

# Aporte Santiaguino



Aporte Santiaguino 15 (1), enero - junio 2022: 22-42

ISSN: 2070 – 836X; ISSN-L: 2616 - 9541

DOI: <https://doi.org/10.32911/as.2022.v15.n1.882>

Website: [http://revistas.unasam.edu.pe/index.php/Aporte\\_Santiaguino](http://revistas.unasam.edu.pe/index.php/Aporte_Santiaguino)



## Módulo de rotura, densidad y desgaste por humedecimiento y secado de la unidad de adobe compactado con cal y/o yeso

### Modulus of rupture, density and wear due to moistened and drying of compressed adobe brick with lime and/or gypsum

RICHARD DEPAZ BLÁCIDO<sup>1</sup>

#### RESUMEN

En esta investigación se analiza el comportamiento del módulo de rotura, la densidad, y, el desgaste por humedecimiento y secado al incluir cal y/o yeso (entre 0% a 8% en 24 tratamientos y 2 tratamientos control) en la unidad de adobe compactado elaborado con tierra tamizada de un suelo arena arcillosa con grava. El módulo de rotura se obtuvo por un ensayo de viga simplemente cargada en el punto medio; la densidad por la medición directa de las dimensiones y la masa; el desgaste por humedecimiento y secado mediante cinco ciclos de medición; y su comportamiento se modeló con el método geoestadístico Kriging ordinario. Aplicando la prueba de Kruskal-Wallis, y ANOVA de un factor y de dos factores, se encontró que la inclusión de cal y/o yeso influye significativamente ( $p\text{-valor} < \alpha = 0,05$ ) en el incremento del módulo de rotura ( $0,660 \leq M_r \leq 0,925$  MPa), la reducción de la densidad ( $1,806 \leq \rho \leq 1,958$  g/cm<sup>3</sup>), y

<sup>1</sup> Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo. Huaraz, Perú.

©Los autores. Este artículo es publicado por la Revista Aporte Santiaguino de la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la Licencia Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), que permite: Compartir - copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato, Adaptar - remezclar, transformar y construir a partir del material para cualquier propósito, incluso comercialmente.

la reducción del desgaste por humedecimiento y secado ( $0,00 \leq DHS \leq 58,92$  %) respecto a los tratamientos control. Asimismo, las proporciones óptimas de cal/yeso son de 2/1 a 4/1 con un mínimo de 2,0% de cal y 0 a 1/5 con un mínimo de 4,5% de yeso.

**Palabras clave:** Adobe compactado; cal; yeso.

## ABSTRACT

This research analyzes the behavior of the modulus of rupture, the density, and the wear due to moistened and drying when including lime and/or gypsum (between 0% to 8% in 24 treatments and 2 control treatments) in the compressed adobe brick made with sifted earth from a soil clayey sand with gravel. The modulus of rupture was obtained by a test of simply loaded beam in the middle point; the density by direct measurement of dimensions and mass; the wear due to moistened and drying by five measurement cycles; and, its behavior was modeled with the geostatistical method of ordinary Kriging. Applying the Kruskal-Wallis test, and the one-factor and two-factor ANOVA, it was found that the inclusion of lime and gypsum significantly influences ( $p\text{-value} < \alpha = 0.05$ ) on the increase of modulus of rupture in bending ( $0.660 < M_r < 0.925$  MPa), the reduction of density ( $1.806 \leq \rho \leq 1.958$  g/cm<sup>3</sup>), and the reduction of wear due to moistened and drying ( $0.00 < DHS < 58.92$  %). Likewise, the optimal lime/gypsum ratios are 2/1 to 4/1 with a minimum of 2.0% lime and 0 to 1/5 with a minimum of 4.5% gypsum.

**Keywords:** Compressed adobe brick; lime; gypsum.

## INTRODUCCIÓN

La tierra es el material constructivo más antiguo usado para edificaciones (Yamin Lacouture et al., 2007), la tierra húmeda al secarse y endurecerse alcanza una importante resistencia a la compresión, pero con baja resistencia a la tracción (Blondet et al., 2011).

En la actualidad, un tercio de la humanidad vive en viviendas de tierra (Minke, 2005). En el Perú, se construyen viviendas de adobe por su fácil accesibilidad, bajo costo, tradición, buen aislamiento térmico y acústico (Kuroiwa, 1987), y por ser ecológicamente compatibles con la naturaleza (Blondet et al., 2011); el 32,6% del total de las viviendas en el Perú son de adobe y tapial; de estos, el 20,4% se ubican en la zona urbana y el 72,6% en la zona rural; porcentajes que no han variado significativamente desde el año 2007 (Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2018). Asimismo, en el Perú las edificaciones de adobe poseen vulnerabilidad sísmica alta; las fallas sísmicas de los muros de tierra simple son frágiles, súbitas, y fatales para los habitantes (Blondet et al., 2011); y cuando no poseen un diafragma rígido como techo, presentan efectos críticos por momentos flexionantes (Yamin et al., 2003); en Pisco, durante el sismo del 2007, las viviendas de adobe sin ningún refuerzo se derrumbaron o sufrieron un fuerte daño estructural (Blondet et al., 2008). Esta vulnerabilidad se incrementa por el deterioro de las unidades de adobe y de sus propiedades mecánicas, frecuentemente por la edad, problemas de humedad, filtraciones, así como, irregularidades en la estructuración en planta, en altura y en la cubierta, entre otros (Yamin Lacouture et al., 2007).

A diferencia de otros materiales, la tierra empleada para elaborar adobes tiene tres desventajas: no es un material de construcción estandarizado, el barro se contrae al secarse, y el adobe no es impermeable (Minke, 2005); asimismo, presentan los siguientes inconvenientes: soporta la compresión, pero su flexión, torsión y tracción es prácticamente nula, así como su lenta evolución como material de construcción en comparación al resto (Hernández Pocero, 2016). Por otra parte, el adobe tiene muchas ventajas: regula la humedad ambiental y el clima interior, es reutilizable, permite ahorrar energía y disminuir la contaminación ambiental, economiza materiales de construcción y costos de transporte, es apropiado para la autoconstrucción, y preserva la madera y otros materiales orgánicos (Minke, 2005).

Para mejorar la resistencia sísmica de los muros de adobe se incorporan refuerzos compatibles y resistentes a la tracción; experimentalmente se han probado varios materiales como: cañas, sogas naturales o artificiales, tubos de PVC, mallas plásticas (Blondet et al., 2011) y polímero

geomesh enyesado con lodo (Blondet et al., 2008). Estas soluciones pretenden mejorar el comportamiento sísmico de la edificación de adobe en su conjunto. Por otro lado, se han desarrollado investigaciones para mejorar la resistencia mecánica de la unidad de adobe mediante la adición a la tierra de otro material: como confitillo (Cáceres Luján, 2010), alga *Gelidium sesquipedale* y tierras diatomeas (Amorós García, 2011), cal (Quiteño, 2015), entre otros; asimismo, esta adición puede mejorar otras propiedades físicas y químicas de la unidad de adobe, como: resistencia a compresión, resistencia a la flexión, resistencia a absorción de la humedad, durabilidad, reducción de la filtración, entre otras.

La estabilización de la tierra, mediante la incorporación de otros materiales a la mezcla de tierra y el proceso de fabricación de la unidad de adobe, posibilita la transformación y adecuación del adobe a las distintas exigencias constructivas mejorando sus propiedades mecánicas, permeabilidad y condiciones fisicoquímicas (Bozzano Ciavaglia, 2017). Es el caso del yeso, la cal o el cemento (Crespo Escobar, 2010).

Teniendo en cuenta los hábitos constructivos, tradición, accesibilidad y costo, en esta investigación se analiza el comportamiento del módulo de rotura, la densidad, y el desgaste por humedecimiento y secado de la unidad de adobe compactado con inclusión de cal y/o yeso, o la combinación de ambas, determinando las proporciones más óptimas de cal/yeso.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

La investigación tiene un enfoque cuantitativo, es de nivel explicativo y aplica un diseño experimental; se enmarca en demostrar las siguientes hipótesis de investigación: La inclusión de cal y/o yeso incrementa el módulo de rotura, mantiene la densidad reduciendo el desgaste por humedecimiento y secado de la unidad de adobe compactado.

Las variables de investigación son: La cal ( $X_1$ , %) y/o yeso ( $X_2$ , %), que es el material conglomerante que agregada a la tierra modifica las propiedades de la unidad de adobe; el módulo de

rotura ( $M_r = Y_1$ , MPa), que es la resistencia a la flexión por medio de una viga simple cargada en el punto medio de la unidad de adobe; la densidad ( $\rho = Y_2$ , g/cm<sup>3</sup>), que es la relación entre la masa y el volumen de la unidad de adobe; y, el desgaste por humedecimiento y secado ( $DHS = Y_3$ , %) que es la resistencia a la absorción de la humedad por medio del desgaste en peso de la unidad de adobe sometido a un proceso de humedecimiento y secado.

Por otro lado, se controlaron las siguientes variables: durante la elaboración de los especímenes se mantuvo la misma tierra tamizada, la compactación con la misma máquina casera CINVA – RAM manipulada por un solo operador, la misma zona de secado al aire libre, en promedio la misma cantidad de agua según requerimiento de cada tratamiento; y durante los ensayos se mantuvo constante la velocidad de carga manipulada por un solo operador.

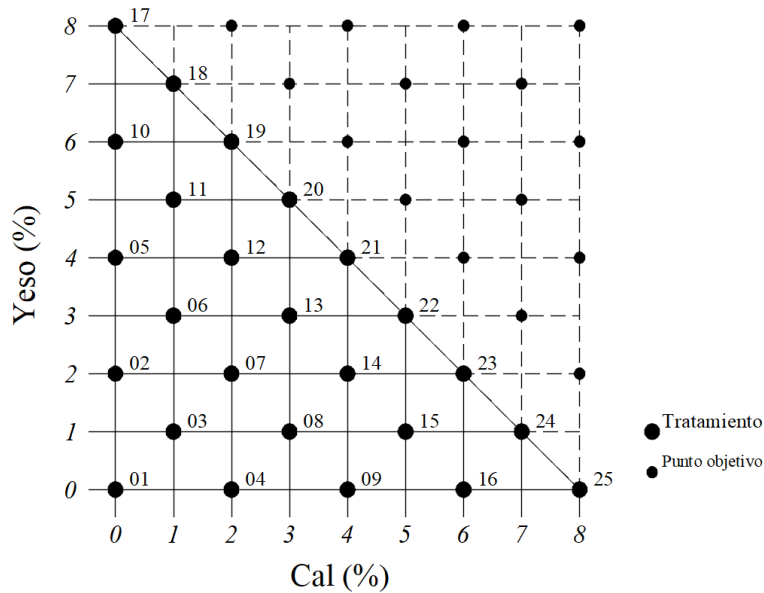


Figura 1. Arreglo bidimensional de los tratamientos.

Ante la ausencia de una varianza conocida del error experimental, el número de especímenes de adobe compactado fue elegido en cinco especímenes por cada tratamiento y variable dependiente; basada en que el número de réplicas varía entre cinco y diez (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2008), en que los resultados se obtienen de las cuatro mejores muestras de seis

(Ministerio de vivienda construcción y saneamiento, 2017) y, en que para verificar los ensayos se emplean cinco unidades (Dirección de normalización, 2017b).

Se combinaron diferentes niveles (porcentajes) de cal y yeso para obtener distintos tratamientos con una suma de 2, 4, 6 o 8% de cal y/o yeso (ver tratamientos en la Figura 1); basados en que la homogeneidad de cal se fija con un porcentaje mínimo de 2 o 3% (Jofré & Kraemer, 2017); para cal o yeso, el contenido total debe ser menor al 15% (Asociación Española de Normalización y Certificación, 2008), y para no disminuir la resistencia mecánica se requiere entre 4 y 8% de cal (Bozzano Ciavaglia, 2017). Asimismo, se consideraron dos tratamientos control, el tratamiento 01: adobe compactado sin cal o yeso; y el tratamiento 00, un adobe típico de tierra no compactado sin cal o yeso.

Se adoptó el método geoestadístico de predicción Kriging Ordinario Puntual con un variograma lineal para obtener modelos que expliquen el comportamiento de las variables dada por la Ecuación (1), donde  $Y_i$ : variable dependiente;  $Y_{i0(\mathbf{x}_0)}$ : predicción de la variable  $Y_i$  en  $\mathbf{x}_0$ : punto objetivo con  $X_1$  y  $X_2$  desconocido;  $n$ : número de tratamientos; y,  $\gamma(h)$ : función del modelo de variograma lineal no acotada. Kriging es el mejor predictor lineal insesgado que minimiza sus variaciones de error de predicción; es una media móvil ponderada cuyos pesos dependen del variograma que requiere solo la separación en distancia y dirección entre puntos (Oliver & Webster, 2015). En la Figura 1 se muestra el arreglo bidimensional del método y los puntos objetivos de predicción. En esta etapa no se considera el tratamiento 00.

$$Y_{i0(\mathbf{x}_0)} = \sum_{j=1}^n \lambda_j Y_{i(\mathbf{x}_j)} \quad , \quad i = 1,2,3 \quad , \quad \begin{array}{l} \mathbf{x}_j = (X_1, X_2)_j \\ \mathbf{x}_0 = (X_1, X_2)_0 \end{array} \quad (1)$$
$$\gamma(h) = c_0 + \rho h^\beta \quad , \quad 0 < \beta < 2$$

La elaboración de las unidades de adobe, las mediciones de dimensiones, masa y densidad, módulo de rotura, y del desgaste por humedecimiento y secado se realizaron en función de protocolos basados en normativa peruana (Dirección de normalización, 2017a, 2017b; Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016). Se obtuvo unidades de 28,9cmx15,0cmx9,7cm (medidas

promedio) para el módulo de rotura y la densidad, y mediante el corte de una unidad se obtuvo especímenes de 9,7cmx9,7cmx9,7cm (medidas promedio) para el desgaste por humedecimiento y secado. La elaboración se muestran en la Figura 2.

Las dimensiones para el cálculo de la densidad y del módulo de rotura se muestran en la Figura 3, y, la medición de dimensiones y masa en la Figura 4. Los valores de cada dimensión del espécimen se obtuvieron con la media de las diferentes posiciones de medición.

Los valores de la densidad de cada espécimen se obtiene con la Ecuación ( 2 ), donde  $m$ : masa (g),  $h$ : altura del adobe (cm),  $a$ : ancho del adobe (cm),  $b$ : longitud del adobe (cm); y, luego, con la media de los cinco especímenes por cada tratamiento.

$$\rho = \frac{m}{hab} \quad (2)$$



Figura 2. (a) Preparado de la mezcla tierra con cal y/o yeso, (b) compactado del adobe con una máquina casera CINVA – RAM, (c) desmoldaje, (d) zona de secado al aire libre, (e) adobe típico no compactado sin cal o yeso, y (f) almacenaje.

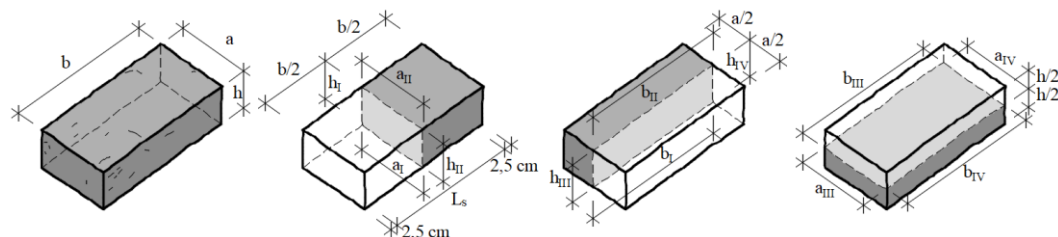


Figura 3. (a) Dimensiones de la unidad de adobe, (b), (c) y (d) diferentes posiciones de medición para la densidad, y (b) dimensiones y longitud entre apoyos para  $M_r$ .



Figura 4. Medición de las (a), (b) y (c) dimensiones y (d) masa de la unidad de adobe.

Los ensayos del módulo de rotura se muestran en la Figura 5; los valores de cada espécimen se obtiene con la Ecuación (3), donde:  $P$ : carga aplicada (kN),  $L_s = 24$  cm: longitud entre apoyos; y luego con la media de los cinco especímenes para cada tratamiento.

$$M_r = \frac{3 PL_s}{2 ah^2} \quad (3)$$



Figura 5. (a) y (b) Ensayo del módulo de rotura por tratamiento (escenario), y, (c) y (d) unidades ensayadas.

El proceso de medición y cálculo del desgaste por humedecimiento y secado se basó en lo establecido por la Dirección de normalización (2017b), ajustada a partir de un ensayo piloto y las condiciones distintas de la normativa. Antes del proceso se mide la masa inicial ( $m_0$ , g), luego se realizan cinco ciclos de medición ( $j = i, ii, iii, iv, v$ ). El ciclo de medición se inicia colocando los especímenes en bandejas con inmersión parcial con 1,50 cm de altura de agua por cuatro horas, para luego colocarlos al horno a 110°C por dieciocho horas; luego de retirado del horno se deja enfriar por una hora y se mide la masa del espécimen finalizando el ciclo ( $m_j$ , g). Al finalizar los cinco ciclos se almacena los especímenes por 5 días, luego se mide la masa final ( $m_{VI}$ , g). Los ensayos del desgaste por humedecimiento y secado se muestran en la Figura 6; los valores de cada espécimen por cada ciclo de medición se obtuvieron con la Ecuación (4) donde:



$DHS_j$  es el desgaste por humedecimiento y secado respecto a la masa inicial del espécimen por ciclo de medición en % y describe el comportamiento  $DHS$  en el tiempo,  $DHS_i$  al primer ciclo;  $DHS_{ii}$  al segundo ciclo; ... ;  $DHS_v$  al quinto ciclo; y,  $DHS_{vi}$  final, o simplemente  $DHS$ . Luego se determina la media de los cinco especímenes para cada tratamiento.

$$DHS_j = 100 \frac{m_0 - m_j}{m_0} \quad , \quad j = i, ii, iii, iv, v, vi \quad (4)$$

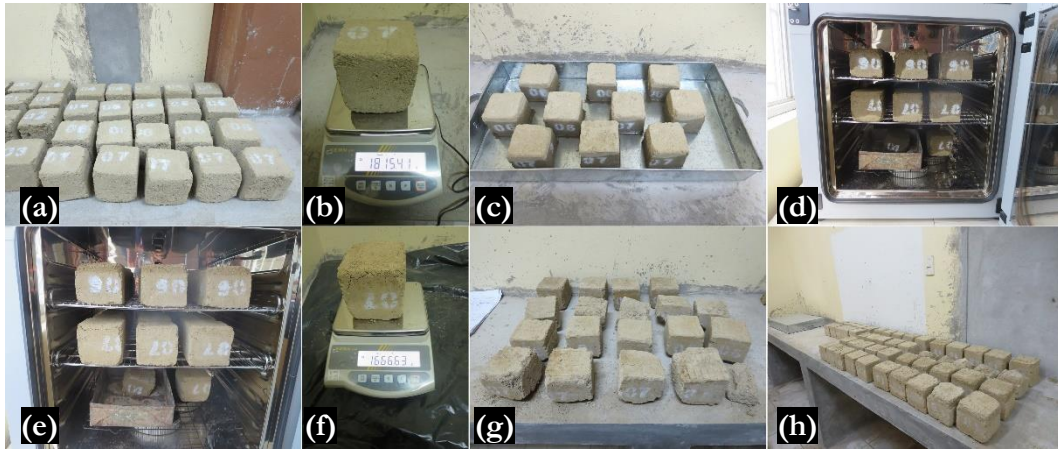


Figura 6. Ciclo de medición del  $DHS$ : (a) especímenes, (b) masa inicial, (c) inmersión parcial, (d) y (e) secado al horno, (f) masa siguiente ciclo. (g) Resultado final y (h) almacenaje.

Las hipótesis de investigación se verifican con la hipótesis estadística dada por la Ecuación (5), donde  $\tau_i$  es el efecto (incremento o reducción) del tratamiento  $i$  (inclusión de cal y yeso) sobre la variable dependiente, asumiendo una significancia predefinida de  $\alpha = 0,05$ . En esta etapa se incluyen los tratamientos control.

$$\begin{aligned} H_0: \tau_0 = \tau_1 = \dots = \tau_i = 0 \quad , \quad i = 0,1,2, \dots, 25 \\ H_A: \tau_i \neq 0 \quad \text{para algún } i \end{aligned} \quad (5)$$

Las pruebas de hipótesis se realizaron con un análisis de varianza (ANOVA) de un factor y la prueba de Kruskal-Wallis. Sin embargo, se considera al ANOVA lo bastante robusta a la falta de normalidad. La interacción de las variables independientes en cada variable dependiente se analizó con un ANOVA de dos factores. Los supuestos de normalidad se evaluaron con la prueba

de asimetría y curtosis y la prueba de Shapiro-Wilks; la homogeneidad de varianzas con la Prueba de Bartlett, e independencia, con la prueba de Durbin-Watson. Para comparar los tratamientos con los tratamientos control se empleó el método de Dunnett, y para evaluar si los tratamientos son diferentes o similares, se empleó el método de Tukey y el método de Duncan que se presentan con diagramas de caja simultáneo para mostrar las diferencias.

## RESULTADOS

En la elaboración de las unidades de adobe se empleó tierra tamizada de un suelo areno arcilloso con grava (SC) con un contenido de humedad natural de 3,61%, humedad óptima de 12,48%, encontrándose dentro de los rangos recomendados (Figura 7).

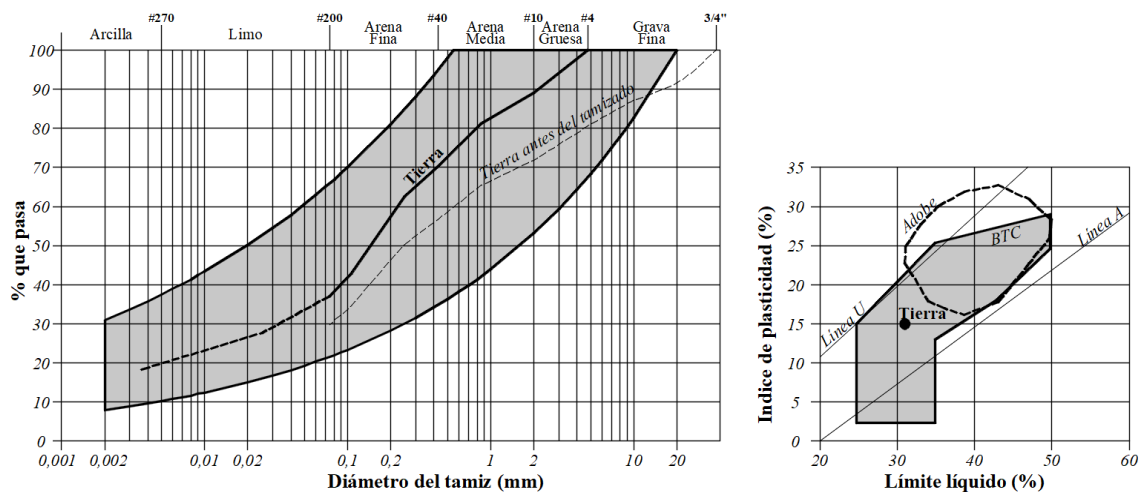


Figura 7. Granulometría y plasticidad de la tierra, zona recomendada por Hernández Pocero (2016) y la Asociación Española de Normalización y Certificación (2008)

Los resultados del módulo de rotura, densidad y desgastes por humedecimiento y secado se detallan en la Tabla 1; los modelos Kriging en la Figura 8; y, el desgastes por humedecimiento y secado por ciclo de medición se muestran la Figura 9.

Los supuestos de normalidad, homogeneidad de varianzas e independencia de las variables se detalla en la Tabla 2. La prueba de hipótesis de las variables se detalla en la Tabla 3 y Tabla 4.

Los tratamientos que son significativos respecto a los tratamientos control se detallan en la Tabla 5 y los tratamientos gráficamente en la Figura 10.

Tabla 1. Media de los especímenes por cada tratamiento y variable.

Módulo de rotura, MPa				Densidad, g/cm <sup>3</sup>				Desgaste por humedecimiento y secado, %			
Tto	$M_r$	Tto	$M_r$	Tto	$\rho$	Tto	$\rho$	Tto	DHS	Tto	DHS
16	0,313	05	0,588	20	1,806	08	1,918	16	0,24	11	6,76
13	0,460	07	0,597	25	1,808	09	1,919	09	0,40	06	8,60
00	0,464	11	0,622	24	1,811	12	1,922	25	0,56	17	31,48
09	0,492	18	0,632	13	1,820	11	1,935	24	1,24	05	34,26
22	0,540	21	0,643	22	1,825	04	1,943	15	1,46	10	40,40
04	0,547	03	0,660	14	1,828	00	1,950	22	1,54	07	46,96
15	0,557	20	0,715	21	1,832	07	1,957	23	1,68	03	47,46
01	0,566	24	0,734	23	1,840	10	1,958	21	1,96	14	58,92
19	0,569	10	0,753	15	1,843	03	1,966	04	1,98	12	92,64
12	0,571	17	0,822	19	1,851	17	1,968	18	3,04	13	92,94
02	0,580	23	0,856	16	1,854	02	2,017	20	3,08	02	100,00
06	0,587	08	0,863	18	1,880	01	2,019	19	3,22	01	100,00
25	0,588	14	0,925	06	1,907	05	2,040	08	6,44	00	100,00

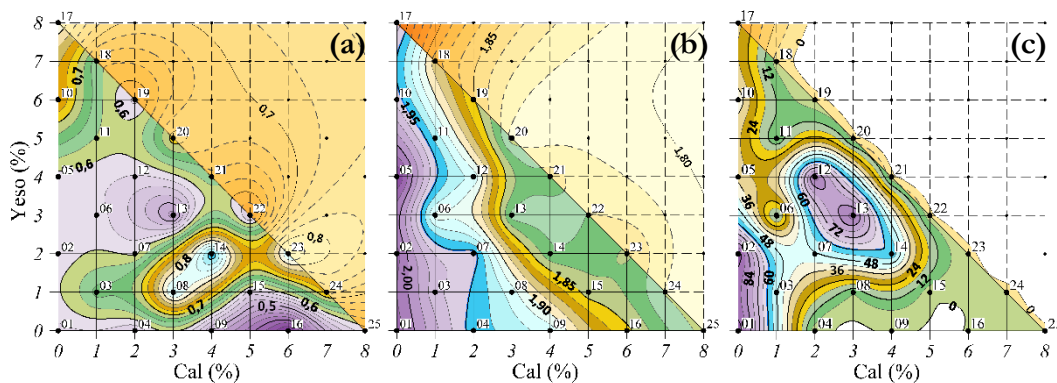


Figura 8. Modelo Kriging para (a)  $M_r$  en MPa, (b)  $\rho$  en g/cm<sup>3</sup>, y (c) DHS en %.

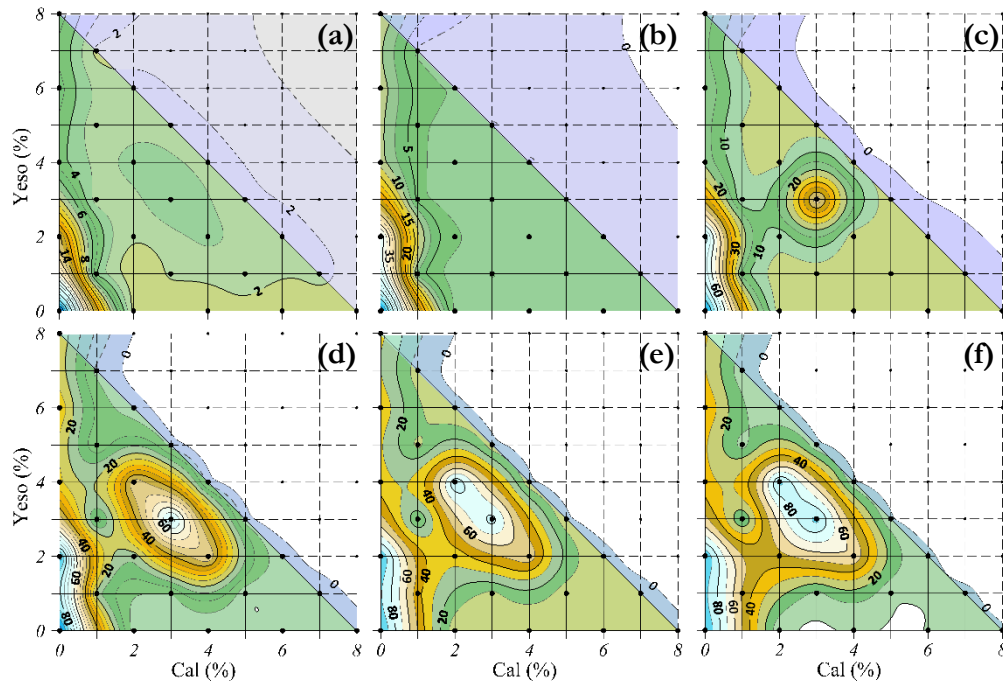


Figura 9. Modelo Kriging para el desgaste por humedecimiento y secado en % por ciclo de medición: (a) primer, (b) segundo, (c) tercer, (d) cuarto, (e) quinto ciclo, y (f) final.

Tabla 2. Normalidad, homogeneidad de varianzas e independencia de las variables.

Variable	Asimetría y cur- tosis		Shapiro – Wilks		Prueba de Bartlett		Prueba de Dur- bin –Watson	
	$\chi^2$	<i>p</i> -valor	W	<i>p</i> -valor	$\chi^2$	<i>p</i> -valor	DW <sub>orig</sub>	DW <sub>transf</sub>
$\rho$	7,59	0,0225	0,968	0,0035	52,37	0,001	1,781	2,005 <sup>d</sup>
$M_r$	10,88	0,0043	0,959	0,0005	36,61	0,063 <sup>c</sup>	2,099	1,991 <sup>d</sup>
$\sqrt{M_r}$	4,85	0,0883 <sup>a</sup>	0,973	0,0105	30,38	0,211 <sup>c</sup>	2,093	1,994 <sup>d</sup>
DHS	18,98	0,0001	0,766	0,0000	367,78 <sup>b</sup>	0,000	2,150	2,007 <sup>d</sup>

Nota: <sup>a</sup> No significativo, se ajusta a una distribución normal. <sup>b</sup> 3 Celdas de observación múltiple con varianza negativa no utilizadas. <sup>c</sup> No significativo. DW<sub>orig</sub> Original y DW<sub>transf</sub> Transformada; <sup>d</sup> No significativo en  $1,7252 < DW < 2,2748$  para  $k^*=1$ .  $n=130$ .

Tabla 3. Prueba ANOVA de un factor.

Variable	ANOVA de un factor <sup>a</sup>		Prueba de Kruskal-Wallis			
	$F_0$	$p$ -valor	$\chi^2$	$p$ -valor	$\chi^2_v$	$p$ -valor
$\rho$	26,44	0,0000 <sup>b</sup>	111,505	0,0001 <sup>b</sup>	111,511	0,0001 <sup>b</sup>
$M_r$	8,06	0,0000 <sup>b</sup>	81,188	0,0001 <sup>b</sup>	81,196	0,0001 <sup>b</sup>
$\sqrt{M_r}$	8,47	0,0000 <sup>b</sup>	81,188	0,0001 <sup>b</sup>	81,196	0,0001 <sup>b</sup>
<i>DHS</i>	61,85	0,0000 <sup>b</sup>	124,384	0,0001 <sup>b</sup>	124,873	0,0001 <sup>b</sup>

Nota: <sup>a</sup> Fuente de variabilidad: los tratamientos.  $GL_{Tos} = 25$  (grados de libertad).  $\chi^2$ : Chi cuadrada.  $\chi^2_v$ : Chi cuadrada con vínculos. <sup>b</sup> Significativo.

Tabla 4. Prueba ANOVA de dos factores con interacción de las variables.

Variable	Cal		Yeso		Cal#Yeso		$R^2$	$R^2_{aj}$
	$F_0$	$p$ -valor	$F_0$	$p$ -valor	$F_0$	$p$ -valor		
$\rho$	63,62	0,0000 <sup>a</sup>	15,32	0,0000 <sup>a</sup>	4,43	0,0001 <sup>a</sup>	0,865	0,833
$M_r$	3,93	0,0005 <sup>a</sup>	13,47	0,0000 <sup>a</sup>	7,89	0,0000 <sup>a</sup>	0,659	0,578
<i>DHS</i>	66,26	0,0000 <sup>a</sup>	43,79	0,0000 <sup>a</sup>	56,33	0,0000 <sup>a</sup>	0,927	0,910

Nota:  $R^2$ : Coeficiente de determinación.  $R^2_{aj}$ : Coeficiente de determinación ajustado. No incluye el tratamiento 00. <sup>a</sup> Significativo.

Tabla 5. Diferencias con los tratamientos control por cada variable.

Tratamiento	Tratamiento 00			Tratamiento	Tratamiento 01		
	$\rho$	$\sqrt{M_r}$	<i>DHS</i>		$\rho$	$\sqrt{M_r}$	<i>DHS</i>
01	C						
02	D			02			
03		<b>D</b>	A <sup>a</sup>	04	C <sup>a</sup>	A <sup>a</sup>	
10		<b>B</b>	A <sup>a</sup>	03; 05	A <sup>a</sup>		
04; 06; 07; 09; 11			A <sup>a</sup>	07	D <sup>a</sup>	A <sup>a</sup>	
12				08	A <sup>a</sup>	<b>B</b>	A <sup>a</sup>
13	A <sup>a</sup>			10	E <sup>a</sup>	A <sup>a</sup>	
14	A <sup>a</sup>	<b>A</b>	A <sup>a</sup>	11	B <sup>a</sup>	A <sup>a</sup>	
08; 17		<b>A</b>	A <sup>a</sup>	12; 13	A <sup>a</sup>		
18	B <sup>a</sup>		A <sup>a</sup>	14	A <sup>a</sup>	<b>A</b>	A <sup>a</sup>
20	A <sup>a</sup>	<b>C</b>	A <sup>a</sup>	16	A <sup>a</sup>	A <sup>a</sup>	A <sup>a</sup>
23	A <sup>a</sup>	<b>A</b>	A <sup>a</sup>	17		<b>C</b>	A <sup>a</sup>
24	A <sup>a</sup>	<b>B</b>	A <sup>a</sup>	23	A <sup>a</sup>	<b>B</b>	A <sup>a</sup>
05; 15; 16; 19; 21; 22; 25	A <sup>a</sup>		A <sup>a</sup>	06; 09; 15; 18; 19; 20; 21; 22; 24; 25	A <sup>a</sup>	A <sup>a</sup>	

Nota: Las letras indican que existe diferencia significativa con el tratamiento control, donde A representa la mayor significancia. Los tratamientos que comparte una letra son significativamente similares. <sup>a</sup> Media inferior a la media del tratamiento control.

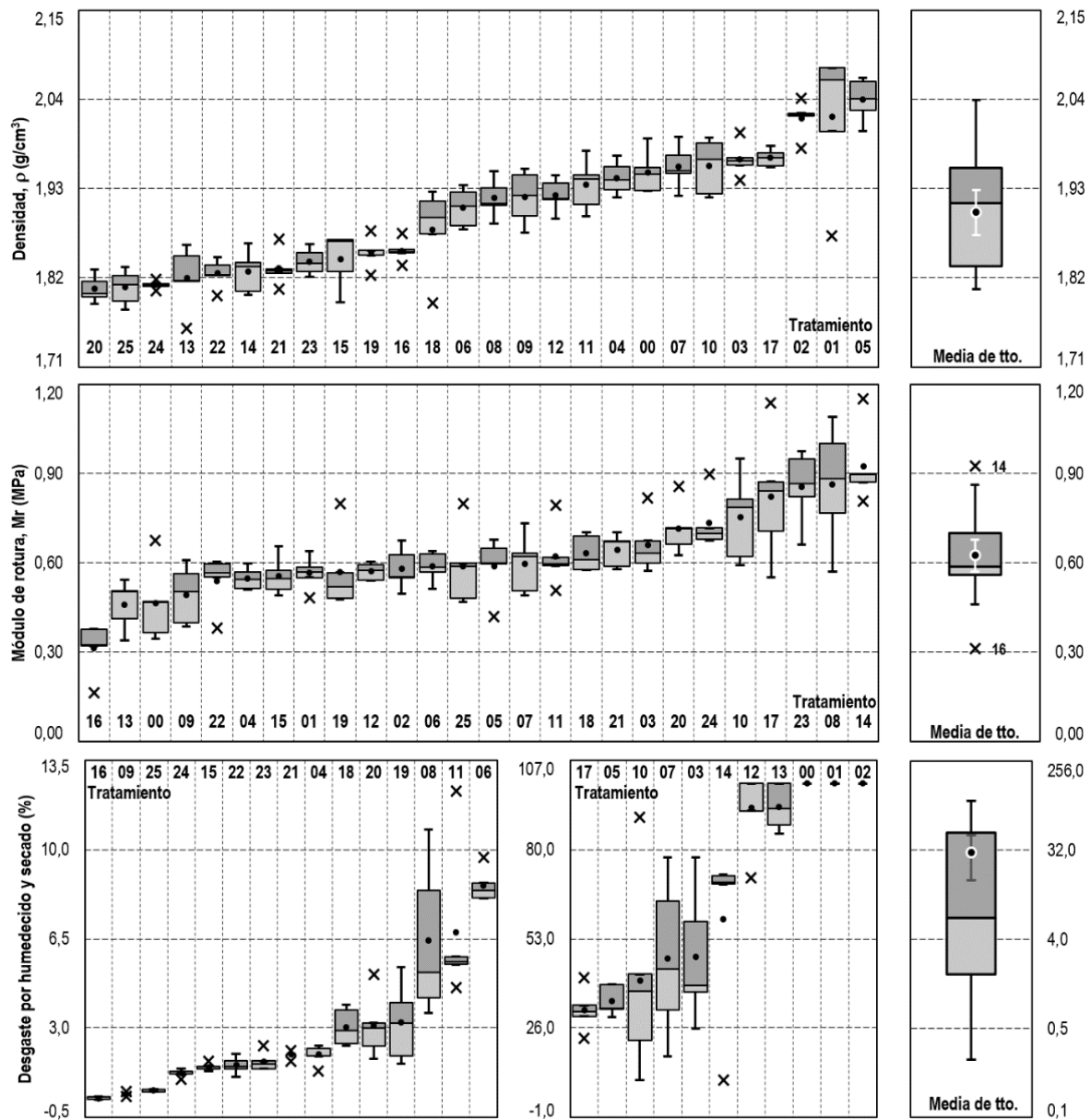


Figura 10. Comparación descriptiva entre tratamientos y por media de tratamiento.

El módulo de rotura óptimo se muestra en la Tabla 6 y los rangos de cal/yeso más óptimos la Figura 11.

Tabla 6. Tratamientos óptimos según módulo de rotura.

Variables	Tratamientos <sup>a</sup>							
	03	20	24	10	17	23	08	14
Cal (%)	1,0	3,0	7,0	0,0	0,0	6,0	3,0	4,0
Yeso (%)	1,0	5,0	1,0	6,0	8,0	2,0	1,0	2,0
$M_r$ (MPa)	0,660 <sup>c</sup>	0,715 <sup>c</sup>	0,734 <sup>c</sup>	0,753 <sup>c</sup>	0,822 <sup>b,c</sup>	0,856 <sup>b,c</sup>	0,863 <sup>b,c</sup>	0,925 <sup>b,c</sup>
$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,966 <sup>h,i,j</sup>	1,806 <sup>g</sup>	1,811 <sup>g</sup>	1,958 <sup>h,j</sup>	1,968 <sup>h,i,j</sup>	1,840 <sup>g</sup>	1,918 <sup>h</sup>	1,828 <sup>g</sup>
DHS (%)	47,46 <sup>f</sup>	3,08 <sup>d</sup>	1,24 <sup>d</sup>	40,40 <sup>e</sup>	31,48 <sup>e</sup>	1,68 <sup>d</sup>	6,44 <sup>d</sup>	58,92 <sup>f</sup>

Nota: <sup>a</sup> Tratamientos significativos en  $\sqrt{M_r}$ , así como: <sup>b</sup> significativa al tratamiento 01 y similares según Duncan; y, <sup>c</sup> significativa al tratamiento 00 y similares según Tukey. <sup>d,e,f,g,h</sup> Similares según Tukey y Duncan. <sup>i</sup> No significativa al tratamiento 01. <sup>j</sup> No significativa al tratamiento 00.

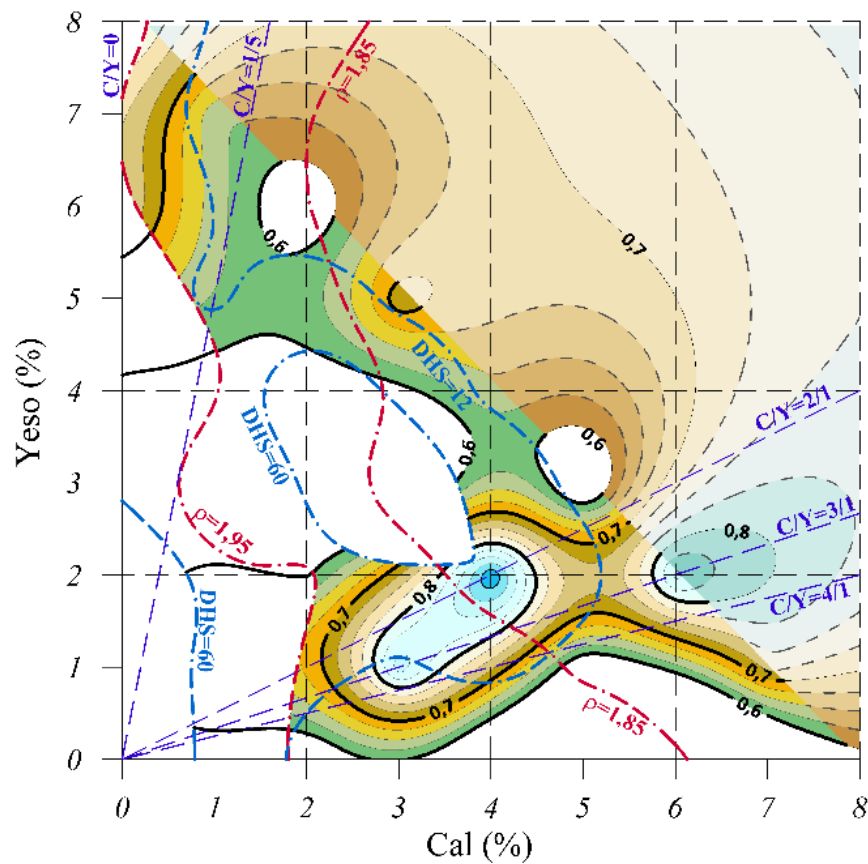


Figura 11. Módulo de rotura óptimo por densidad y desgaste por humedecimiento y secado.



## DISCUSIÓN

Los resultados muestran que el módulo de rotura no se ajusta a una distribución normal, pero sí la función  $\sqrt{M_r}$ ; por otro lado,  $M_r$  y  $\sqrt{M_r}$  tienen homogeneidad e independencia. La densidad y el desgaste por humedecimiento y secado no tienen normalidad ni homogeneidad, pero sí independencia, asimismo, no se ha obtenido una función de  $\rho$  o *DHS* que ajuste los datos a una distribución normal (Tabla 2). Sin embargo, las pruebas de hipótesis seleccionadas permiten evaluar estadísticamente los resultados.

El análisis estadístico de los resultados con una significancia de  $p\text{-valor} < \alpha = 0,05$  (Tabla 3 y Tabla 4) muestran que existe un efecto significativo de los tratamientos de la cal, del yeso, y de la interacción cal-yeso en cada variable dependiente; de este modo, la inclusión de cal y/o yeso como tratamiento al adobe compactado incrementa el módulo de rotura, reduce la densidad y el desgaste por humedecimiento y secado de la unidad de adobe compactado. Sin embargo, la densidad no se mantiene constante, pero se reduce, lo que es favorable para el comportamiento estructural.

El análisis conjunto de los resultados de todos los especímenes representados por la media de cada tratamiento por cada variable (Tabla 1) con la comparación con los tratamiento control (Tabla 5) permiten determinar los cambios significativos en el módulo de rotura, la densidad y el desgaste por humedecimiento y secado respecto a la unidad control sin cal o yeso de adobe compactada y de adobe no compactada.

Los resultados del módulo de rotura y del desgaste por humedecimiento y secado (Figura 8) presentan variabilidad según la proporción de cal y/o yeso que contenga la unidad de adobe compactado, evidenciando que la interacción de cal y yeso en un suelo SC son principalmente complementarias. De este modo, las proporciones similares de cal y yeso no resultan en este caso de mayor significancia; por otro lado, los resultados de la densidad (Figura 8) presentan una variación más uniforme y en general muestran una reducción en su valor a medida que se incrementa las proporciones de cal y/o yeso.



El comportamiento del desgaste por humedecimiento y secado a través de los ciclos de medición muestra que al inicio se presenta una variación uniforme pero que con el transcurso de los ciclos para proporciones similares de cal y yeso se ve reducida la capacidad de soportar el desgaste.

Es evidente que la interacción química entre las componentes del suelo, la cal y el yeso influye en el comportamiento de estas propiedades, y que sería necesaria analizarlas para una explicación más profunda del comportamiento.

Para determinar estadísticamente el tratamiento óptimo con el mayor módulo de rotura, la menor densidad de la unidad de adobe y con el menor desgaste por humedecimiento y secado, se tuvo en cuenta la significancia con los tratamientos control (Tabla 5) y la similitud entre tratamientos (Figura 10); en la Tabla 6 se muestran estos tratamientos óptimos, algunos más adecuados que otros según lo que el caso requiera.

De la misma manera, los valores óptimos de cada variable (Figura 8) por comparación con el tratamiento control y comparación entre tratamiento (Tabla 5 y Figura 10) son: para el módulo de rotura en tres rangos,  $M_r > 0,60$  MPa (similares según Tukey),  $M_r > 0,70$  MPa (similares según Duncan y significativa al tratamiento 00) y  $M_r > 0,80$  MPa (significativa al tratamiento 01); para la densidad en dos rangos  $\rho < 1,95$  g/cm<sup>3</sup> (similares según Tukey y significativa al tratamiento 01) y  $\rho < 1,85$  g/cm<sup>3</sup> (similares según Duncan y significativa al tratamiento 00); y, para el desgaste por humedecimiento y secado en dos rangos  $DHS < 60$  % (significativa al tratamiento 00 y 01) y  $DHS < 12$  % (similares según Tukey y Duncan).

Por otro lado, la intersección de superficies de los modelos Kriging del módulo de rotura, densidad, y desgaste por humedecimiento y secado (Figura 8), permitió valorar los rangos de cal/yeso más óptimos que pueden sugerirse para la elaboración de un adobe compactado (Figura 11).

## CONCLUSIONES

La inclusión de cal y/o yeso, en la mezcla de tierra (arena arcillosa con grava) de la unidad de adobe compactado, influye significativamente, respecto a una unidad control sin cal o yeso de adobe compactada y de adobe no compactada, al incrementar el módulo de rotura de  $M_r = 0,566$  MPa a  $0,822 \leq M_r \leq 0,925$  MPa y de  $M_r = 0,464$  MPa a  $0,660 \leq M_r \leq 0,925$  MPa respectivamente; al reducir la densidad de  $\rho = 2,019$  g/cm<sup>3</sup> a  $1,806 \leq \rho \leq 1,958$  g/cm<sup>3</sup> y de  $\rho = 1,950$  g/cm<sup>3</sup> a  $1,806 \leq \rho \leq 1,880$  g/cm<sup>3</sup> respectivamente; y, al reducir el desgaste por humedecimiento y secado de  $DHS = 100,0$  % a  $0,00 < DHS < 58,92$  %.

Las proporciones de cal /yeso óptimas para un módulo de rotura mayor ( $0,60 < M_r < 0,95$  MPa) con un bajo desgaste por humedecimiento y secado ( $0,0 < DHS < 50,0$  %) y baja densidad ( $1,80 < M_r < 1,95$  gr/cm<sup>3</sup>), se presentan en dos rangos: la primera y la más óptima con una mayor cantidad de cal en proporciones de 2/1 a 4/1 con un mínimo de 2,0% de cal y que influyen significativamente en todas las variables a la vez; y, la segunda con una mayor cantidad de yeso en proporciones de 0 a 1/5 con un mínimo de 4,5% de yeso. Por otro lado, proporciones similares de cal y yeso no generan los resultados esperados.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amorós García, Marta. 2011. *Desarrollo de un nuevo ladrillo de tierra cruda, con aglomerantes y aditivos estructurales de base vegetal*. Trabajo fin de máster, Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España. <[http://oa.upm.es/9058/2/TESIS\\_MASTER\\_MARTA\\_AMOROS\\_GARCIA.pdf](http://oa.upm.es/9058/2/TESIS_MASTER_MARTA_AMOROS_GARCIA.pdf)> [Consultada: 10-05-2020].

Asociación Española de Normalización y Certificación. 2008. *Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo* (Norma española UNE 41410). Madrid: AENOR. <[http://www.bioarkiteco.com/uploads/1/1/3/2/11328176/une\\_414102008.pdf](http://www.bioarkiteco.com/uploads/1/1/3/2/11328176/une_414102008.pdf)> [Consultada: 23-10-2020].

Blondet, Marcial; Vargas, Julio; y Tarque, Nicola. 2008. *Behaviour of earthen structures during the Pisco earthquake of August 15, 2007*. The 14 th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China. <[https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/14\\_S29-008.PDF](https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/14_S29-008.PDF)> [Consultada: 10-05-2020].

Blondet, Marcial; Vargas, Julio; Tarque, Nicola; y Iwaki, Carlos. 2011. «Construcción sismorresistente en tierra: la gran experiencia contemporánea de la Pontificia Universidad Católica del Perú». *Informes de la Construcción*, Vol. 63, N.º 523, Madrid: CSIC. 41–50. <<https://doi.org/10.3989/ic.10.017>>.

Bozzano Ciavaglia, Blanca. 2017. *Acabados y revestimiento en el diseño de arquitectura de tierra*. Tesina de grado, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay. <[http://www.fadu.edu.uy/tesinas/files/2018/08/TESINA\\_ACABADOS-Y-REVES-TIMIENTOS-EN-EL-DISE%C3%91O-DE-ARQUITECTURA-DE-TIERRA\\_Bozzano-Blanca-FINAL.pdf](http://www.fadu.edu.uy/tesinas/files/2018/08/TESINA_ACABADOS-Y-REVES-TIMIENTOS-EN-EL-DISE%C3%91O-DE-ARQUITECTURA-DE-TIERRA_Bozzano-Blanca-FINAL.pdf)>. [Consultada: 15-09-2021].

Cáceres Luján, Fiorella. 2010. *Mejora del adobe a partir de su estabilización con el material confitillo*. Trabajo de investigación, Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú.

Crespo Escobar, Santiago. 2010. *Materiales de construcción para edificación y obra civil*. Alicante: Editorial Club Universitario.

Dirección de normalización. 2017a. *Elementos de suelo sin cocer. Adobe estabilizado con asfalto para muros. Métodos de ensayo*. (NTP 331.202). Lima: INACAL.

Dirección de normalización. 2017b. *Elementos de suelo sin cocer. Adobe estabilizado con asfalto para muros. Muestreo y recepción*. (NTP 331.203). Lima: INACAL.

Gutiérrez Pulido, Humberto; y De la Vara Salazar, Román. 2008. *Análisis y diseño de experimentos*. México: Mc Graw Hill.

- Hernández Pocero, Josune. 2016. *Construcción con tierra: Análisis, conservación y mejora. Un caso práctico en Senegal*. Bachelor thesis, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona, España. <<https://upcommons.upc.edu/handle/2117/107822>> [Consultada: 10-11-2020].
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. 2018. *Encuesta Nacional de Hogares, Viviendas, según material predominante en las paredes exteriores y área de residencia*. <<https://www.inci.gob.pe/estadisticas/indice-tematico/housing/>> [Consultada: 02-05-2020].
- Jofré, Carlos; y Kraemer, Carlos. 2017. *Manual de estabilización de suelos con cemento o cal*. Madrid: IECA. <<http://www.anter.es/pdf/MANUAL-SUELOS.pdf>> [Consultada: 10-05-2020].
- Kuroiwa, Julio. 1987. *Evaluación de los riesgos de desastres naturales en la Región del Trifinio*. Lima, OEA. <<https://books.google.com.pe/books?id=bSIOAQAIAAJ&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>> [Consultada: 10-05-2020].
- Ministerio de transportes y comunicaciones. 2016. *Manual de ensayo de materiales*. Lima: MTC. <[https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas\\_carreteras/documentos/manuales/Manual%20Ensayo%20de%20Materiales.pdf](https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/Manual%20Ensayo%20de%20Materiales.pdf)> [Consultada: 10-05-2020].
- Ministerio de vivienda construcción y saneamiento. 2017. *Diseño y construcción con tierra reforzada*. (Norma E.080). Lima: SENCICO. <<https://www.gob.pe/institucion/sencico/informes-publicaciones/887225-normas-del-reglamento-nacional-de-edificaciones-rne>> [Consultada: 10-05-2020].
- Minke, Gernot. 2005. *Manual de construcción de Tierra*. Alemania: Editorial Fin de Siglo.
- Oliver, Margaret; y Webster, Richard. 2015. *Basic Steps in Geostatistics: The Variogram and Kriging*. SpringerBriefs in Agriculture. Suiza: Springer.

Quiteño, Ana. 2015. «La cal como elemento que mejora la resistencia en la producción del ladrillo de adobe en el departamento de Ahuchapán». *Anuario de investigación*, Vol. 4, El Salvador: UNICAES, 367-374. <<http://www.diyys.catolica.edu.sv/wp-content/uploads/2016/06/30CalAnVol4.pdf>> [Consultada: 21-10-2020].

Yamin Lacouture, Luis; Phillips Bernal, Camilo; Reyes Ortiz, Juan; y Ruiz Valencia, Daniel. 2007. «Estudios de vulnerabilidad sísmica, rehabilitación y refuerzo de casas en adobe y tapia pisada». *APUNTES*, Vol. 20, N.º 2, Bogota: Pontificia Universidad Javeriana. 286-303. <<http://www.scielo.org.co/pdf/apun/v20n2/v20n2a09.pdf>> [Consultada: 20-10-2020].

Yamin, Luis; Rodríguez, Ángel; Fonseca, Luis; Reyes, Juan; y Phillips, Camilo. 2003. «Comportamiento sísmico y alternativas de rehabilitación de edificaciones en adobe y tapia pisada con base en modelos a escala reducida ensayados en mesa vibratoria». *Revista de ingeniería*, N.º 18, Bogota: Universidad los Andes. 175-190. <<https://doi.org/10.16924/revinge.18.20>>.

Fecha de recepción: 22/02/22

Fecha de aceptación: 04/04/22

### **Correspondencia**

Richard Alberto Depaz Blácido

rdepazb@unasam.edu.pe