

Reinforcement methods in adobe houses in the town of Yanamarca - Perú

Yeraldyn M. Esteban¹; Ingrid M. Chavez²; Efrain E. Limaylla-Santiago³; Jose G. Solano-Canchaya⁴
^{1,2,3,4}Universidad Tecnológica del Perú, Facultad de Ingeniería Civil, Lima - Perú, U19205408@utp.edu.pe,
U17206894@utp.edu.pe, C24946@utp.edu.pe, C22687@utp.edu.pe

Abstract-- Currently, adobe houses are exposed to seismic movements, as they were built traditionally without professional supervision. This involves establishing an optimal reinforcement method using uniaxial, biaxial, and welded geogrids for houses built approximately 30 years ago. First, the characterization of the clay soil was carried out in order to understand its physical properties and determine the appropriate dosage for the production of adobe blocks. Subsequently, these were used in the construction of 12 walls, which were compared using the diagonal compression test to determine the strength of each one. The results show that the welded mesh exhibits better stress behavior with an average of 1.55 kg/cm² compared to the other two mentioned reinforcement methods, which presented a result below the average of 1.47 kg/cm². Additionally, the unreinforced adobe pattern walls obtained an average of 0.19 kg/cm², falling below the minimum values established in the Technical Standard E080, which sets a minimum resistance of 0.25 kg/cm². Concluding that the welded mesh is the optimal technique for reinforcing adobe houses in the locality of Yanamarca-Peru.

Keywords-- Welded mesh, adobe, diagonal compressive strength, uniaxial geogrids, biaxial geogrids.

Métodos de reforzamiento en viviendas construidas de adobe en la localidad de Yanamarca – Perú

Yeraldyn M. Esteban¹; Ingrid M. Chavez²; Efrain E. Limaylla-Santiago³; Jose G. Solano-Canchaya⁴

^{1,2,3,4}Universidad Tecnológica del Perú, Facultad de Ingeniería Civil, Lima - Perú, U19205408@utp.edu.pe,
U17206894@utp.edu.pe, C24946@utp.edu.pe, C22687@utp.edu.pe

Resumen— En la actualidad, las viviendas de adobe están expuestas a los movimientos sísmicos, ya que fueron construidas de manera tradicional sin una supervisión profesional. Esto implica establecer un método de reforzamiento óptimo mediante geomallas uniaxiales, biaxiales y electrosoldadas para las viviendas construidas aproximadamente hace 30 años. Primero, se realizó la caracterización del suelo arcilloso con la finalidad de conocer las propiedades físicas y determinar la dosificación apropiada para la elaboración de los bloques de adobe. Posteriormente estos se emplearon en la construcción de 12 muretes, los cuales fueron comparados mediante el ensayo de compresión diagonal para determinar la resistencia de cada uno de ellos. Los resultados muestran que la malla electrosoldada lidera un mejor comportamiento de esfuerzo con una media de 1.55 kg/cm² a diferencia de los otros dos métodos de reforzamientos mencionados quienes presentaron un resultado por debajo de la media de 1.47 kg/cm², además los muretes patrón de adobe sin reforzamiento obtuvieron una media de 0.19 kg/cm², encontrándose por debajo de los valores mínimos establecidos en la Norma Técnica E080, el cual establece una resistencia mínima de 0.25 kg/cm². Concluyendo así que la malla electrosoldada es la técnica óptima para reforzar viviendas de adobe en la localidad de Yanamarca-Perú.

Palabras clave—malla electrosoldada, adobe, resistencia a la compresión diagonal, geomallas uniaxiales, geomallas biaxiales.

I. INTRODUCCIÓN

Durante muchos años, se han llevado a cabo construcciones de forma informal, principalmente en zonas remotas de la ciudad donde los pobladores cuentan con escasos recursos económicos. Estas construcciones suelen ser de adobe, este material de construcción tiene ventajas, como su bajo costo y su fácil acceso. El adobe está compuesto de materiales como paja, agua y arcilla, además es uno de los sistemas de construcción más empleados en áreas rurales como América Latina, África y Asia [1].

En América Latina, la construcción con adobe es habitual, sin embargo, gran cantidad de estas viviendas se construyen de formas inadecuadas y tradicionales. En algunos países como Colombia y Ecuador, este tipo de construcciones son consideradas como inadecuadas debido a que no soportan cargas derivadas de un evento sísmico. Dado que sus viviendas colapsaron durante sismos anteriores, algunos de estos tenían una magnitud moderada, lo que ocasionó tanto muertes humanas como pérdidas en el patrimonio cultural [2].

El Perú está situado en una de las áreas con alta actividad sísmica, lo que repercute en las construcciones de adobe debido a su baja resistencia a la tracción. Esto sugiere que presenta una elevada inestabilidad que lo hace vulnerable a las diversas

cargas provocadas por un sismo. Existen diferentes factores que generan este problema, uno de ellos es la ausencia de supervisión técnica durante el proceso de construcción [3].

Durante un sismo, la etapa de comportamiento elástico de los muros estructurales de tierra armada es muy corta, ya que la tierra se fisura a un nivel muy bajo de esfuerzos de tracción. Se ha probado que la unión entre la tierra y los refuerzos facilita un comportamiento apropiado de los muros durante su etapa inelástica [15].

El objetivo de esta investigación es determinar la influencia de las geomallas uniaxiales, biaxiales y electrosoldadas como método de reforzamiento en viviendas construidas de adobe, eligiendo la más apropiada de forma técnica y al mismo tiempo económica para el uso de los pobladores de la localidad de Yanamarca, Distrito de Acolla, Provincia de Jauja, Departamento de Junín, Perú. Y así prevenir que los habitantes dejen su lugar de origen y puedan continuar su vida a través de la agricultura y la ganadería

Finalmente, la estructura de esta investigación se presenta de la siguiente manera: La sección II detalla la metodología de estudio. La Sección III presenta los resultados de los ensayos llevados a cabo en el laboratorio con el objetivo de evaluar el reforzamiento del adobe mediante las geomallas uniaxiales, biaxiales y electrosoldadas. La Sección IV proporciona una discusión final sobre los hallazgos de los ensayos realizados. Después, en la sección V se exponen las conclusiones.

II. METODOLOGÍA

A. Materiales

1) *Arcilla y Paja:* La elaboración de los muretes se llevó a cabo con arcilla y paja proveniente de la localidad de Yanamarca. La arcilla empleada se caracteriza por su color rojo [4], y por contener una alta plasticidad, mientras que la paja empleada proviene del tallo seco del trigo y se cortó cada 5cm aproximadamente para que se integre mejor en la mezcla [5], [6]. Las cantidades fueron establecidas de acuerdo con las dosificaciones obtenidas en el laboratorio.

2) *Agua:* El agua empleada tanto para el proceso de mezcla de la arcilla como el curado de las muestras, durante los periodos de 7, 14 y 28 días, fue proveniente del laboratorio donde se llevaron a cabo los ensayos. Por lo tanto, fue agua potabilizada.

3) *Material de Reforzamiento:* Las geomallas se utilizaron como método de reforzamiento para obtener una mayor resistencia y rigidez en los muretes ensayados, se

adquirieron en un Centro Comercial de la Zona, los cuales tienen una medida de 1 por 3.5 m para cada murete [2], [7].

- *Geomallas uniaxiales*: Generalmente fabricada de polietileno de alta densidad o poliéster, tiene una alta resistencia a la tracción en una sola dirección, a la vez permite un mejor confinamiento en los muros y es resistente frente a los agentes químicos y a la degradación [8], [18].

- *Geomallas biaxiales*: Fabricada de polipropileno, a diferencia de la geomalla uniaxial esta se caracteriza por tener una alta resistencia a la tracción en ambas direcciones, también tiene una gran durabilidad y resistencia a la degradación química [8], [18].

- *Malla electrosoldada*: Fabricada con alambre de acero de diferentes diámetros, en este caso para el reforzamiento se utilizó la malla de 1 pulgada por 1 pulgada. Proporciona una alta resistencia a la tracción y distribución uniforme de cargas [8], [19].

B. Preparación de muestras

1) *Diseño de mezcla*: El diseño de mezclas se llevó a cabo conforme a la norma E080 Diseño y Construcción con tierra reforzada, para garantizar la calidad y uniformidad en las proporciones de los materiales. El diseño de la muestra tiene que ser homogénea, en la Fig. 1(a) se muestra el proceso de la mezcla de los componentes.



(a) Mezcla de arcilla, paja y agua (b) volteado de bloques para culminar con el secado

Fig. 1 Proceso de preparación de bloques de adobe.

2) *Moldeo de muestra*: Las muestras de adobe fueron moldeados de acuerdo con la norma E080 Diseño y Construcción con tierra reforzada. Esta norma nos señala que el procedimiento inicia con la limpieza y la inmersión de los moldes durante 24 horas para garantizar un desmolde adecuado. Se utilizaron moldes de forma rectangular de 10 por 20 por 40 cm. Cada bloque contiene 4.70 kg de arcilla y 2.50 litros de agua, las cuales fueron llenados en 3 capas y compactados para una distribución homogénea. Luego, se aplicaron pequeños golpes para obtener una adecuada eliminación de aire. Se realizaron 216 bloques las cuales cada uno tenía la dosificación mencionada, estos fueron colocados en un área calurosa para permitir su secado natural durante 28 días como lo estipula la norma. En el décimo día, los bloques de adobe

fueron volteados, ver Fig. 1(b). Finalmente, en la Fig. 2 se realizó el armado de los 12 muretes, de los cuales 3 fueron de patrón, 3 fueron reforzados con geomalla uniaxial, 3 con geomalla biaxial y tres con la malla electrosoldada, considerando 15 bloques de adobe para cada murete.



(b) Murete con geomalla uniaxial y de patrón (a) Murete con geomalla biaxial y electrosoldada

Fig. 2 Armado de muretes de adobe con y sin reforzamiento

C. Ensayos

1) *Contenido de humedad*: Se emplearon dos muestras para este ensayo, el cual consiste en pesar las muestras húmedas en un recipiente, secarlas en un horno durante 24 horas y volver a pesarlas tras enfriarlas, la diferencia de peso con respecto la pérdida de agua nos permite determinar la humedad términos porcentuales de la masa seca del suelo.

2) *Límites de consistencia*: Estos son parámetros que caracterizan el comportamiento de los suelos finos, para el caso del límite líquido se determina mediante el ensayo de la cuchara de Casagrande, el cual consisten en colocar una muestra de suelo sobre cuchara, luego abrir un surco en el suelo con un acanalador, y finalmente dejar caer la cuchara por 25 veces desde la altura de 1 cm, ver Fig. 3. Para el límite plástico se toma pequeñas porciones de la muestra y las hacemos rodar con la palma de la mano hasta lograr una forma cilíndrica de 3 mm de diámetro. Una vez que se obtiene una ruptura, se coloca en un recipiente para su pesaje y se lleva al horno durante 24 horas.

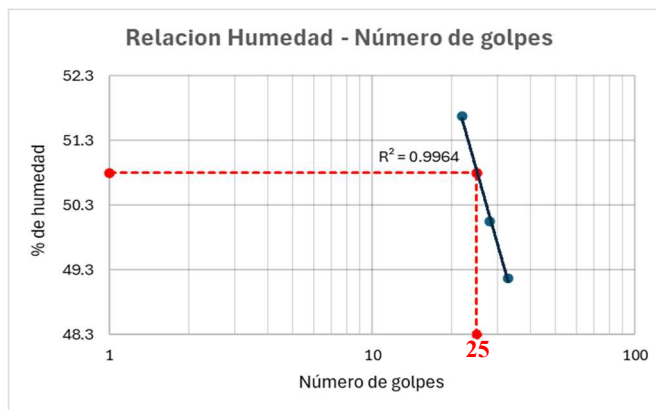


Fig. 3 Diagrama de porcentaje de contenido de humedad y número de golpes.

La Fig. 4 presenta la carta de plasticidad de Casagrande, la cual nos permite verificar el tipo de suelo que es nuestro

material, utilizando los límites de consistencia. Se observa que es un CH, lo que significa que es una arcilla con alta plasticidad.

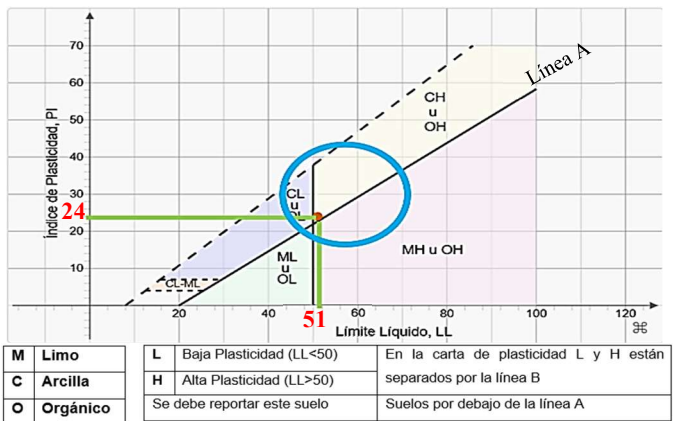


Fig. 4 Carta de Plasticidad de Casagrande ASTM D4318

3) *Análisis granulométrico:* Asimismo, se realizó el ensayo de granulometría que consiste en clasificar las partículas de un material según su tamaño, utilizando una serie de tamices con mallas de diferentes tamaños. Se agita la muestra a través de estos tamices y luego se pesa el material retenido, ver Fig. 5.

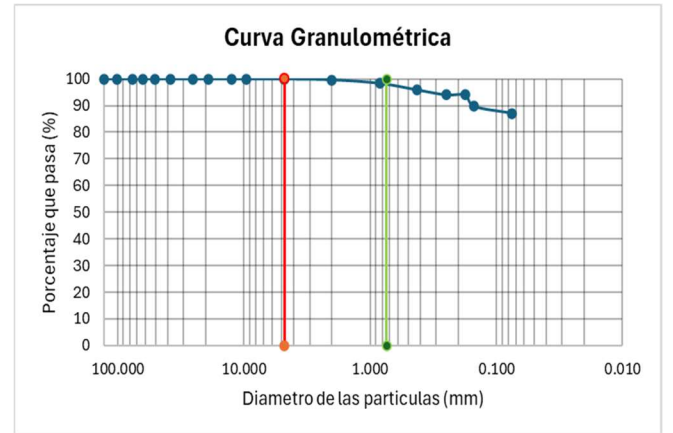


Fig. 5 Curva Granulométrica según la norma NT'P339.128

4) *Resistencia a la compresión diagonal:* El ensayo de resistencia a la compresión diagonal de muretes de mampostería se llevó a cabo de acuerdo con la norma E080, ver la Fig. 6, la cual define los métodos estandarizados para estas pruebas. En este ensayo con la ayuda de una prensa de compresión se somete el murete a una carga de compresión a lo largo de una de sus diagonales, la carga inicial desde 0.00 kpa y se incrementa hasta que el murete presente un patrón de falla específico. En ese instante, se registra la carga máxima como la resistencia a la compresión diagonal del murete [9].



(a) Esfuerzo máximo murete con geomalla uniaxial (b) Esfuerzo máximo murete con geomalla biaxial



(c) Esfuerzo máximo murete con malla electrosoldada

Fig. 6 Ensayo de compresión diagonal a muretes reforzados.

III. RESULTADOS

A. Ensayos de las propiedades físicas del suelo arcilloso

1) *Contenido de humedad:* Como se muestra en la Tabla I, se calculó el valor medio del contenido de humedad para este estudio, lo que resultó en un 4.2%.

TABLA I
CONTENIDO DE HUMEDAD EN LAS MUESTRAS DE SUELO SEGÚN LAS NORMAS MTC E-108/ASTM D 2216

MUESTRA	Arcilla	
MATERIAL	Suelo	
CALCULOS DEL CONTENIDO DE HUMEDAD		
	Muestras	
Tara N°	A	B
Peso de tara (g)	92.4	95.1
Tara + muestra húmeda (g)	354.2	332.8
Tara + muestra seca (g)	343.8	323.3
Peso de Agua (g)	10.4	9.5
Peso de La muestra seca (g)	251.4	228.2
Contenido de Humedad (%)	4.2	4.2
Promedio (%)	4.2	

2) *Límites de consistencia:* Los resultados obtenidos del límite de consistencia nos indican un límite plástico de 27%, un límite líquido de 51% y un índice de plasticidad del 24%, tal como se muestra en la Tabla II.

TABLA II
LÍMITES DE CONSISTENCIA DEL SUELO SEGÚN LA NORMA
MTC E-110; MTC E-111/ASTM D 4318

		Material pasante del tamiz N° 40				
DESCRIPCIÓN	Ud.	Limite Liquido			Limite Plástico	
Nro. De Recipiente		1	2	3	1	2
Peso de Recipiente + Suelo Húmedo (A)	g	25.33	26.31	25.84	26.12	25.47
Peso de Recipiente + Suelo Seco (B)	g	21.64	22.29	22.09	23.67	23.2
Peso de Recipiente (C)	g	14.52	14.26	14.45	14.58	14.67
Peso de Agua (A-B)	g	3.68	4.02	3.75	2.45	2.27
Peso del Suelo Seco (B-C)	g	7.12	8.03	7.64	9.09	8.53
Contenido de Humedad ((A-B)/(B-C)*100)	%	51.67	50.05	49.17	26.89	26.56
Nº de Golpes		22	28	33		
RESULTADOS OBTENIDOS	Límite de Consistencia				Índice Plástico	
	Liquido		Plástico			
	51		27		24	

3) *Análisis granulométrico:* La Tabla III muestra los resultados del análisis de granulometría, en la que el porcentaje de finos es del 87.10%, lo que evidencia un 73% de arcilla y el resto de los limos.

TABLA III
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL SUELO POR TAMIZADO SEGÚN
NORMA NTP.339.128

Tamiz	Apertura (mm)	Retenido (%)	Pasa (%)
5"	127.000	0.00	100
4"	101.600	0.00	100
3"	76.200	0.00	100
2 1/2"	63.300	0.00	100
2"	50.800	0.00	100
1 1/2"	38.100	0.00	100
1"	25.400	0.00	100
3/4"	19.000	0.00	100
1/2"	12.500	0.00	100
3/8"	9.500	0.00	100
N°4	4.750	0.00	100
N°10	2.000	0.30	99.70
N°20	0.840	1.30	98.40
N°40	0.425	2.50	95.90
N°60	0.250	1.90	94.00
N°80	0.177	0.00	94.00
N°100	0.150	4.30	89.70
N°200	0.075	2.60	87.10
<N°200	FONDO		

DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA		
Grava (%)	Arena (%)	Finos (%)
0.00	12.90	87.10
CLASIFICACIÓN DE SUELOS		
Clasificación SUCS (ASTM D2487)		CH
Clasificación AASHTO (D3282)		A-7-6 (16)

B. Análisis de resistencia a la compresión

En esta sección se presentan los resultados a la compresión diagonal realizado a los muretes de patrón, así como a los muretes reforzados con geomallas uniaxial, biaxial y la malla electrosoldada.

1) *Patrón sin reforzamiento:* Como se muestra en la tabla IV, comenzamos con los muretes sin reforzamiento conocidos

como patrón. Los resultados obtenidos en laboratorio de la resistencia a la compresión diagonal varían desde 0.17, 0.19 y 0.20 Kg/cm², siendo el valor promedio de las tres muestras 0.19 Kg/cm². Así mismo, el análisis estadístico de desviación estándar (σ) muestra poca variabilidad 0.02 kg/cm², por tanto, se valida la consistencia de los resultados entre los distintos muretes ensayados.

TABLA IV
ESFUERZOS DE MURETES DE PATRÓN

Muestra	Largo de murete (mm)	Altura de murete (mm)	Espesor de murete (mm)	Fuerza Máxima (kg)	Esfuerzo vm (MPa) (kg/cm ²)	
P-1	601.00	601.50	131.00	1564.00	0.14	0.20
P-2	598.50	601.50	132.00	1612.00	0.14	0.19
P-3	602.00	599.60	129.50	1537.00	0.14	0.17
σ	1.80	1.10	1.26	37.99	0.00	0.02

2) *Geomalla uniaxial:* Respecto a este reforzamiento, la Tabla V muestra la resistencia a la compresión diagonal de los tres muretes reforzados con la geomalla uniaxial, logrando un valor medio de 1.47 Kg/cm². también, el análisis estadístico de desviación estándar (σ) muestra poca variabilidad 0.05 kg/cm², por tanto, se valida la consistencia de los resultados entre los distintos muretes ensayados.

TABLA V
ESFUERZOS DE MURETES REFORZADOS CON GEOMALLA UNIAXIAL

Muestra	Largo de murete (mm)	Altura de murete (mm)	Espesor de murete (mm)	Fuerza máxima (kg)	Esfuerzo vm (MPa) (kg/cm ²)	
GU-1	603.00	600.50	130.30	1625.00	0.14	1.47
GU-2	599.80	601.00	130.70	1692.00	0.15	1.52
GU-3	601.40	599.80	129.40	1569.00	0.14	1.43
σ	1.60	0.60	0.67	61.58	0.01	0.05

3) *Geomalla biaxial:* Respecto a este tipo de reforzamiento, en la Tabla VI muestra el resultado de la resistencia a la compresión para tres muretes de adobe reforzado con geomalla biaxial siendo el promedio 1.43 kg/cm². Así mismo, la desviación estándar (σ) muestra poca variabilidad 0.04 kg/cm², validando la consistencia de los resultados entre los distintos muretes ensayados

TABLA VI
ESFUERZOS DE MURETES REFORZADOS CON GEOMALLA BIAxIAL

Muestra	Largo de murete (mm)	Altura de murete (mm)	Espesor de murete (mm)	Fuerza máxima (kg)	Esfuerzo vm (MPa) (kg/cm ²)	
GB-1	602.00	601.00	131.20	1596.00	0.14	1.43
GB-2	599.50	600.50	130.40	1612.00	0.14	1.46
GB-3	601.40	599.60	129.40	1535.00	0.14	1.39
σ	1.31	0.71	0.90	40.63	0.00	0.04

4) *Malla electrosoldada:* Para este método de reforzamiento, en la Tabla VII se observa los resultados obtenidos para el ensayo de resistencia a la compresión en muretes reforzados con mallas electrosoldadas dando un promedio 1.55 kg/cm². Finalmente, el análisis estadístico de

desviación estándar (σ) muestra poca variabilidad 0.04 kg/cm², validando la consistencia de los resultados entre los distintos muretes ensayados.

TABLA VII
ESFUERZOS DE MURETES REFORZADOS CON MALLA ELECTROSOLDADA

Muestra	Largo de murete (mm)	Altura de murete (mm)	Espesor de murete (mm)	Fuerza máxima (kg)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo vm (kg/cm ²)
ME-1	601.00	601.50	130.50	1688.00	0.15	1.52
ME-2	600.50	601.30	131.20	1703.00	0.15	1.53
ME-3	601.20	599.50	129.50	1744.00	0.16	1.59
σ	0.36	1.10	0.85	28.99	0.01	0.04

5) *Promedio de esfuerzos de los muretes con y sin reforzamiento:* El estudio de los esfuerzos promedios para cada uno de los reforzamientos propuestos se presenta en la Fig.7, revela que todos los métodos reforzamiento son adecuados, porque cumplen con la norma E080 Diseño y Construcción con tierra reforzada, pero la malla electrosoldada fue la más destacada.

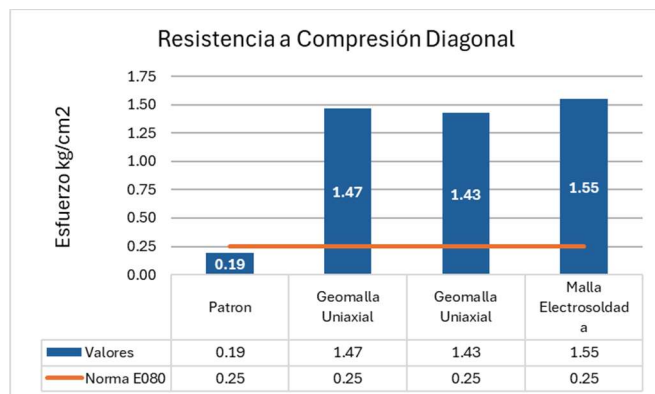


Fig. 7 Comparación de la resistencia a compresión diagonal para los reforzamientos de geomalla uniaxial, geomalla biaxial y la malla electrosoldada.

C. Análisis económico de los métodos de reforzamiento de muretes de adobe

El costo de materiales por m² de fabricación de adobe convencional es de \$37.44, ver Tabla VIII. Además, las comparaciones de costo de material de refuerzo, muestra que, entre la malla electrosoldada y la malla biaxial, el costo es superior, ver Tabla IX. En contraste con la geomalla uniaxial, que cuenta con un costo reducido. Finalmente, el costo de mano de obra varía en función a los días laborados, ver Tabla X.

TABLA VIII
COSTO TOTAL DE MATERIALES UTILIZADOS PARA LA ELABORACIÓN DEL ADOBE POR M2

Materiales	Cantidad (kg)	Costo kg (\$)	Costo Parcial (\$)	Dimensiones del murete (m2)	Costo Total por m2 (\$)
Paja	5	0.67	3.35	12x0.6x0.6	-
Arcilla	660	0.24	158.4		
Agua	-	-	-		
Total			161.75	4.32	37.44

TABLA IX
ANÁLISIS ECONÓMICO DE LOS MÉTODOS DE REFORZAMIENTO

Método	Nº muretes (und)	Material por murete (m2)	Total (m2)	Costo m2 (\$)	Costo total (\$)
Geomalla Uniaxial	3	3.5	10.5	4.02	42.21
Geomalla Biaxial	3	3.5	10.5	4.82	50.61
Malla Electrosoldada	3	3.5	10.5	5.36	56.28

TABLA X
ANÁLISIS ECONÓMICO DE MANO DE OBRA

Cantidad	Tiempo (día)	Sueldo diario (\$)	Total (\$)
1 operarios	1	26.78	26.78
2 peones	1	18.74	37.48
Total costo mano de obra			64.26

IV. DISCUSION

Con respecto al análisis de las propiedades físicas del suelo arcilloso. El material tiene alta absorción de agua lo que se considera para reducir el volumen de agua al elaborar los bloques de adobe. Esto se debe a que la Norma técnica E080 exige que el porcentaje de contenido de humedad no exceda el 20% con relación al peso del contenido seco. Además, el material posee una alta plasticidad, al contrastarlo con la carta de plasticidad de Casagrande, tal como se presenta en la Fig. 4, resulta ser un material de tipo CH (arcilla de alta plasticidad), corroborando con lo mencionado previamente. Esta alta capacidad de absorción de agua provoca que el suelo se deforme más rápido al momento de tener alguna carga. Sin embargo, investigaciones como la Ref. [10], s diferencia de la investigación, consigue porcentajes variados en el límite líquido con un 36%, en el límite plástico con un 22% y un 14% en su índice de plasticidad, logrando un tipo CL (arcilla de plasticidad moderada), el estudio indica que este tipo de suelo es más propicio para la mezcla de los bloques de adobe. Además, resalta que llevar a cabo estos ensayos es crucial para establecer el tipo de suelo que se va a emplear. Por otro lado, el estudio de la Ref. [11] hace mención sobre estos ensayos estandarizados, ellos demuestran que al tener un porcentaje cercano al 75% de arcilla, el adobe si puede ser utilizado como material de construcción, pero que se deben incorporar reforzamientos para que de esa forma la estructura tenga un mejor soporte a cargas.

En relación con la resistencia a la compresión en muros de adobe sin reforzamiento y con reforzamiento, según la Norma Técnica E080 para el ensayo de compresión diagonal en muretes, la norma establece una resistencia mínima de 0.25 kg/cm². De esta manera, el murete patrón se encuentra por debajo de los valores mínimos establecidos en la norma. Esto se debe a una mala distribución de la junta al realizar los muretes, lo que podría causar que las viviendas sufran agrietamientos o derrumbes causados por sismos, a diferencia de la Ref. [12], que también llevó a cabo pruebas de resistencia la compresión diagonal en murete patrón, logrando un 0.40kg/cm², esto implica que las viviendas de adobe sin reforzamiento pueden resistir cargas mínimas. Si examinamos los datos de la Tabla V en relación con los muretes reforzados con geomallas uniaxiales, obtenemos un resultado de 1.52 kg/cm². Este resultado inesperado a diferencia de los dos

muretes con este reforzamiento se debe a que el mortero empleado para la junta posee una proporción más apropiada para la adhesión en los adobes. Por otro lado, el reforzamiento con geomallas biaxiales presenta un promedio de 1.43 kg/cm², en comparación con investigaciones como la Ref. [13] que emplea el alambre de acero embobinado, que presenta las mismas propiedades en espesor y aperturas con la geomalla biaxial. Este tipo de reforzamiento alcanza una resistencia de 1.40kg/cm² parecida a nuestra investigación. Además, señala que este tipo de reforzamiento también debería ser aplicado en las viviendas de adobe. Asimismo, el refuerzo con mallas electrosoldadas con un promedio de 1.55 kg/cm², Además, tal como se menciona en la Ref. [14] en su estudio que la aplicación de mallas electrosoldadas es la más frecuente, se logró un resultado de 1.07 kg/cm² en compresión, lo que concuerda con nuestro estudio. Finalmente, los resultados de reforzamientos con geomallas uniaxiales, biaxiales y mallas electrosoldadas cumplen con la Norma Técnica E080 como se muestra en Fig. 8.

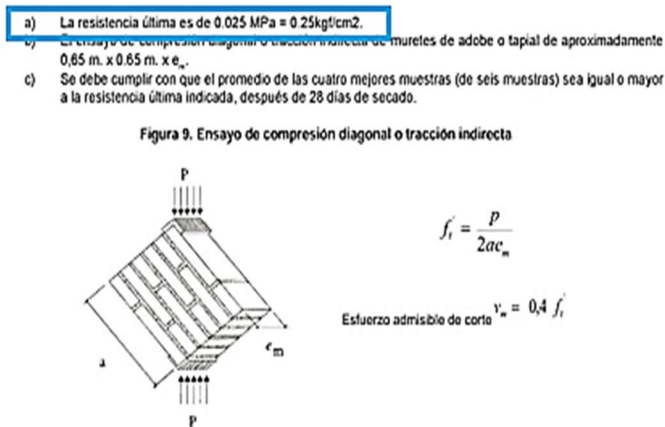


Figura 8. Ensayo de compresión diagonal de la Norma técnica E080

Estas evidencias tienen relación con la Ref. [15], donde mencionan que el sistema de malla electrosoldada mejora la protección contra sismos en las viviendas de adobe, dado que incrementa la resistencia de los muros, se regula su desplazamiento y se retrasa el derrumbe. Así mismo, normalmente se utiliza para cooperar en la resistencia ante las tracciones generadas por empujes horizontales perpendiculares al plano del muro, que provocan flexiones en los parámetros de las albañilerías de adobe. Otra función que desempeñan es la contención de los adobes, previniendo posibles desprendimientos de piezas o desplomes parciales de muros [8], [17], [20]. Por otro lado, la geomalla cumple la función exclusiva de resistir las tracciones inducidas por las demandas sísmicas. A pesar de que la malla sintética no contribuye a proporcionar una mayor rigidez a la albañilería de adobes, ensayos de laboratorio efectuados en la PUCP [15], señalan que, incrementa la habilidad de deformación y ductilidad del muro ante solicitaciones horizontales. Además de los beneficios desde una perspectiva estructural, el método de refuerzo sugerido brinda el beneficio de ser usado en estructuras ya

existentes, sin alterar su aspecto exterior. También, proporciona una resistencia a la corrosión y resulta asequible económicamente [16], [20].

Con respecto al análisis económico la arcilla representa una proporción significativa del costo total, específicamente el 98% de los costos. Esto refleja su mayor precio unitario en comparación con la paja, que, por su parte, representa únicamente el 2% del costo total, lo que subraya su carácter más económico. Por otro lado, la malla biaxial es la que tiene el mayor impacto en el presupuesto, debido a su costo, por ello es importante evaluar si la cantidad de malla biaxial utilizada es la adecuada para la estructura o si se puede ajustar la cantidad sin comprometer la calidad y seguridad de la construcción, mientras que la malla uniaxial como la electrosoldada tienen un costo relativamente bajo.

Finalmente se sugiere líneas de investigación futura acerca de la aplicación de estos métodos de reforzamiento, en estructuras de recuperación de patrimonios culturales.

V. CONCLUSIONES

Se determina que el valor del contenido de humedad es adecuado, ya que es posible regular la cantidad de agua utilizada en los bloques de adobe. No obstante, los resultados alcanzados por los límites de consistencia muestran una plasticidad elevada, alcanzando un valor del 24%, lo que indica que el material puede deformarse debido a las cargas, lo que podría impactar las estructuras construidas con adobe.

Los ensayos de resistencia de compresión diagonal realizadas en muretes de adobe reforzados con geomalla uniaxial, biaxial y malla electrosoldada incrementan notablemente la resistencia a la compresión, excediendo de esta manera el mínimo de 0.25 kg/cm² requerido por la Norma Técnica E080 para muros de adobe. En oposición, los muretes sin refuerzo llamados patrón muestran una resistencia de apenas 0.19 kg/cm², lo que los hace susceptibles a sufrir fisuras y derrumbes bajo cargas sísmicas.

De los tres métodos evaluados, se concluye que la malla electrosoldada demostró un rendimiento superior en su esfuerzo, al lograr un promedio de 1.55 kg/cm² en su resistencia, además regula su desplazamiento y retrasa el derrumbe. En contraposición los métodos de reforzamiento con malla uniaxial y biaxial, donde se muestra que su promedio fue de 1.47 kg/cm² y 1.43 kg/cm² respectivamente, lo que señala que es una alternativa ideal para incrementar la seguridad y la estabilidad estructural de las viviendas de adobe.

El análisis muestra que el costo principal del proyecto se encuentra en la malla electrosoldada, si bien es necesario para aplicaciones de alta resistencia, se recomienda revisar la cantidad de malla utilizada y explorar alternativas para reducir estos costos. Una opción sería las mallas uniaxiales y biaxiales quienes tienen un menor impacto en el presupuesto y podrían ser utilizadas de manera estratégica para optimizar los costos sin comprometer la integridad estructural.

REFERENCIAS

- [1] Zhang, J. F., Pang, S. Y., Gao, J. W., Deng, E. F., Wang, H., & Zhao, J. J. (2020). Experimental study on seismic behaviour of adobe wall reinforced with cold-formed thin-walled steel. *Thin-Walled Structures*, 147. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106493>
- [2] Zhang, J. F., Pang, S. Y., Gao, J. W., Deng, E. F., Wang, H., & Zhao, J. J. (2020). Experimental study on seismic behaviour of adobe wall reinforced with cold-formed thin-walled steel. *Thin-Walled Structures*, 147. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106493>
- [3] Carrillo, Julian, José A. Pincheira, y Leonardo E. Flores. 2020. "Quasi-static cyclic tests of confined masonry walls retrofitted with mortar overlays reinforced with either welded- wire mesh or steel fibers". *Journal of Building Engineering* 27(February 2019):1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100975>
- [4] Brito, M., Marvila, M., Linhares, J., & Azevedo, A. (2023). Evaluation of the Properties of Adobe Blocks with Clay and Manure. *Buildings*, 13(3), 657. <https://doi.org/10.3390/buildings13030657>
- [5] Brito-Del-Pino, J. F., Santamaría-Herrera, N. M., Macas-Peñaranda, C. A., & Tasán-Cruz, D. (2021). ELABORACIÓN DE ADOBE SOSTENIBLE. *DISEÑO ARTE y ARQUITECTURA*, 11, 59-79. <https://doi.org/10.33324/daya.vi11.459>
- [6] Abdelkader, B., Hamid, K., Mejedoub, M. A., Bada, A., & Moulay-Ali, A. (2024b). Influence of the dosage and length of palm fibers on the mechanical properties of reinforced adobe. *STUDIES IN ENGINEERING AND EXACT SCIENCES*, 5(2), e6769. <https://doi.org/10.54021/seesv5n2-102>
- [7] Banerjee, Susanta, Sanket Nayak, y Sreekanta Das. 2020. "Augmenting the seismic performance of masonry models using polypropylene band and steel wire mesh through shaking table testing". *Structures* 26(March):340–47. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.04.027>
- [8] Torres, C., & Jorquera, N. (2018). Seismic reinforcement techniques for the structural recovery of Chilean architectural heritage built in adobe. *Informes de La Construcción*, 70(550). <https://doi.org/10.3989/ic.16.128>
- [9] Loa, G., Muñoz, A., & Santa-Cruz, S. (2017). Seismic Evaluation of Incremental Seismic Retrofitting Techniques for Typical Peruvian Schools. *Structures Congress* 2017. <https://doi.org/10.1061/9780784480410.009>
- [10] Babé, C., Kidmo, D. K., Tom, A., Mvondo, R. R. N., Boum, R. B. E., & Djongyang, N. (2020). Thermomechanical characterization and durability of adobes reinforced with millet waste fibers (sorghum bicolor). *Case Studies in Construction Materials*, 13. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00422>
- [11] Azalam, Y., Alioui, A., Armouzi, N. A., Benfars, M., Mabrouki, M., & Bendada, E. M. (2024d). Physical and mechanical properties of adobe bricks reinforced by natural additives, a case study of alfalfa fibers. *EUREKA Physics And Engineering*, 4, 144-159. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2024.003426>
- [12] Daniel, J. J., Basoro, D., & Gebrie, M. (2021). An engineered alternative brick masonry unit for the poor inhabitants at hawassa village, ethiopia. *International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration*, 8(79). <https://doi.org/10.19101/IJATEE.2021.874128>
- [13] Jokhio, Gul Ahmed, Fatehi Mansoor Saad, Yasmeen Gul, Sharifah Maszura Syed Mohsin, y Noram Irwan Ramli. 2018. "Uniaxial compression and tensile splitting tests on adobe with embedded steel wire reinforcement". *Construction and Building Materials* 176:383–93. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.006>
- [14] Tello, J., Cabrera, M., Rodríguez, J., & Eyzaguirre, C. (2022). Compressed Earth Blocks for Rural Housing in Seismic Zones Using Bagasse Fibers from Sugarcane. In *Key Engineering Materials* (Vol. 922). <https://doi.org/10.4028/p-tsg594>.
- [15] Blondet, M., Vargas, J., Tarque, N., Iwaki, C. (2011). Construcción sismorresistente en tierra: La gran experiencia contemporánea de la Pontificia Universidad Católica del Perú. *Informes de la Construcción*, 63(523): 41-50, doi:<http://dx.doi.org/10.3989/ic.10.017>.
- [16] Solís, M., Torrealva, D., Santillán, P., Montoya, G. (2015). Análisis del comportamiento a flexión de muros de adobe reforzados con geomallas. *Informes de la Construcción*, 67(539): e092, doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.13.141>.
- [17] Catalán-Quiroz P, Moreno-Martínez JY, Galván A and Arroyo-Matus R. (2019) Shaking table tests on strengthened adobe dwellings typical of Mexico. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Structures and Buildings*, <https://doi.org/10.1680/jstbu.19.00093>.
- [18] SENCICO. Norma E.080: Diseño y Construcción Con Tierra Reforzada (Standard E.080—Design and Construction with Reinforced Earth); Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento de Perú: Lima, Peru, 2017.
- [19] SENCICO (Perú). Norma E. 070—Albañilería (Standard E. 070—Masonry); Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento de Perú: Lima, Peru, 2020.
- [20] Cárdenas-Gómez, J.C.; Bosch Gonzales, M.; Damiani Lazo, C.A. Evaluation of Reinforced Adobe Techniques for Sustainable Reconstruction in Andean Seismic Zones. *Sustainability* 2021, 13, 4955. <https://doi.org/10.3390/su13094955>