRef]

72. Muthusamy, K.; Nur Azzimah, Z. Exploratory study of palm oil fuel ash as partial cement replacement in oil palm shell lightweight aggregate concrete. *Res. Appl. Sci. Eng. Technol.* 2014, 8, 150-152. [CrossRef]
73. Uysal, M.; Yilmaz, K. Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete. *Cem. Concr. Compos.* 2011, 33, 771-776. [CrossRef]
74. Wang, D.; Shi, C.; Farzadnia, N.; Shi, Z.; Jia, H.; Ou, Z. A review on use of limestone powder in cement-based materials: Mechanism, hydration and microstructures. *Constr. Build. Mater.* 2018, 181, 659-672. [CrossRef]
75. Sargent, P. The development of alkali-activated mixtures for soil stabilisation. En *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes*; Elsevier: Amsterdam, Países Bajos, 2015; ISBN 9781782422884.
76. Alyousef, R.; Mohammadhosseini, H.; Alrshoudi, F.; Tahir, M. M.; Alabduljabbar, H.; Mohamed, A. M. Enhanced performance of concrete composites comprising waste metalised polypropylene fibres exposed to aggressive environments. *Crystals* 2020, 10, 696. [CrossRef]
77. Topçu, I.B.; Uygunoğlu, T. Effect of aggregate type on properties of hardened self-consolidating lightweight concrete (SCLC). *Constr. Build. Mater.* 2010, 7, 1286-1295. [CrossRef]
78. Zhang, M. H.; Gjorv, O. E. Mechanical properties of high-strength lightweight concrete. *ACI Mater. J.* 1991, 88, 240-247. [CrossRef]
79. Babu, D. S.; Ganesh Babu, K.; Wee, T. H. Properties of lightweight expanded polystyrene aggregate concretes containing fly ash. *Cem. Concr. Res.* 2005, 35, 1218-1223. [CrossRef]
80. Shyam Prakash, K.; Rao, C. H. Study on compressive strength of quarry dust as fine aggregate in concrete. *Adv. Civ. Eng.* 2016, 2016, 1742769. [CrossRef]
81. Yew, M. K.; Bin Mahmud, H.; Ang, B. C.; Yew, M. C. Effects of oil palm shell coarse aggregate species on high strength lightweight concrete. *Sci. World J.* 2014, 2014, 387647. [CrossRef]
82. Aslam, M.; Shafiq, P.; Jumaat, M. Z. Drying shrinkage behaviour of structural lightweight aggregate concrete containing blended oil palm bio-products. *J. Clean. Prod.* 2016, 127, 183-194. [CrossRef]
83. Day, K.; Aldred, J.; Hudson, B. Properties of concrete. En *Concrete Mix Design, Quality Control and Specification*, 4th ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, EE. UU., 2013.
84. Ismail, S.; Ramli, M. Mechanical strength and drying shrinkage properties of concrete containing treated coarse recycled concrete aggregates. *Constr. Build. Mater.* 2014, 68, 726-739. [CrossRef]

85. Al-Jabri, K. S.; Hisada, M.; Al-Saidy, A. H.; Al-Oraimi, S. K. Performance of high strength concrete made with copper slag as a fine aggregate. *Constr. Build. Mater.* 2009, 23, 2132-2140. [CrossRef]
86. Aliabdo, A. A.; Abd Elmoaty, A. E. M.; Fawzy, A. M. Experimental investigation on permeability indices and strength of modified pervious concrete with recycled concrete aggregate. *Constr. Build. Mater.* 2018, 193, 105-127. [CrossRef]
87. Tangchirapat, W.; Jaturapitakkul, C. Strength, drying shrinkage, and water permeability of concrete incorporating ground palm oil fuel ash. *Cem. Concr. Compos.* 2010, 32, 767-774. [CrossRef]
88. Lee, D. T. C.; Lee, T. S. The effect of aggregate condition during mixing on the mechanical properties of oil palm shell (OPS) concrete. En *Proceedings of the MATEC Web of Conferences*, Amsterdam, Países Bajos, 23-25 March 2016.
89. Lee, Y. H.; Chua, N.; Amran, M.; Lee, Y. Y.; Kueh, A. H.; Fediuk, R.; Vatin, N.; Vasilev, Y. Thermal performance of structural lightweight concrete composites for potential energy saving. *Crystals* 2021, 11, 461. [CrossRef]