

## MORTERO SUSTENTABLE A BASE DE CAL (CAO), POLVO DE PIEDRA Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD HDPE

### SUSTAINABLE MORTAR BASED ON LIME CA (OH)<sub>2</sub>, STONE DUST AND HIGH DENSITY POLYETHYLENE HDPE

Ricardo Díaz Palacios<sup>1</sup>, Mario José Romellón Cerino<sup>2</sup>, Carlos Rodríguez Jiménez<sup>3</sup>, Nelson de Jesús López Acopa<sup>4</sup>, María Berzabé Vázquez González<sup>5</sup>

<https://doi.org/10.61117/ipsumtec.v7i2.319>

<sup>1</sup>Ingeniero Civil. Tecnológico Nacional de México Campus Villahermosa, Departamento de Ciencias de la Tierra. ricardo.dp@villahermosa.tecnm.mx, 9932905360 Carretera Villahermosa - Frontera Km. 3.5 Ciudad Industrial Villahermosa, Tabasco, México. C.P. 86010, <https://orcid.org/0000-0001-5452-2769>

<sup>2</sup>Doctor en Ciencias Ambientales. Tecnológico Nacional de México Campus Villahermosa, Departamento de Química, Bioquímica y Ambiental. mario.rc@villahermosa.tecnm.mx, 9932119867, Carretera Villahermosa - Frontera Km. 3.5 Ciudad Industrial Villahermosa, Tabasco, México. C.P. 86010, <https://orcid.org/0000-0002-8579-1280>

<sup>3</sup>Maestro en Valuación. Tecnológico Nacional de México Campus Villahermosa, Departamento de Ciencias de la Tierra. carlos.rj@villahermosa.tecnm.mx, 9931596912, Carretera Villahermosa - Frontera Km. 3.5 Ciudad Industrial Villahermosa, Tabasco, México. C.P. 86010, <https://orcid.org/0000-0003-2814-8819>

<sup>4</sup>Maestro en Ingeniería. Tecnológico Nacional de México Campus Villahermosa, Departamento de Ciencias de la Tierra. nelson.la@villahermosa.tecnm.mx, 9931201366, Carretera Villahermosa - Frontera Km. 3.5 Ciudad Industrial Villahermosa, Tabasco, México. C.P. 86010, <https://orcid.org/0009-0007-7902-752X>

<sup>5</sup>Maestra en Ingeniería y Protección Ambiental. Tecnológico Nacional de México Campus Villahermosa, Departamento de Química, Bioquímica y Ambiental. maria.vazquezg@villahermosa.tecnm.mx, 9932426321, Carretera Villahermosa - Frontera Km. 3.5 Ciudad Industrial Villahermosa, Tabasco, México. C.P. 86010, <https://orcid.org/0009-0007-3827-6984>

**Resumen.** - Los morteros son mezclas para fabricar bloques utilizados en la industria de la construcción, se elaboran con arena (árido no renovable) que es la segunda materia prima más consumida por el hombre después del agua y cemento que al producirlo se ha comprobado emite dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Por lo anterior, el objetivo de esta investigación fue sustituir en mezclas de mortero la cal CaO porcentualmente en el cemento y el polvo de piedra de desecho (PP) junto con el polietileno de alta densidad (HDPE) porcentualmente en la arena. se elaboraron especímenes testigo en proporción 1:6 cómo indica el manual del constructor para bloques y tres tratamientos T (Cal, PP, HDPE) elaborando 14 especímenes por cada mezcla T1(2.5%, 2.5%, 2.5%), T2(5%, 2.5%, 5%) y T3(7.5%, 2.5%, 7.5%) respetando las NMX-C-111-ONNCCE-2017, NMX-C-159-ONNCCE-2016. Se evaluaron por triplicado completamente al azar la resistencia a los R (7, 14, 28) días con las NMX-C-083-ONNCCE-2020, NMX-C-109-ONNCCE-2013. Los resultados de respuesta fueron para R-Testigo (72.08, 73.64, 100.08) kg/cm<sup>2</sup>, R-T1(39.98, 41.76, 56.02) kg/cm<sup>2</sup>, R-T2(33.04, 34.77, 49.21) kg/cm<sup>2</sup>, R-T3(22.05, 24.33, 33.41) kg/cm<sup>2</sup>. Ninguno de los tratamientos cumplió con la NMX-C-404-ONNCCE-2012 que solicita 90 kg/cm<sup>2</sup> para bloques estructurales, se concluye que el T1 y T2 cumplen con la NMX-C-441-ONNCCE-2013 que determina 35kg/cm<sup>2</sup> para bloques no estructurales.

**Palabras clave:** cal, polvo, polietileno, resistencia, normatividad.

**Abstract.** - Mortars are mixtures to make blocks used in the construction industry, they are made with sand (non-renewable aggregate) which is the second most consumed raw material by man after water and cement, which has been proven to emit carbon dioxide when produced. (CO<sub>2</sub>). Therefore, the objective of this research was to replace lime CaO in mortar mixtures in percentage in cement and waste stone powder (PP) together with high density polyethylene (HDPE) in percentage in sand. Control specimens were made in a 1:6 ratio as indicated in the builder's manual for blocks and three T treatments (Cal, PP, HDPE) making 14 specimens for each mix T1(2.5%, 2.5%, 2.5%), T2(5%, 2.5%, 5%) and T3(7.5%, 2.5%, 7.5%) respecting the NMX-C-111-ONNCCE-2017, NMX-C-159-ONNCCE-2016. The resistance at R (7, 14, 28) days with the NMX-C-083-ONNCCE-2020, NMX-C-109-ONNCCE-2013 were evaluated in triplicate completely at random. The response results were for R-Witness (72.08, 73.64, 100.08) kg/cm<sup>2</sup>, R-W1(39.98, 41.76, 56.02) kg/cm<sup>2</sup>, R-W2(33.04, 34.77, 49.21) kg/cm<sup>2</sup>, R-W3(22.05, 24.33, 33.41) kg/cm<sup>2</sup>. None of the treatments complied with the NMX-C-404-ONNCCE-2012 that requests 90 kg/cm<sup>2</sup> for structural blocks, it is concluded that T1 and T2 comply with the NMX-C-441-ONNCCE-2013 that determines 35 kg/cm<sup>2</sup> for non-structural blocks.

**Keywords:** lime, dust, polyethylene, resistance, regulations.

## INTRODUCCIÓN

El cemento es el ingrediente clave en morteros y concretos dando forma a gran parte de las construcciones que nos rodean, al producirlo deja una enorme huella de carbono y es la fuente de aproximadamente el 8% de las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) del mundo, según el centro de estudios británico Chatham House, además de sus altos costos [1]. Otros materiales para construcción más utilizados en nuestro planeta son la arena y la grava informó el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [2], siendo la arena (árido) un recurso crucial para el desarrollo de la sociedad y es la segunda materia prima más consumida por el hombre después del agua [3].

Es relevante mencionar que la cal CaO es un material utilizado en la industria de la construcción que se utiliza en la preparación de morteros o mezclas de albañilería para unir los materiales con los que se construyen muros, cimientos y losas por mencionar algunos, ya que su uso es amplio, se afirma que un mortero con cal le permite a las mezclas retener la humedad por más tiempo (propiedad que deben de tener las mezclas para su correcto curado), por lo que, añadirlo a la mezcla evitará posibles fisuras por retracción, asegurando así la calidad de los morteros que lo incluyan en sus mezclas [4].

El polvo de piedra residual (PP) es generado de la trituración de la roca de cerro y regularmente lo depositan en el medio ambiente sobre los suelos afectando a la vegetación que disminuye su capacidad para tomar el dióxido de carbono atmosférico, el agua y la energía solar, además que estos polvos finos acarrearán problemas en el sistema respiratorio, alergias o incluso la muerte en los seres humanos. También, se ha demostrado que materiales como el polietileno de alta densidad (HDPE), usado en envases, cuando es desechado al medio ambiente genera en los suelos problemas a las lombrices, disminuyendo su tiempo de vida y pierden el 3% de su peso corporal, teniendo impactos negativos en la agricultura, vital para la soberanía alimentaria [5]. Se destaca que al utilizar el polvo de piedra (PP) de desecho que cuenta con alta densidad combinado con el polietileno (HDPE) que tiene baja densidad garantizan un equilibrio en las mezclas de mortero ya que el (PP) aporta resistencia y el (HDPE) aporta bajo peso.

Por lo anterior, investigadores se han puesto como meta buscar alternativas de nuevos morteros que sean amigables con el medio ambiente. En Ecuador evaluaron adobes que contenían cangahua, cal, arcilla y paja que presentaron características mecánicas acordes a las normativas, los mejores resultados a la resistencia se presentaron al utilizar solo cangahua, así como al utilizar arcilla en porcentajes de 10% y 20% en volumen, afirman que cumplieron ampliamente para la normativa peruana E.80 (10.2 kg/cm<sup>2</sup>).

El impacto de la cal hidratada de procedencia artesanal e industrial al ser combinadas con cangahua disminuyó la resistencia a la compresión de los morteros [6]. En Honduras evaluaron mezclas sustituyendo a la cal por cemento en 25%, 30%, 35%, 40%, 45%, todos sus experimentos los evaluaron con las normas ACI y ASTM, fabricaron bloques con estas mezclas y el que presentó mejor resistencia a los 7 días dentro de las iteraciones propuestas fue el de 30% de sustitución de cal con (59.76 kg/cm<sup>2</sup>) y absorción de 0.0002 (kg/cm<sup>3</sup>) [7]. En España desarrollaron probetas con cal y cenizas como aglutinantes y los valores más elevados a la resistencia mecánica fue de 28.04 kg/cm<sup>2</sup> al cabo de 28 días de curado. Otra probeta ensayada con la misma mezcla fue carbonatada de manera acelerada logrando a los 14 días de curado 34.36 kg/cm<sup>2</sup>. Para las resistencias más elevadas con probetas a base de cal y cemento blanco y probetas con cal y cemento blanco carbonatadas presentaron a los 35 días de curado 134.71 kg/cm<sup>2</sup> y 234.84 kg/cm<sup>2</sup> respectivamente. Realizó otras probetas a las cuales añadió superplastificantes combinando cal, cemento y cenizas obtuvo 90.55 kg/cm<sup>2</sup>, la misma mezcla carbonatada alcanzó 111.66 kg/cm<sup>2</sup> ambas a los 21 días de curado [8].

Sin embargo, no se han encontrado reportes en donde se haya evaluado a la cal CaO junto con el polvo de piedra (PP) y el polietileno de alta densidad (HDPE), por lo que, el objetivo de esta investigación fue elaborar mezclas de morteros incorporando porcentualmente cal CaO en el cemento y polvo de piedra de desecho (PP) obtenido de la trituración de la piedra de cerro en bancos de grava en Tabasco y que no es aprovechado junto con polietileno de alta densidad de reciclaje (HDPE) porcentualmente en la arena caliza del río Samaria donde se extrae con dragado, evaluando si podrían cumplir con las normas mexicanas de resistencia a la compresión para bloques.

## DESARROLLO

### *Materiales y métodos*

#### *Obtención de las materias primas*

Materias primas: la cal CaO fue proporcionada por la empresa Calidra ubicada sus oficinas en la carretera Villahermosa-Cárdenas en Tabasco, polvo de piedra, cemento comercial y arena proporcionada por la empresa Grupo SUPERICO S.A. de C.V., y polietileno de alta densidad (HDPE) adquirida en la Empresa Tabasqueña que se dedica al reciclaje de plásticos POLIPLAST ubicada en la carretera Villahermosa-Cárdenas en Tabasco comprada por Grupo SUPERICO S.A. de C.V.

### Análisis granulométrico

Tomando como guía la NMX-C-111-ONNCCE-2017 se realizó un análisis granulométrico a los materiales conocidos como agregados finos, los cuales fueron la arena, polvo de piedra residual (PP) y polietileno de alta densidad (HDPE). Los tres materiales fueron cribados y las partículas utilizadas en las mezclas fueron las que pasaron la malla 50, con diámetros menores a 0.297 mm para garantizar que las partículas fueran heterogéneas [9].

### Densidad de los materiales

Se determinó la densidad del cemento, cal CaO, arena, polvo de piedra residual (PP) y polietileno de alta densidad (HDPE) en el Laboratorio de Investigación II del Tecnológico Nacional de México / I.T. Villahermosa, como lo establece la norma mexicana Vigente NMX-C-571-ONNCCE-2021 [10].

### Diseño de mezclas experimentales

Se diseñaron tres tratamientos de las mezclas donde se sustituye porcentualmente en el cemento la cal CaO y en la arena porcentualmente el polvo de piedra junto con el HDPE con diferentes porcentajes, aquí se tomó como base teórica el Manual del Constructor Cemex Concretos en su página 19, Tabla 43 proporcionamientos para morteros, encontrando que para bloques la relación adecuada es la proporción 1:6 (un saco de cemento de 50 kg y 6 botes de 19L). [11].

**Tabla 1.** Porcentajes utilizados en los especímenes Testigo proporción 1:6 para bloques.

Tratamiento	Material	Porcentaje
Testigo	Cemento	20 %
	Arena	80%

Nota: Elaborada por autores

Se observa en la Tabla 1 los porcentajes utilizados de material cemento y arena para el diseño de las muestras testigo y de manera similar en la Tabla 2 se presentan los porcentajes de materiales utilizados en el diseño de las muestras de los tres tratamientos

**Tabla 2.** Porcentajes utilizados en los especímenes de los tres tratamientos proporción 1:6 para bloques.

Tratamiento	Material	Porcentaje
Tratamiento 1	Cemento	17.5 %
	Arena	75%
	Cal	2.5%
	HDPE (PERT)	2.5%
Tratamiento 2	Polvo piedra (PP)	2.5 %
	Cemento	15 %
	Arena	72.5%
	Cal	5%
Tratamiento 3	HDPE (PERT)	5%
	Polvo piedra (PP)	2.5 %
	Cemento	12.5 %
	Arena	70%
Tratamiento 3	Cal	7.5%
	HDPE (PERT)	7.5%
	Polvo piedra (PP)	2.5 %

Nota: Elaborada por autores

### Elaboración de las muestras experimentales

Con base en las normas NMX-C-159-ONNCCE-2016 y Norma ASTM C1437, se elaboraron los especímenes de la mezcla testigo en moldes cilíndricos de 5 cm de diámetro y 10 cm de altura cada uno, colocando en la charola la cantidad de arena y cemento calculada para el volumen de 14 cilindros de 0.2749 m<sup>3</sup>, ver (Figura 1) [12] [13].



**Figura 1.** Preparación de la mezcla y cilindros experimentales  
Nota: Tomada por autores.

Pasadas 48 horas todas las muestras se desmoldan y se colocan en contenedores adecuados con agua, para iniciar el proceso de curado ver (Figura 2).



**Figura 2.** Curado de especímenes a los 7, 14 y 28 días  
Nota: Tomada por autores.

El procedimiento anterior se repitió para los tres tratamientos (T1, T2, T3) en esta ocasión se incluyó porcentualmente la cal CaO en el cemento y el polvo de piedra junto con el HDPE en la arena.

### ***Prueba a la compresión***

Basándose en las normas: NMX-C-083-ONNCCE-2002, NMX-C-109-ONNCCE-2013 de los especímenes testigo y tres tratamientos se sometieron a los ensayos de resistencia a la compresión [14] [15].

Al cumplir la edad de ensayo, los especímenes se retiraron de los tanques de almacenamiento, estos se cubren con una tela húmeda hasta el momento del ensaye para evitar la pérdida de humedad, y se trasladan al laboratorio donde se le realizan los ensayos a la compresión con las tolerancias de tiempo recomendadas.

Las tolerancias se tomaron en cuenta a partir del momento en que se retiran los especímenes del agua (Figura 3).



**Figura 3.** Cilindros recién retirados del tanque de almacenamiento evitando la pérdida de humedad.  
Nota: Tomada por autores

### ***Cabeceo de los especímenes***

Para obtener resultados confiables en los ensayos se necesita que las caras de los especímenes tengan superficies planas, para lo cual se requiere de un cabeceo, preparado con cemento puro o mortero de azufre en las bases de los especímenes cilíndricos para lograr el paralelismo entre las caras para la prueba a la compresión. El mortero de azufre se elabora con una proporción de 75% azufre y 25% arena, ver (Figura 4 y 5).



**Figura 4.** Base de metal para el cabeceo de los especímenes  
Nota: Tomada por autores



**Figura 5.** Especímenes con cabeceo de mortero 75% azufre y 25% arena.

Nota: Tomada por autores

### Ensayo de especímenes testigos y experimentales

La prueba resistencia a la compresión se lleva a cabo a los 7, 14 y 28 días, la cual se le realiza a 3 especímenes tomados completamente al azar basándose de acuerdo a la norma NXM-C-061-ONNCE y NMX-C-083-ONNCCE-2020 [16] [17].

El espécimen se coloca en la máquina centrándolo cuidadosamente con respecto a la placa superior. La carga se aplica de manera constante hasta la ruptura del espécimen sobre las caras de los especímenes que tuvieron contacto con las paredes verticales del molde ver (Figura 6).



**Figura 6.** Prueba de ensayo de resistencia a la compresión.

Nota: Tomada por autores

Se toma nota de los resultados en una bitácora.

### Diseño experimental

En la corrida experimental se empleó un diseño completamente al azar en un arreglo factorial de 4x3, con tres repeticiones para el testigo y tres tratamientos. Los factores fueron los tipos de tratamiento (T, T1, T2, T3) y los tiempos de ensayo a la compresión (7, 14, 28) días.

### Análisis estadístico

Todos los resultados obtenidos fueron evaluados en el programa estadístico Statgraphics centurion XVI.II®. Se compararon las variables de respuestas cuantitativas resistencia a la compresión del testigo y los tres tratamientos. Para determinar si existían diferencias estadísticas significativas se realizó una comparación de varias muestras donde el método empleado para discriminar entre las medias fue el procedimiento de diferencia mínima significativa LSD de Fisher con una  $p < 0.05$  y con un 95% de nivel de confianza. La resistencia de cada espécimen fue evaluada en base a los resultados de las diferencias entre el testigo y cada tratamiento utilizando los datos promedios de los resultados como lo establecen las normas mexicanas para block estructural NMX-C-404-ONNCCE-2012 ( $90 \text{ kg/cm}^2$ ) y block NO estructural NMX-C-441-ONNCCE-2013 ( $35 \text{ kg/cm}^2$ ) [18] [19].

## DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

### Densidades de los materiales

En la tabla 3 se presentan las densidades calculadas para las materias primas son para la arena  $1669.67 \text{ kg/m}^3$ , cemento  $1407.33 \text{ kg/m}^3$ , HDPE Sucio  $536 \text{ kg/m}^3$ , HDPE Limpio  $424 \text{ kg/m}^3$ , Polvo de Piedra (PP)  $1788 \text{ kg/m}^3$  y Cal CaO  $816 \text{ kg/m}^3$ .

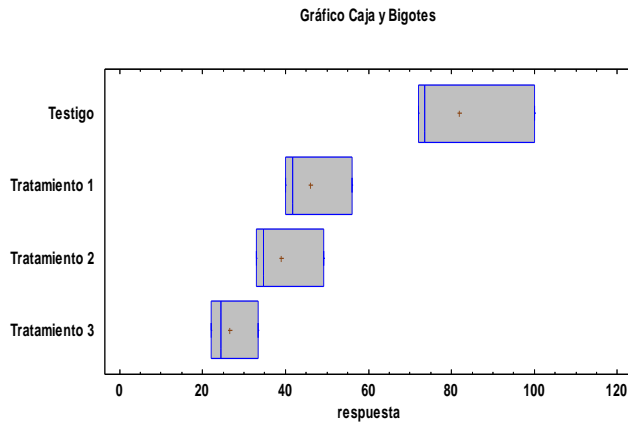
**Tabla 3.** Densidades calculadas de las materias primas

Densidades de los materiales ( $\text{kg/m}^3$ )					
Arena	1669.67	HDPE Sucio	536	P. d. Piedra	1788
Cemento	1407.33	HDPE Limpio	424	Cal	816

Nota: Elaborada por autores

### Evaluación de la resistencia del testigo y los tres tratamientos

La resistencia se calculó con una prueba destructiva, ensayo de resistencia a la compresión. Se observó que en los tres tratamientos disminuyó la resistencia con respecto al testigo (Figura 7).



**Figura 7.** Resistencia a la compresión

En la Tabla 4 se presentan los resultados de los 3 tratamientos y del testigo de sus resistencias obtenidas en ensayos a la compresión a las edades de 7, 14 y 28 días y sometidos a un proceso de curado de 28 días

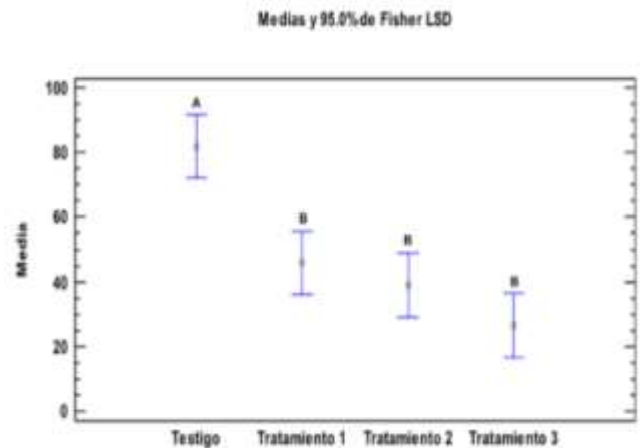
**Tabla 4.** Datos de resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días.

Tratamiento	Días	Resistencia			Normas Mexicanas	
		Cilindro 1	Cilindro 2	Cilindro 3	ESTRUC TURAL NMX-C-404-ONNCC E-2012 90kg/cm <sup>2</sup>	NO ESTRUCTURAL NMX-C-441-ONNCC-2013 35kg/cm <sup>2</sup>
Testigo	7	72.08	59.54	59.65	SI cumple	SI cumple
	14	73.64	72.08	73.01		
	28	97.28	100.01	100.08		
Tratamiento 1	7	39.98	42.27	41.25	NO cumple	SI cumple
	14	41.76	35.91	41.50		
	28	56.02	45.84	53.97		
Tratamiento 2	7	30.01	33.04	30.98	NO cumple	SI cumple
	14	34.77	34.75	33.66		
	28	47.54	49.21	47.64		
Tratamiento 3	7	22.05	23.00	22.97	NO cumple	NO cumple
	14	24.13	23.31	24.33		
	28	33.41	33.39	32.99		

Nota: Elaborada por autores

**Resistencia.**

El análisis de comparación de varias muestras utilizando el método empleado para discriminar entre las medias fue el procedimiento de diferencia mínima significativa LSD de Fisher con una  $p < 0.05$  y con un 95% de nivel de confianza demostró que si existen diferencias significativas entre el testigo que alcanzó una resistencia a los 28 días de 100.08 kg/cm<sup>2</sup> demostrando que la variable de respuesta resistencia si impactó en el tratamiento 1 que alcanzó 56.02 kg/cm<sup>2</sup> el tratamiento 2 con 49.21 kg/cm<sup>2</sup> y por último el tratamiento 3 con 33.41 kg/cm<sup>2</sup> Ver (Figura 8).



**Figura 8.** Resistencia a la compresión

Nota: Letras distintas muestran diferencias estadísticamente significativas (N=36).  
Elaborado por autores

A continuación la Tabla 5 muestra la media para cada columna de datos. También muestra el error estándar de cada media, el cual es una medida de la variabilidad de su muestreo. El error estándar es el resultado de dividir la desviación estándar mancomunada entre el número de observaciones en cada nivel. La tabla también muestra un intervalo alrededor de cada media. Los intervalos mostrados actualmente están basados en el procedimiento de la diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Están contruidos de tal manera que, si dos medias son iguales, sus intervalos se traslaparán un 95.0% de las veces.

**Tabla 5.** Tabla de medias con intervalos de confianza de 95.0%

	Casos	Media	Error Est.		
			(s agrupada)	Límite Inferior	Límite Superior
Testigo	3	81.9333	6.05412	72.0615	91.8052
Tratamiento 1	3	45.92	6.05412	36.0482	55.7918
Tratamiento 2	3	39.0067	6.05412	29.1348	48.8785
Tratamiento 3	3	26.5967	6.05412	16.7248	36.4685
Total	12	48.3642			

## DISCUSION

En Ecuador evaluaron adobes que contenían cangahua, cal, arcilla y paja que presentaron características mecánicas acordes a las normativas, los mejores resultados a la resistencia se presentaron al utilizar solo cangahua, así como al utilizar arcilla en porcentajes de 10% y 20% en volumen, afirman que cumplieron ampliamente para la normativa peruana E.80 (10.2 kg/cm<sup>2</sup>). El impacto de la cal hidratada de procedencia artesanal e industrial al ser combinadas con cangahua disminuyó la resistencia a la compresión de los morteros (Viera et al., 2023). [6].

En contraste la presente investigación se centró en el diseño de mezclas experimentales de mortero sustituyendo la cal CaO porcentualmente en el cemento y el polvo de piedra de desecho (PP) junto con el polietileno de alta densidad (HDPE) porcentualmente en la arena.

En Honduras evaluaron mezclas sustituyendo a la cal por cemento en 25%, 30%, 35%, 40%, 45%, todos sus experimentos los evaluaron con las normas ACI y ASTM, fabricaron bloques con estas mezclas y el que presentó mejor resistencia a los 7 días dentro de las iteraciones propuestas fue el de 30% de sustitución en Cal con 850 [psi], que además presentó una absorción de 10.93 [lb/pie<sup>3</sup>] (Perdomo y García, 2022). [7]

En la presente investigación se elaboraron especímenes testigo en proporción 1:6 cómo indica el manual del constructor para bloques y tres tratamientos T (Cal, PP, HDPE) elaborando 14 especímenes por cada mezcla T1(2.5%, 2.5%, 2.5%), T2(5%, 2.5%, 5%) y T3(7.5%, 2.5%, 7.5%) respetando las NMX-C-111-ONNCCE-2017, NMX-C-159-ONNCCE-2016. Se evaluaron por triplicado completamente al azar la resistencia a los R (7, 14, 28) días con las NMX-C-083-ONNCCE-2020, NMX-C-109-ONNCCE-2013.

La Escuela Politécnica Superior de Edificación de Barcelona España desarrolló una investigación donde elaboraron probetas con cal y cenizas como aglutinantes y los valores más elevados a la resistencia mecánica fueron: la probeta 1DH alcanzo 2,75 N/mm<sup>2</sup> al cabo de 28 días de curado. La M3H2 con 3,37 N/mm<sup>2</sup>, ensayada a los 14 días de su curado, la presente fue carbonatada de manera acelerada, la “blanca” de la M3H2 con 12,94 N/mm<sup>2</sup>, ensayada a los 14 días de su curado, de igual manera esta fue carbonatada de manera acelerada. Para las resistencias más elevadas con probetas a base de cal y cemento blanco encontraron que la M4C3 alcanzo 13,21 N/mm<sup>2</sup> al cabo de 35 días de curado, la “blanca” presento unos 23,03 N/mm<sup>2</sup> a los mismos 35 días de curado. Dentro de los resultados para muestras a la cual se le añadió superplastificantes, así como la combinación de la cal y el cemento con las cenizas, lograron que la M6HC5 obtuvo 8,88 N/mm<sup>2</sup> al cabo de 21 días de curado, la “blanca” alcanzo 10,95 N/mm<sup>2</sup>, al cabo de 21 días de curado (Lagares, 2018). [8]

Para finalizar en nuestra investigación los resultados de respuesta fueron para R-Testigo (72.08, 73.64, 100.08) kg/cm<sup>2</sup>, R-T1(39.98, 41.76, 56.02) kg/cm<sup>2</sup>, R-T2(33.04, 34.77, 49.21) kg/cm<sup>2</sup>, R-T3(22.05, 24.33, 33.41) kg/cm<sup>2</sup>. Ninguno de los tratamientos cumplió con la NMX-C-404-ONNCCE-2012 que solicita 90 kg/cm<sup>2</sup> para bloques estructurales, sin embargo los tratamientos T1 y T2 cumplen con la NMX-C-441-ONNCCE-2013 que determina 35kg/cm<sup>2</sup> para bloques no estructurales.

## CONCLUSIONES

### Densidad

Los resultados obtenidos nos mostraron que cuando se fue sustituyendo porcentualmente la cal en el cemento y el HDPE junto con el PP en la arena, en rangos de 2.5% este cambio si disminuye el peso de los especímenes al compararlo con el peso de los especímenes testigo, estos resultados lo atribuimos a la densidad del HDPE que fue bastante baja respecto a las demás materias primas utilizadas, estos datos coinciden con lo reportado por Gómez en 2011, que sustituyeron cantidades pequeñas de PEAD en morteros (Gómez *et al.*, 2011) [20].

### Resistencia

La resistencia a la compresión de los especímenes de los tres tratamientos en donde se fue variando porcentualmente la cal en el cemento y el HDPE en la arena donde el PP se mantuvo constante su sustitución, esta disminuyó con respecto a los especímenes testigo, se coincide con lo reportado por Viera en 2023 y Perdomo y *cía.* en 2022, que afirman que el utilizar cal en mezclas de morteros disminuye la resistencia. Por otra parte, podemos concluir que integrar en las mezclas el PP le permite a los especímenes llegar a las resistencias que exigen las normas mexicanas, coincidiendo con resultados de Lagares en 2018 que para lograrlo a las mezclas las carbonató y sólo de esa manera logró obtener mayores resistencias en sus probetas experimentadas.

Se concluye que de los tres tratamientos experimentados en esta investigación los tratamientos 1 y 2 lograron resistencias que permitirá su uso en la fabricación de bloques no estructurales, quedando ampliamente demostrado que si es posible reinsertar residuos que contaminan el medio ambiente de forma segura en las edificaciones sin poner en riesgo al ser humano y ofreciendo una alternativa ecológica y sustentable.

Como futuras líneas de investigación se propone hacer nuevas experimentaciones cambiando el porcentaje de cal, polvo de piedra y HDPE con el objetivo de reducir costos y la huella de carbono que deja el cemento, ya que a pesar que la resistencia a la compresión no alcanzo el nivel estructural hay suficiente margen para seguir en la zona de no estructural.

Escalar los resultados de esta investigación para la fabricación de bloques y adoquines para uso no estructural en la industria de la construcción.

Para finalizar, los resultados obtenidos además de cumplir con la normatividad vigente en la materia, se asegura resistencia, calidad y seguridad, y además se abre la puerta a oportunidades para mejorar el entorno, reducir residuos y promover el reciclaje. La mezcla desarrollada se perfila como una alternativa ecológica y eficiente que, tras ser avalada por el Tecnológico Nacional de México campus Villahermosa y Grupo SUPERICO, será implementada en la fabricación de bloques ecológicos.

### AGRADECIMIENTOS

Al Tecnológico Nacional de México por otorgar para el año 2022 un financiamiento para realizar esta investigación con clave 14108.22-P y financiamiento para el año 2023 con clave 17322.23-P.

A la empresa SU PERICO S.A. de C.V., por patrocinar todos los materiales para esta investigación y crear firmemente en esta propuesta, en los años 2022 y 2023.

A los estudiantes del Tecnológico Nacional de México / I.T. Villahermosa que realizaron su servicio social y residencia profesional ya que sin ellos no se hubiese logrado.

### BIBLIOGRAFÍA

[1] Rodgers, Lucy (2018). La enorme fuente de emisiones de CO2 que está por todas partes y que quizás no conocías. Publicado por BBC News Mundo el 17 diciembre 2018. Consultado el 25 de enero de 2023. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-46594783>

[2] PNUMA (2014). Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. “Arena, más rara de lo que se piensa”. Marzo de 2014. [https://hmong.es/wiki/Sand\\_Wars](https://hmong.es/wiki/Sand_Wars).

[3] Vanguardia (2023). La arena, una emergencia medioambiental de la que nadie habla. Consultado el 25 de enero de 2023. <https://www.lavanguardia.com/natural/20170430/422038159271/arena-mergencia-medioambiental.html>

[4] Keobra, (2021). Conoce los usos de la cal en la construcción y sus proporciones. Consultado el 1 de febrero de 2023. <https://keobra.com/usos-de-la-cal-en-construccion>

[5] Boots, Bas & Russell, Connor & Green, Dannielle. (2019). Effects of Microplastics in Soil Ecosystems: Above and Below Ground. Environmental Science & Technology. 53.10.1021/acs.est.9b03304. Consultado el 15 mayo 2023. [https://mx.boell.org/es/2021/03/10/impacto-de-la-contaminacion-por-plasticos-en-la-biodiversidad-y-patrimonio-biocultural#:~:text=En%20el%20caso%20de%20los,HDPE\)%2C%20usado%20en%20envases%20y](https://mx.boell.org/es/2021/03/10/impacto-de-la-contaminacion-por-plasticos-en-la-biodiversidad-y-patrimonio-biocultural#:~:text=En%20el%20caso%20de%20los,HDPE)%2C%20usado%20en%20envases%20y)

[6] Viera, P., Gallegos, Y., & Venegas, E., (2023). Resistencia a la compresión y flexión de bloques elaborados a base de cangahua, cal, arcilla y paja. Novasineria. 6(1). 150-166. DOI: <https://doi.org/10.37135/ns.01.11.10>

[7] Perdomo Pinto, D.A., García López, J.E., (2022). Análisis comparativo entre bloques de concreto a base de cemento y bloques de concreto con sustitución parcial de cal en San Pedro Sula. Universidad Tecnológica Centroamericana. Facultad de Ingeniería. República de Honduras. (Tesis). Consultado el 20 noviembre de 2022. URI: <https://repositorio.unitec.edu/xmlui/handle/123456789/10153>.

[8] Lagares Guerrero, G. M. (2018). Bloques ecológicos transpirables no permeables, mediante la utilización de residuos o cenizas producidas por la incineración del bagazo de la caña de azúcar. Escuela Politécnica Superior de Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya. (Tesis). Consultado el 16 de mayo de 2022.

[9] Norma Mexicana NMX-C-111-ONNCCE-2017: Industria de la Construcción -Agregados para Concreto Hidráulico- Especificaciones y Métodos de Ensayo (Cancela a la NMX-C-111-ONNCCE-2014).

[10] Norma Mexicana NMX-C-571-ONNCCE-2021: Industria de la Construcción -Materiales Pétreos-Densidades Relativas y Absorción de Materiales Pétreos-Métodos de Ensayo

[11] Concretos CEMEX. Manual del Constructor. <https://www.cemexmexico.com/documents/27057941/45587277/aplicaciones-manual-construccion-general.pdf/772d227d-d168-efc4-a2e3-86ba78c80cb4>

[12] Norma Mexicana NMX-C-159-ONNCCE-2016 y Norma ASTM C1437. Industria de la Construcción-Elaboración y Curado de Especímenes de Ensayo-Especificaciones y Métodos de Ensayo (Cancela a la NMX-C-159-ONNCCE-2004 y NMX-C-160-ONNCCE-2004).

[13] Norma ASTM C1437. Fluides de Morteros.

[14] Norma Mexicana NMX-C-083-ONNCCE-2020. Industria de la Construcción -Concreto- Determinación de la Resistencia a la Compresión de Especímenes -Método de Ensayo (Cancela a la NMX-C-083-ONNCCE-2014).

[15] Norma Mexicana NMX-C-109-ONNCCE-2010. Industria de la Construcción - Concreto Hidráulico - Determinación del Cabeceo de Especímenes (Cancela a la NMX-C-109-ONNCCE-2004)

[16] Norma Mexicana NXM-C-061- ONNCE-2015. Determinación de la Resistencia a la Compresión de Cementantes Hidráulicos -Especificaciones y Métodos de Ensayo (Cancela a la NMX-C-061-ONNCCE-2010).

[17] Norma Mexicana NMX-C-083-ONNCCE-2020. Determinación de la Resistencia a la Compresión de Especímenes -Método de Ensayo (Cancelará a la NMX-C-083-ONNCCE-2014).

[18] Norma Mexicana NMX-C-404-ONNCCE-2012. Industria de la Construcción – Mampostería - Bloques, Tabiques o Ladrillos y Tabicones para Uso Estructural -

Especificaciones y Métodos de Ensayo (Cancela a la NMX-C-404-ONNCCE-2005).

[19] Norma Mexicana NMX-C-441-ONNCCE-2013 Industria de la Construcción – Mampostería - Bloques, Tabiques o Ladrillos y Tabicones para Uso No Estructural - Especificaciones y Métodos de Ensayo (Cancela a la NMX-C-441-ONNCCE-2011).

[20] Gómez, M., Carvajal, A. M., & Santelices, V. (2011). Influencia del polietileno de alta densidad (PEAD) usado como adición en el mortero de cemento. Revista De La Construcción, 10(3), 110-121.

<https://doi.org/10.4067/s0718-915x2011000300011>

### ROLES DE CONTRIBUCIÓN

Rol	Autor (es)
<b>Conceptualización</b>	Ricardo Díaz Palacios
<b>Curación de datos</b>	Carlos Rodríguez Jiménez
<b>Metodología</b>	Ricardo Díaz Palacios
<b>Administración del proyecto</b>	Ricardo Díaz Palacios (principal) Mario José Romellón Cerino, Carlos Rodríguez Jiménez, Nelson de Jesús López Acopa (que apoyan).
<b>Recursos</b>	Carlos Rodríguez Jiménez
<b>Software</b>	Mario José Romellón Cerino
<b>Supervisión</b>	Carlos Rodríguez Jiménez (principal) Mario José Romellón Cerino y María Berzabé Vázquez González (que apoyan)
<b>Validación</b>	Carlos Rodríguez Jiménez (principal) María Berzabé Vázquez González (que apoya)
<b>Visualización</b>	Nelson de Jesús López Acopa
<b>Redacción</b>	Ricardo Díaz Palacios (principal) Carlos Rodríguez Jiménez Nelson de Jesús López Acopa, Mario José Romellón Cerino (que apoyan).
<b>Redacción</b>	Ricardo Díaz Palacios (principal) Carlos Rodríguez Jiménez Nelson de Jesús López Acopa, Mario José Romellón Cerino (que apoyan).



Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución 4.0.